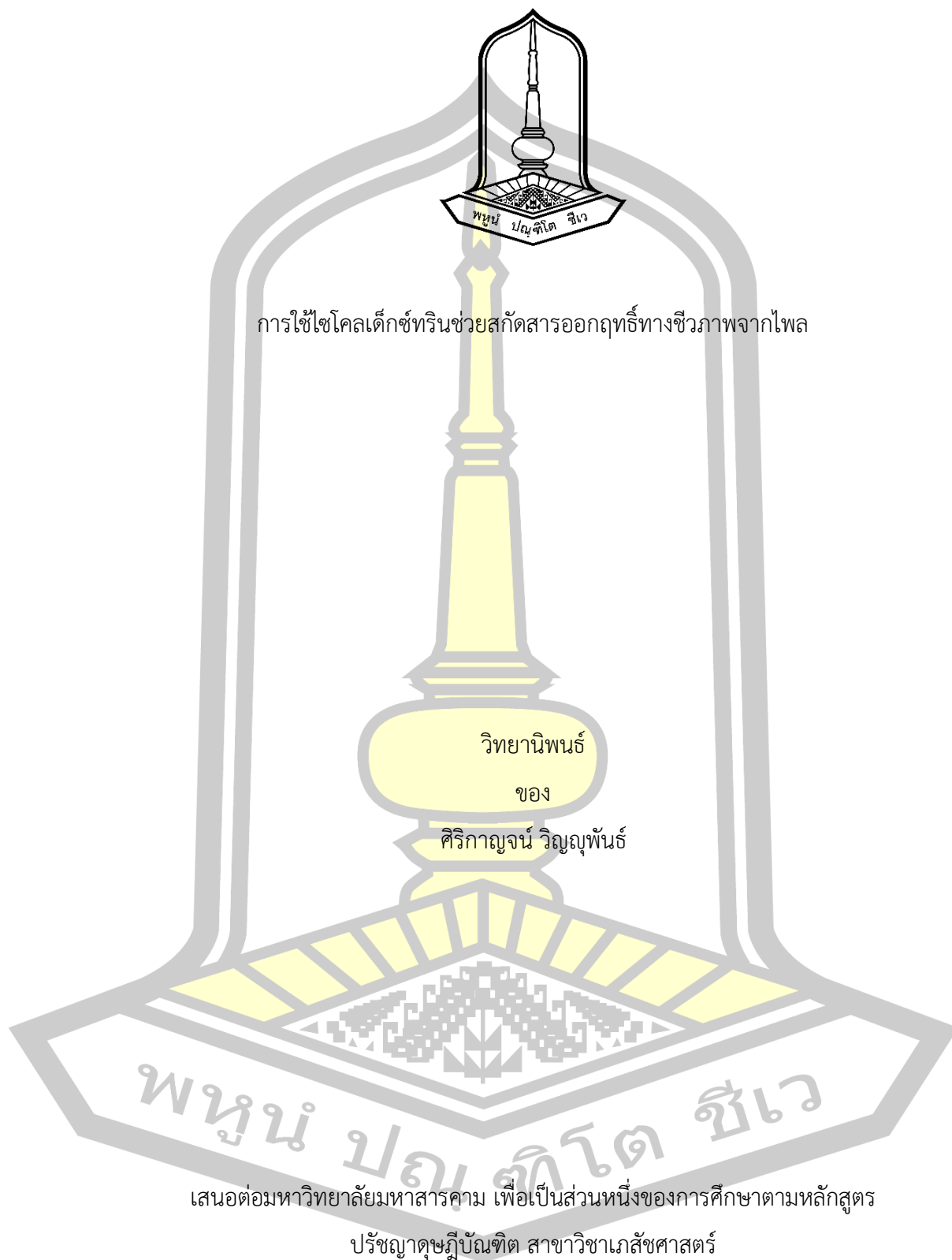
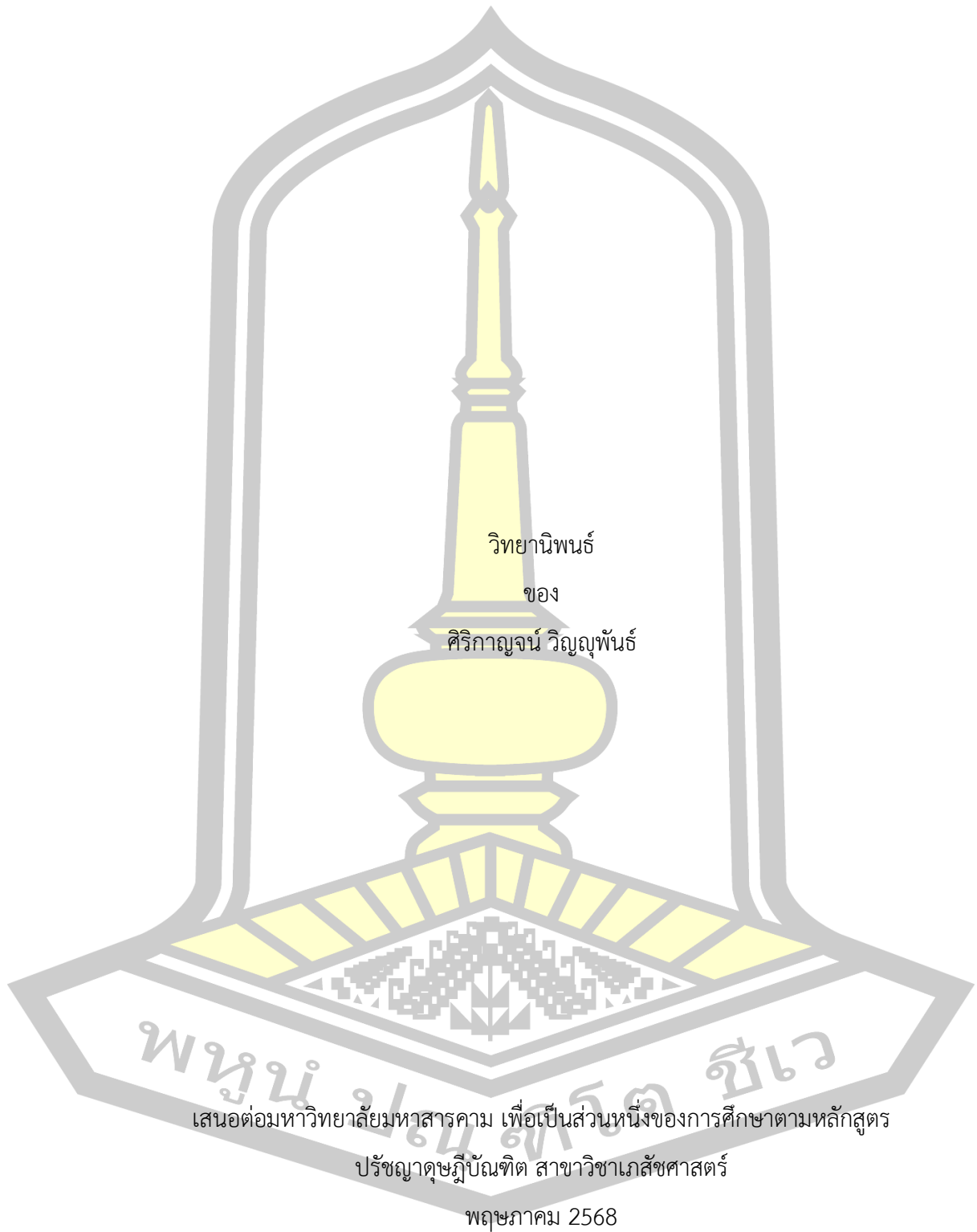




พฤษภาคม 2568

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การใช้ไฮโดรเด็คซ์ทรินช่วยสกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากไพล



เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาเภสัชศาสตร์

พฤษภาคม 2568

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Cyclodextrin-assisted Extraction of Bioactive Compounds from *Zingiber montanum*

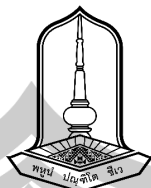
(J.Koenig) Link ex A.Dietr.

Sirikran Winyupan

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for Doctor of Philosophy (Pharmacy)

May 2025

Copyright of Mahasarakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของ นางสาวศิริกาญจน์ วิญญูพันธ์ แล้วเห็นสมควร
รับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาเภสัชศาสตร์ ของมหาวิทยาลัย
มหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(รศ. ดร.สุธาสินี ทัพพสารพงค์)

อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ. ดร.บรรลือ สังกัทอง)

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(รศ. ดร.ศุภิยา เมฆจรัสกุล)

กรรมการ

(รศ. ดร.ประสพอร รินทอง)

กรรมการ

(ผศ. ดร.พรพรรณ เหล่าวิชระสุวรรณ)

กรรมการภายนอก

(รศ. ดร.เพลินทิพย์ ภูทองกิ่ง)

มหาวิทยาลัยขอนแก่นให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎี
บัณฑิต สาขาวิชาเภสัชศาสตร์ ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

(ผศ. ดร.รุจิลักษณ์ รัตตะธมย์)

คณบดีคณะเภสัชศาสตร์

(ผศ. ดร.พลเดช เขาวรัตน์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง	การใช้ไซโคลเด็กซ์ทรินช่วยสกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากไพล		
ผู้วิจัย	ศิริกาญจน์ วิญญูพันธ์		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บรรลือ สังข์ทอง		
	รองศาสตราจารย์ ดร.คัทลียา เมฆจรสกุล		
ปริญญา	ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต	สาขาวิชา เกษตรศาสตร์	
มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม	ปีที่พิมพ์ 2568	

บทคัดย่อ

การสกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากพืชสมุนไพรเป็นกระบวนการที่ต้องคำนึงถึงปัจจัยด้านประสิทธิภาพและความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินประสิทธิภาพของ ไซโคลเด็กซ์ทริน (Cyclodextrins) และสารช่วยสกัดในการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดสารออกฤทธิ์จาก เหง้าไพล (*Zingiber montanum*) โดยใช้แนวทาง Cyclodextrin-assisted Extraction (CAE) ซึ่งเป็นเทคนิคที่สามารถลดการใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ งานวิจัยแบ่งออกเป็น สองขั้นตอนหลัก ได้แก่ (1) การคัดเลือกปัจจัยที่มีผลต่อการสกัด (Screening Study) โดยใช้ Molecular Docking เพื่อศึกษาปฏิสัมพันธ์เชิงโครงสร้างของไซโคลเด็กซ์ทรินกับสารสำคัญในไพล และคัดเลือกไซโคลเด็กซ์ทรินที่เหมาะสม พบว่า Hydroxypropyl-Beta-Cyclodextrin (HPBCD) มีศักยภาพสูงสุดในการเกิด Inclusion Complex กับสารออกฤทธิ์ จากนั้นทำการศึกษาเชิงทดลองโดยใช้ D-optimal Design เพื่อตรวจสอบปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการสกัด (2) การเพิ่มประสิทธิภาพการสกัด (Optimization Study) โดยใช้ Central Composite Design (CCD) เพื่อระบุสภาวะที่เหมาะสมของการสกัด ผลการศึกษาพบว่า การใช้ HPBCD ร่วมกับสารช่วยสกัด ได้แก่ เอทานอลและ Tween 80 ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัดสารออกฤทธิ์ ได้แก่ (*E*)-4-(3',4'-dimethoxyphenyl)but-3-en-2-ol และ (*E*)-1-(3',4'-dimethoxyphenyl) butadiene (กลุ่ม Phenylbutanoids) และ Curcuminoid content เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วย HPLC นอกจากนี้ ยังพบว่าการสกัดภายใต้สภาวะที่เหมาะสมให้ผลฤทธิ์ด้านอนุมูลอิสระที่ดีขึ้น โดยพิจารณาจากค่าที่วัดได้จาก DPPH, ABTS และ FRAP assays เมื่อเปรียบเทียบกับ การสกัดแบบหมักด้วยเมทานอล (Maceration using methanol) พบว่าปริมาณสารออกฤทธิ์บางชนิดที่ได้จาก CAE อาจมีค่าต่ำกว่าเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม เมื่อเทียบกับ การสกัด

แบบทอดน้ำมัน พบว่า CAE ให้ผลที่ดีกว่าในทุกกรณี มีความปลอดภัยในการนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางและเภสัชภัณฑ์ ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่า HPBCD ร่วมกับเอทานอลและ Tween 80 เป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมในการสกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากเหง้าไพล สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมยา เครื่องสำอาง และผลิตภัณฑ์เสริมอาหาร เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์จากสมุนไพรที่มีคุณภาพสูงและสอดคล้องกับแนวคิด Green Extraction คำสำคัญ: โซโคลเด็กซ์ทรีน, ไพล, การสกัดสารออกฤทธิ์, การต้านอนุมูลอิสระ, การสกัดสีเขียว



TITLE Cyclodextrin-assisted Extraction of Bioactive Compounds from
Zingiber montanum (J.Koenig) Link ex A.Dietr.

AUTHOR Sirikran Winyupan

ADVISORS Assistant Professor Bunleu Sungthong, Dr.rer.nat.
Associate Professor Catheleeya Mekjaruskul, Ph.D.

DEGREE Doctor of Philosophy **MAJOR** Pharmacy

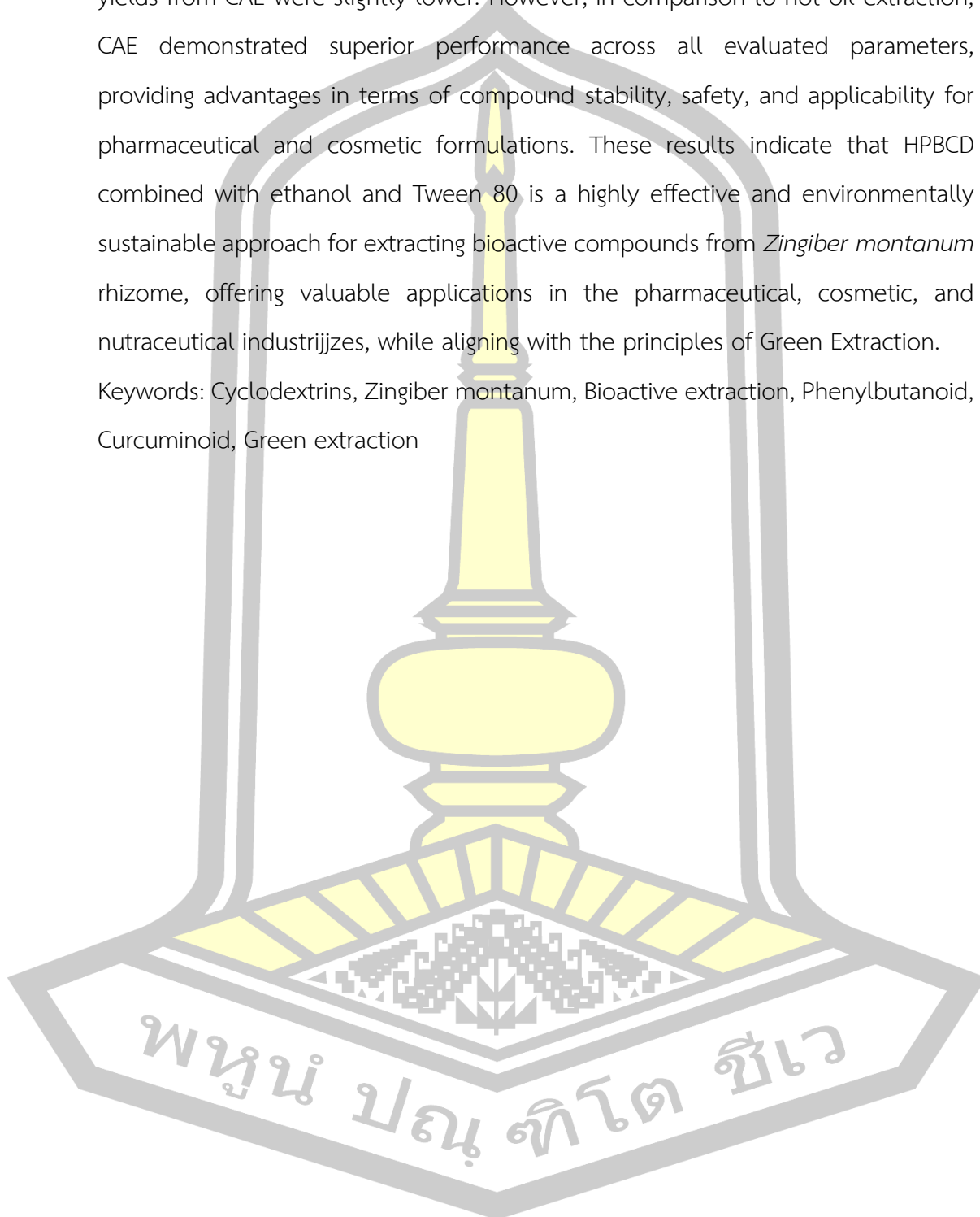
UNIVERSITY Mahasarakham University **YEAR** 2025

ABSTRACT

The extraction of bioactive compounds from medicinal plants must consider both efficiency and environmental sustainability. This study aims to evaluate the effectiveness of Cyclodextrins (CDs) and extraction enhancers in improving the extraction process of bioactive compounds from *Zingiber montanum* (J.Koenig) Link ex A.Dietr., employing the Cyclodextrin-assisted Extraction (CAE) technique, which reduces the use of organic solvents and enhances the stability of key phytochemicals. The study was conducted in two main phases: (1) Screening Study, utilizing Molecular Docking to analyze the structural interactions between Cyclodextrins and key phytochemicals, identifying Hydroxypropyl-Beta-Cyclodextrin (HPBCD) as the most suitable candidate for inclusion complex formation. This was followed by D-optimal Design, which evaluated critical extraction parameters. (2) Optimization Study, performed using Central Composite Design (CCD) to determine the optimal extraction conditions. The findings revealed that HPBCD combined with ethanol and Tween 80 significantly improved the extraction efficiency of (*E*)-4-(3',4'-dimethoxyphenyl)but-3-en-2-ol and (*E*)-1-(3',4'-dimethoxyphenyl)butadiene (Phenylbutanoids) and Curcuminoid content, as analyzed by HPLC. Additionally, the optimized extraction conditions yielded higher antioxidant activity, assessed using DPPH, ABTS, and FRAP

assays. When compared to maceration using methanol, some bioactive compound yields from CAE were slightly lower. However, in comparison to hot oil extraction, CAE demonstrated superior performance across all evaluated parameters, providing advantages in terms of compound stability, safety, and applicability for pharmaceutical and cosmetic formulations. These results indicate that HPBCD combined with ethanol and Tween 80 is a highly effective and environmentally sustainable approach for extracting bioactive compounds from *Zingiber montanum* rhizome, offering valuable applications in the pharmaceutical, cosmetic, and nutraceutical industries, while aligning with the principles of Green Extraction.

Keywords: Cyclodextrins, *Zingiber montanum*, Bioactive extraction, Phenylbutanoid, Curcuminoid, Green extraction



กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยการสนับสนุนจากหลายฝ่าย ข้าพเจ้าขอแสดงความขอบคุณอย่างจริงใจต่อ โครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก (คปก.) รุ่นที่ 22 สำหรับทุนสนับสนุน การศึกษาและการวิจัย ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยให้ข้าพเจ้าสามารถดำเนินโครงการวิจัยนี้จนเสร็จ สมบูรณ์ การได้รับทุนสนับสนุนนี้ไม่เพียงแต่ช่วยให้ข้าพเจ้าสามารถเข้าถึงทรัพยากรที่จำเป็น สำหรับการศึกษาค้นคว้าและการทดลอง แต่ยังเป็นแรงผลักดันให้ข้าพเจ้ามุ่งมั่นสร้างองค์ความรู้ ใหม่ที่มีประโยชน์ต่อแวดวงวิทยาศาสตร์และเภสัชศาสตร์

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บรรลือ สังข์ทอง อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ที่ ได้ให้การสนับสนุนด้านวิชาการและแนวทางการทำวิจัย รวมถึงโอกาสในการดำเนินงานวิจัยใน สาขานี้ ข้าพเจ้าขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภลักษณ์ เมฆจารุสกล อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ได้ ให้คำแนะนำบางประการเกี่ยวกับแนวทางทางวิชาการ ซึ่งข้าพเจ้าขอน้อมรับด้วยความเคารพ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน สำหรับข้อเสนอแนะและ ข้อวิจารณ์ที่เป็นประโยชน์ต่อการปรับปรุงและพัฒนางานวิจัยให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ความคิดเห็นจาก คณะกรรมการมีบทบาทสำคัญในการทำให้งานวิจัยนี้มีความน่าเชื่อถือและครบถ้วนมากขึ้น

ข้าพเจ้าขอขอบคุณ คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม และหน่วยงานที่ เกี่ยวข้อง ที่ให้การสนับสนุนด้านสถานที่ปฏิบัติการ เครื่องมือ และอุปกรณ์ทางวิทยาศาสตร์ ซึ่งเป็น ส่วนสำคัญของกระบวนการทดลอง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง พท.ป.ชินพัฒน์ เจริญรัมย์ ที่ให้คำแนะนำใน การใช้และการปรับปรุงวิธีการวิเคราะห์ด้วย HPLC ซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อความแม่นยำและความ น่าเชื่อถือของผลการทดลองในงานวิจัยนี้

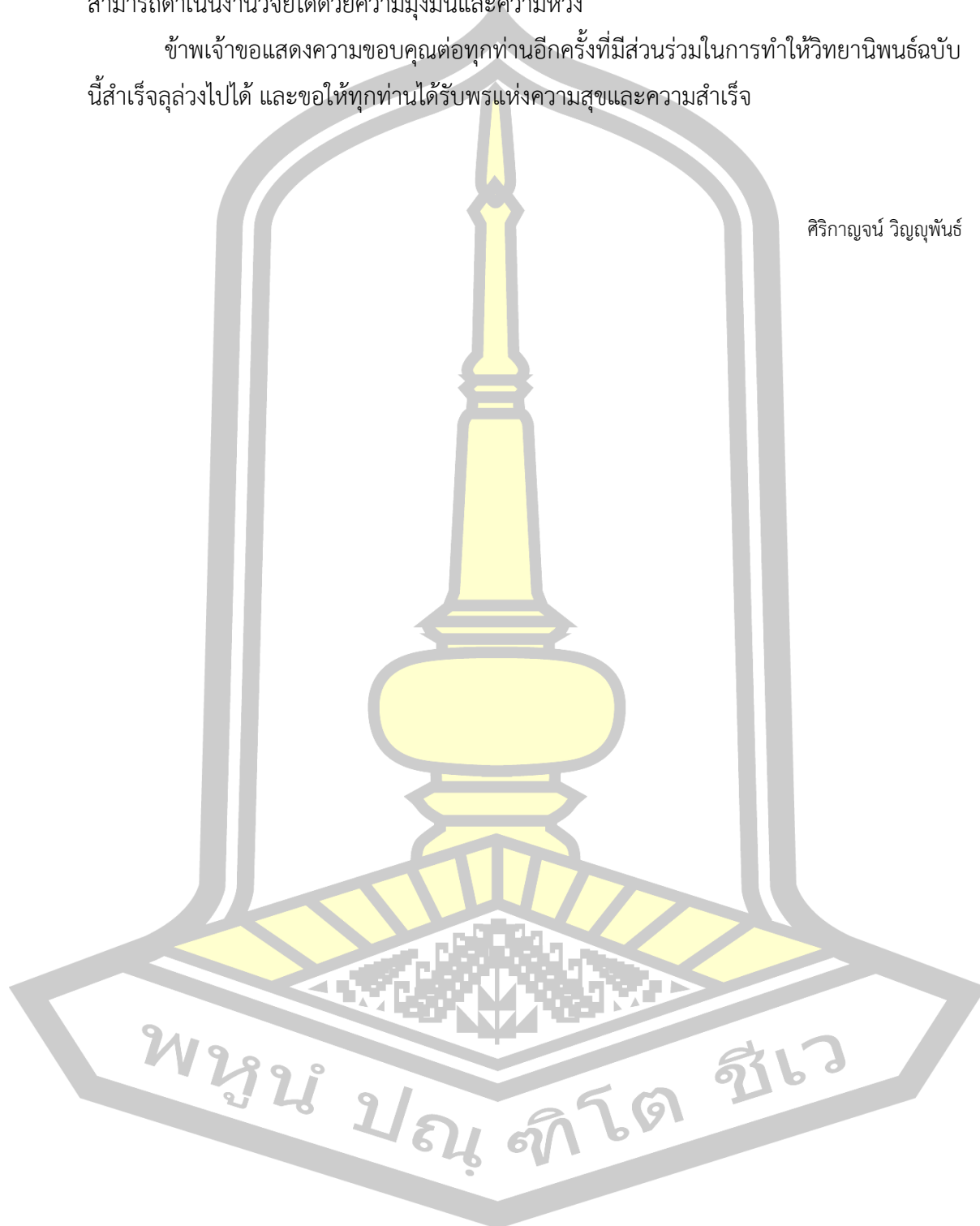
ข้าพเจ้าขอขอบคุณ ครอบครัวที่รัก คุณพ่อ คุณแม่ และพี่ชาย ที่คอยสนับสนุนข้าพเจ้าใน ทุกด้านมาโดยตลอด ทั้งกำลังใจ การดูแลเอาใจใส่ และความเข้าใจอันไม่มีที่สิ้นสุด ครอบครัวคือ พลังสำคัญที่ช่วยให้ข้าพเจ้ามีกำลังใจและความมุ่งมั่นในการดำเนินการวิจัยจนสำเร็จ ข้าพเจ้า ขอขอบคุณ เพื่อนร่วมรุ่นและเพื่อนสนิททุกคน ที่ให้การสนับสนุน ช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจเสมอ มา โดยเฉพาะในช่วงเวลาที่ยากลำบาก การได้รับแรงสนับสนุนจากเพื่อน ๆ ทำให้ข้าพเจ้ามีความ เข้มแข็งและก้าวผ่านอุปสรรคต่าง ๆ มาได้

สุดท้าย แม้ว่าจะไม่ได้เกี่ยวข้องโดยตรงกับกระบวนการวิจัย ข้าพเจ้าขอขอบคุณ หวังอ้อป้อ เขียวจ้าน และถ่านเจียนซื่อ นักแสดงที่ข้าพเจ้าชื่นชอบ ซึ่งรอยยิ้มและผลงานของพวกเขาเป็นสิ่งที่ ช่วยให้ข้าพเจ้าผ่อนคลายจากความเครียด และมีกำลังใจในการทำงานต่อไป ในช่วงเวลาที่

เครื่องเครียดและเหนื่อยล้า การได้รับแรงบันดาลใจจากบุคคลที่เราชื่นชมเป็นสิ่งที่ช่วยให้ข้าพเจ้าสามารถดำเนินงานวิจัยได้ด้วยความมุ่งมั่นและความหวัง

ข้าพเจ้าขอแสดงความขอบคุณต่อทุกท่านอีกครั้งที่มีส่วนร่วมในการทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ และขอให้ทุกท่านได้รับพรแห่งความสุขและความสำเร็จ

ศิริกาญจน์ วิญญูพันธ์



สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ฉ
กิตติกรรมประกาศ	ช
สารบัญ	ญ
สารบัญตาราง.....	ณ
สารบัญรูปภาพ.....	ด
บทที่ 1 บทนำ.....	26
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	26
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	27
1.3 สมมติฐานของงานวิจัย.....	27
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	27
1.5 กรอบแนวคิด	28
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	29
1.7 นิยามศัพท์เฉพาะ.....	29
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	30
2.1 ข้อมูลทั่วไปและลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของไผ่	30
2.1.1 มาตรฐานลักษณะทางกายภาพและเคมีที่เหมาะสมของเหง้าไผ่.....	32
2.1.2 องค์ประกอบทางเคมีและสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในเหง้าไผ่	33

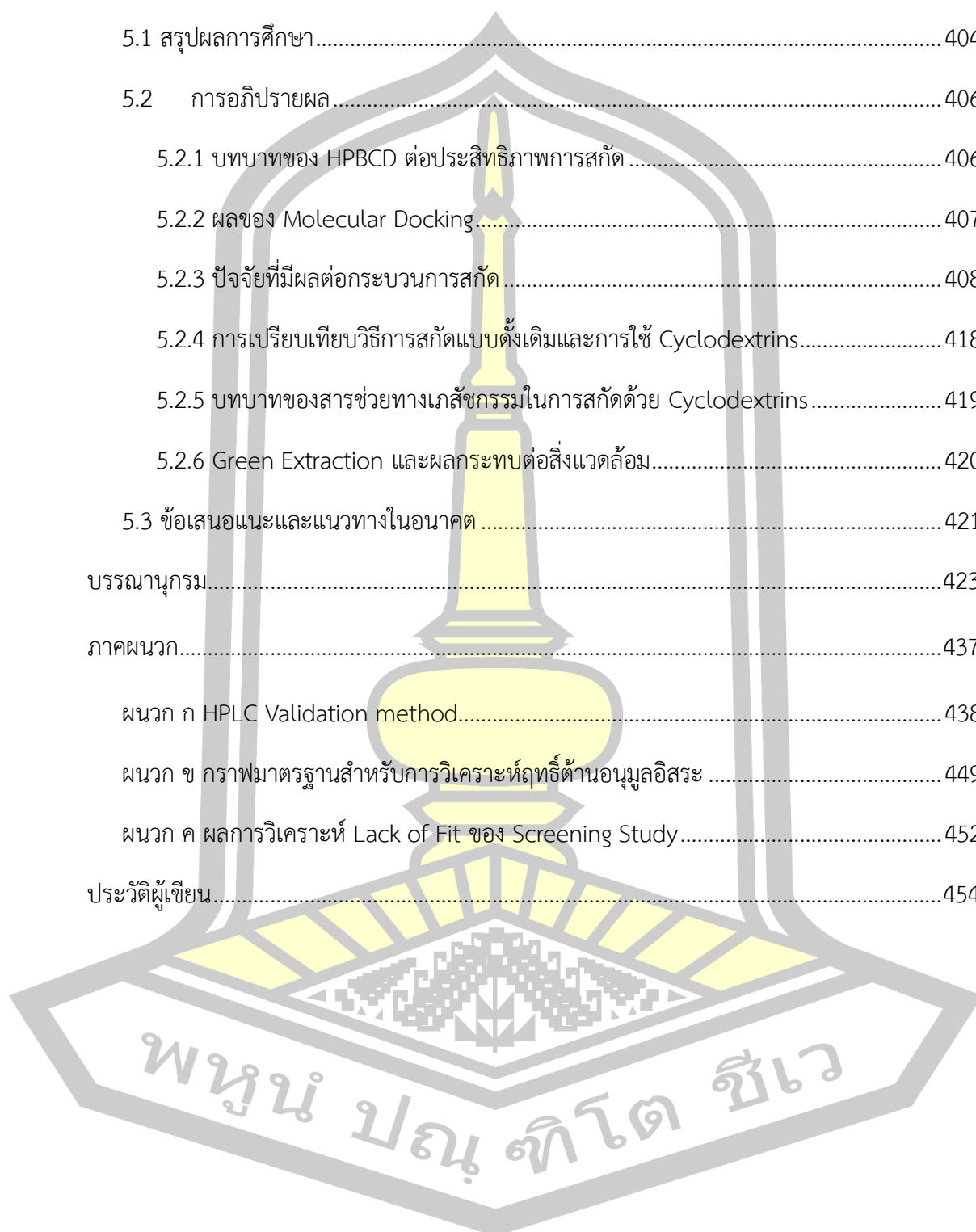
2.1.3	ฤทธิ์ทางเภสัชวิทยาของเหง้าไพล.....	36
2.1.4	การศึกษาด้านความปลอดภัยและพิษวิทยาของไพล	38
2.1.5	การใช้ไพลในทางแพทย์แผนไทยและการแพทย์ทางเลือก	39
2.1.6	การใช้ประโยชน์ของไพลในเชิงพาณิชย์และการแพทย์.....	40
2.1.7	วิธีการสกัดและควบคุมคุณภาพสารสกัดจากไพล.....	41
2.2	ภาพรวมของวิธีการสกัดที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม	43
2.2.1	เทคโนโลยีการสกัดที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม.....	43
2.2.2	ตัวทำละลายที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม	44
2.3	ไซโคลเด็กซ์ทริน (Cyclodextrins).....	46
2.3.1	โครงสร้างของไซโคลเด็กซ์ทริน	47
2.3.2	สมบัติทางกายภาพและเคมีของไซโคลเด็กซ์ทรินและอนุพันธ์ (Cyclodextrins and Their Derivatives)	47
2.3.3	ความสามารถในการก่อโครงสร้างร่วม (Inclusion Complex).....	48
2.3.4	การศึกษาด้านความปลอดภัยและความเป็นพิษของไซโคลเด็กซ์ทริน	49
2.4	การสกัดโดยใช้ไซโคลเด็กซ์ทรินช่วย (Cyclodextrin-assisted Extraction).....	50
2.5	การใช้ Molecular Docking ในการวิเคราะห์การจับตัวของสารออกฤทธิ์	50
2.5.1	หลักการพื้นฐานของ Molecular Docking	51
2.5.2	กระบวนการ Molecular Docking.....	52
2.5.3	การใช้ AutoDock Vina ในการทำ Molecular Docking.....	52
2.6	การออกแบบการทดลองแบบลำดับขั้น (Sequential Experimental Design).....	54
2.6.1	ความสำคัญของ Sequential Experimental Design.....	54
2.6.2	Screening Study.....	54
2.6.3	Optimization Study หรือ Response Surface Methodology (RSM)	56
2.7	สารช่วยทางเภสัชกรรมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัดโดยใช้ไซโคลเด็กซ์ทริน.....	57

2.7.1 PEG 400 (Polyethylene Glycol 400)	58
2.7.2 กลีเซอริน (Glycerin)	59
2.7.3 โพรพิลีนไกลคอล (Propylene Glycol).....	59
2.7.4 ซอร์บิทอล (Sorbitol)	59
2.7.5 Tween 20 และ Tween 80 (Polysorbates 20 และ 80).....	59
2.8 บทบาทของสารเติมแต่ง	61
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	66
3.1 สารเคมีและวัสดุที่ใช้ในการวิจัย	66
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ	67
3.3 การเตรียมตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา.....	68
3.4 การศึกษา Molecular Docking.....	68
3.4.1 การเตรียมโครงสร้างของ Cyclodextrins.....	68
3.4.2 การเตรียมโครงสร้างของสารสำคัญจากเหง้าไพล	71
3.4.3 การตั้งค่า Grid Box และการเตรียมไฟล์สำหรับ AutoDock Vina	72
3.4.4 การดำเนินการ Molecular Docking.....	74
3.5 การออกแบบการทดลอง (Experimental Design).....	74
3.5.1 การคัดกรองปัจจัย (Screening Study).....	75
3.5.2 ขั้นตอนการเพิ่มประสิทธิภาพ (Optimization Study).....	77
3.5.3 ขั้นตอนการดำเนินการสกัด.....	85
3.5.4 การตรวจสอบความถูกต้องของผลการทดลอง (Verification of Experimental Results)	87
3.6 การวิเคราะห์ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากเหง้าไพลด้วยวิธีเทคนิคโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (High Performance Liquid Chromatography, HPLC)	88
3.6.1 วิเคราะห์ปริมาณสารกลุ่ม Phenylbutanoids และ Curcuminoids.....	88

3.6.2 การเตรียมสารมาตรฐาน Compound D เพื่อสร้างกราฟสารมาตรฐาน	90
3.6.3 การเตรียมสารมาตรฐาน DMPBD เพื่อสร้างกราฟสารมาตรฐาน.....	91
3.6.4 การเตรียมสารมาตรฐาน Curcuminoids เพื่อสร้างกราฟสารมาตรฐาน	92
3.7 การวิเคราะห์ฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดจากเหง้าไพล	92
3.7.1 การวิเคราะห์การต้านอนุมูลอิสระด้วย DPPH Assay.....	93
3.7.2 การวิเคราะห์การต้านอนุมูลอิสระด้วย ABTS Assay	94
3.7.3 การวิเคราะห์การต้านอนุมูลอิสระด้วย FRAP Assay	95
3.8 การวิเคราะห์ข้อมูล (Data Analysis).....	95
3.8.1 การวิเคราะห์ Molecular Docking	96
3.8.2 การตรวจสอบคุณภาพข้อมูล	96
3.8.3 การวิเคราะห์ในขั้นตอน Screening Study.....	97
3.8.4 การวิเคราะห์ในขั้นตอน Optimization Study.....	97
3.8.5 การเปรียบเทียบผลการสกัดในแผนต่างๆ กับวิธีการสกัดดั้งเดิม	98
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน.....	99
4.1 ผลการศึกษา Molecular docking.....	99
4.1.1 ผลการศึกษา Molecular Docking ระหว่างโครงสร้างของไซโคลเด็กซ์กับสารสำคัญ จากเหง้าไพล	99
4.1.2 ค่าพลังงานการจับตัว (Binding Affinity) ของ Cyclodextrins กับสารสำคัญจากเหง้า ไพล.....	101
4.1.3 การวิเคราะห์ภาพสามมิติของโครงสร้างการจับตัว	104
4.1.4 สรุปผลการวิเคราะห์ Molecular docking.....	129
4.2 ผลการศึกษาและค่าการวิเคราะห์ทางสถิติในขั้นตอนการทดลอง Screening study	131
4.2.1 ผลการศึกษาในขั้นตอน Screening study ด้วย D-optimal Design	131
4.2.2 การตรวจสอบโมเดล (Model Validation).....	135

4.2.3 การตรวจสอบประสิทธิภาพของโมเดล.....	148
4.2.4 บทสรุปผลการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการสกัดสารสำคัญจากเหง้าไพลด้วยวิธี Cyclodextrin-assisted Extraction.....	160
4.3 ผลการศึกษาในขั้นตอน Optimization Study ด้วย Central Composite Design.....	163
4.3.1 ผลการวิเคราะห์ Optimization study Plan 1.....	164
4.3.2 ผลการวิเคราะห์ Optimization study Plan 2.....	211
4.3.3 ผลการวิเคราะห์ Optimization study Plan 3.....	250
4.3.4 ผลการวิเคราะห์ Optimization study Plan 4.....	293
4.3.5 ผลการวิเคราะห์ Optimization study Plan 5.....	326
4.4 ผลการศึกษาวิธีการสกัดโดยใช้ Cyclodextrin และสารช่วยสกัดในน้ำ เปรียบเทียบกับการสกัดด้วยวิธีดั้งเดิม.....	380
4.4.1 การศึกษาวิธีการสกัดสารสำคัญจากเหง้าไพลโดยวัดที่ปริมาณ Compound D วิธีการสกัดใช้ไซโคลเด็กซ์ทรินร่วมกับสารช่วยเทียบกับวิธีการสกัดแบบดั้งเดิม.....	384
4.4.2 การศึกษาวิธีการสกัดสารสำคัญจากเหง้าไพลโดยวัดที่ปริมาณ DMPBD วิธีการสกัดใช้ไซโคลเด็กซ์ทรินร่วมกับสารช่วยเทียบกับวิธีการสกัดแบบดั้งเดิม	387
4.4.3 การศึกษาวิธีการสกัดสารสำคัญจากเหง้าไพลโดยวัดที่ปริมาณ Curcuminoid content วิธีการสกัดใช้ไซโคลเด็กซ์ทรินร่วมกับสารช่วยเทียบกับวิธีการสกัดแบบดั้งเดิม	390
4.4.4 การศึกษาวิธีการสกัดโดยใช้ไซโคลเด็กซ์ทรินและสารช่วยเพื่อทำการสกัดสารสำคัญจากเหง้าไพลโดยวัดฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH เทียบกับวิธีการสกัดแบบดั้งเดิม	393
4.4.5 การศึกษาวิธีการสกัดโดยใช้ไซโคลเด็กซ์ทรินและสารช่วยเพื่อทำการสกัดสารสำคัญจากเหง้าไพลโดยวัดฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี ABTS เทียบกับวิธีการสกัดแบบดั้งเดิม.....	396
4.4.6 การศึกษาวิธีการสกัดโดยใช้ไซโคลเด็กซ์ทรินและสารช่วยเพื่อทำการสกัดสารสำคัญจากเหง้าไพลโดยวัดฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี FRAP เทียบกับวิธีการสกัดแบบดั้งเดิม.....	399
4.4.7 บทสรุปการศึกษาการใช้ไซโคลเด็กซ์ทรินช่วยสกัดสารสำคัญจากเหง้าไพล การเปรียบเทียบกับวิธีการสกัดแบบดั้งเดิม	402

บทที่ 5 สรุปและอภิปรายผลการศึกษา.....	404
5.1 สรุปผลการศึกษา.....	404
5.2 อภิปรายผล.....	406
5.2.1 บทบาทของ HPBCD ต่อประสิทธิภาพการสกัด	406
5.2.2 ผลของ Molecular Docking.....	407
5.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการสกัด	408
5.2.4 การเปรียบเทียบวิธีการสกัดแบบดั้งเดิมและการใช้ Cyclodextrins.....	418
5.2.5 บทบาทของสารช่วยทางเภสัชกรรมในการสกัดด้วย Cyclodextrins.....	419
5.2.6 Green Extraction และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม.....	420
5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางในอนาคต	421
บรรณานุกรม.....	423
ภาคผนวก.....	437
ผนวก ก HPLC Validation method.....	438
ผนวก ข กราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ	449
ผนวก ค ผลการวิเคราะห์ Lack of Fit ของ Screening Study.....	452
ประวัติผู้เขียน.....	454



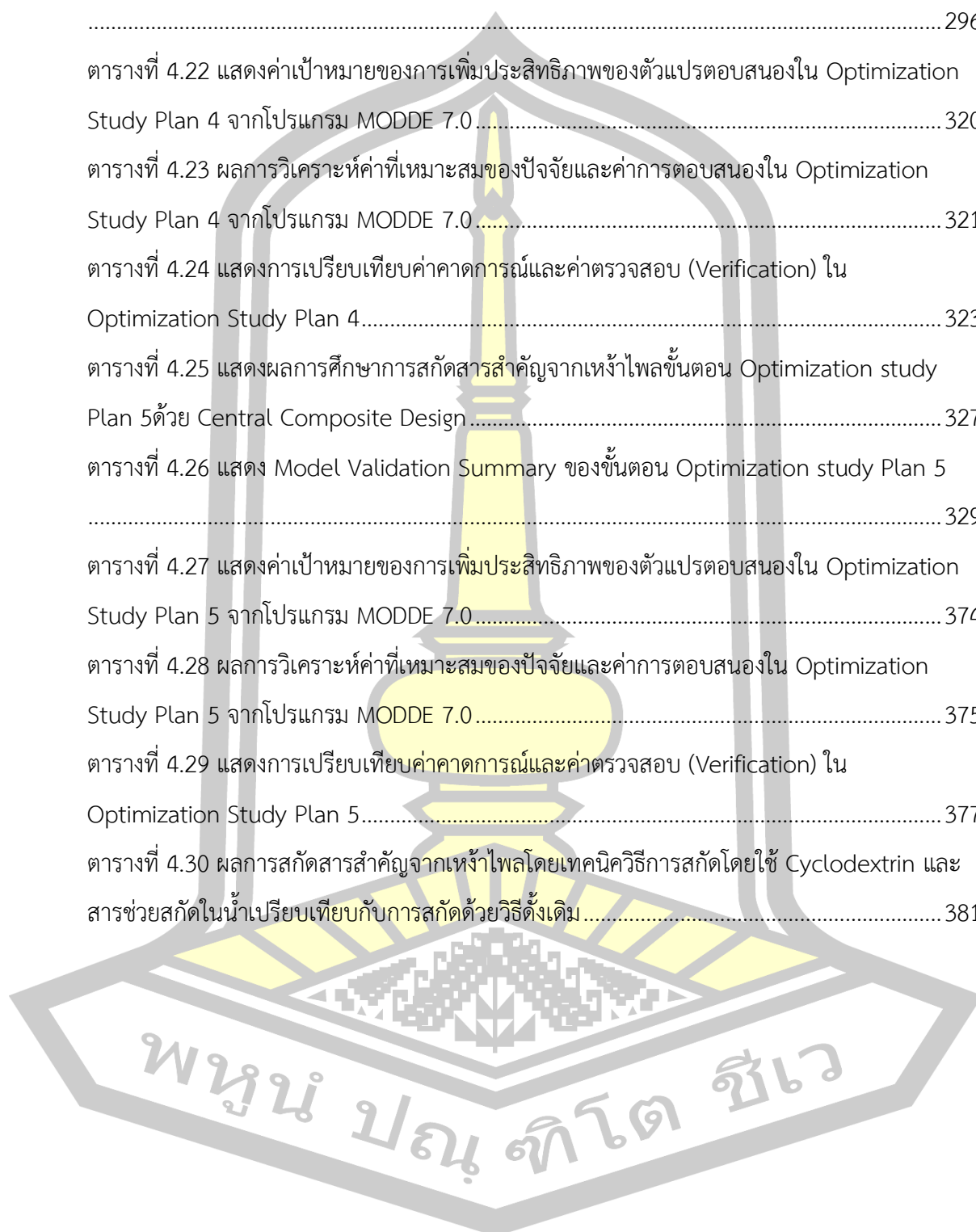
สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพและความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมของเทคนิคการสกัด ต่างๆ.....	46
ตารางที่ 2.2 ตารางคุณสมบัติของ Cyclodextrins และอนุพันธ์ในการช่วยในการสกัด	48
ตารางที่ 2.3 ความแตกต่าง Factorial/Fractional Factorial Design กับ D-Optimal Design....	55
ตารางที่ 2.4 สรุปความแตกต่างของ Central Composite Design (CCD) และ Box-Behnken Design.....	57
ตารางที่ 2.5 สรุปคุณสมบัติของสารช่วยทางเภสัชกรรม	60
ตารางที่ 3.1 แสดงรายละเอียดของการทดลองที่ออกแบบในขั้นตอน Screening Study โดยใช้ D- optimal Design เพื่อระบุปัจจัยที่สำคัญในการสกัดสารออกฤทธิ์	76
ตารางที่ 3.2 แสดงรายละเอียดวัตถุประสงค์ในการศึกษา Optimization Study Plan 1-5.....	78
ตารางที่ 3.3 แสดงรายละเอียดของการทดลองในขั้นตอน Optimization Study Plan 1	80
ตารางที่ 3.4 แสดงรายละเอียดของการทดลองในขั้นตอน Optimization Study Plan 2	81
ตารางที่ 3.5 แสดงรายละเอียดของการทดลองในขั้นตอน Optimization Study Plan 3	82
ตารางที่ 3.6 แสดงรายละเอียดของการทดลองในขั้นตอน Optimization Study Plan 4	83
ตารางที่ 3.7 แสดงรายละเอียดของการทดลองในขั้นตอน Optimization Study Plan 5	84
ตารางที่ 3.8 แสดงการเปลี่ยนแปลงสถานะของเฟสเคลื่อนที่โดยใช้วิธี HPLC	90
ตารางที่ 4.1 แสดงผลการศึกษา Molecular Docking ระหว่างโครงสร้างของไซโคลเด็กซ์กับ สารสำคัญจากเหง้าไพล	100
ตารางที่ 4.2 แสดงผลการศึกษาการสกัดสารสำคัญจากเหง้าไพลขั้นตอน Screening ด้วย D-.....	133
ตารางที่ 4.3 แสดง Model Validation Summary	136
ตารางที่ 4.4 สรุปผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของค่าการตอบสนองทั้งหมด.....	149
ตารางที่ 4.5 แสดงผลการศึกษาการสกัดสารสำคัญจากเหง้าไพลขั้นตอน Optimization study Plan 1	166
ตารางที่ 4.6 Model Validation Summary ของขั้นตอน Optimization study Plan 1	168

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าเป้าหมายของการเพิ่มประสิทธิภาพของตัวแปรตอบสนองใน Optimization Study Plan 5 จากโปรแกรม MODDE 7.0.....	205
ตารางที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์ค่าที่เหมาะสมของปัจจัยและการตอบสนองใน Optimization Study Plan 1 จากโปรแกรม MODDE 7.0.....	206
ตารางที่ 4.9 แสดงการเปรียบเทียบค่าคาดการณ์และค่าตรวจสอบ (Verification) ใน Optimization Study Plan 1	207
ตารางที่ 4.10 แสดงผลการศึกษากการสกัดสารสำคัญจากเหง้าโพลีชันตอน Optimization study Plan 2.....	212
ตารางที่ 4.11 แสดง Model Validation Summary ของขั้นตอน Optimization study Plan 2	214
ตารางที่ 4.12 แสดงค่าเป้าหมายของการเพิ่มประสิทธิภาพของตัวแปรตอบสนองใน Optimization Study Plan 5 จากโปรแกรม MODDE 7.0.....	243
ตารางที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์ค่าที่เหมาะสมของปัจจัยและการตอบสนองใน Optimization Study Plan 2 จากโปรแกรม MODDE 7.0.....	244
ตารางที่ 4.14 แสดงการเปรียบเทียบค่าคาดการณ์และค่าตรวจสอบ (Verification) ใน Optimization Study Plan 2.....	246
ตารางที่ 4.15 แสดงผลการศึกษากการสกัดสารสำคัญจากเหง้าโพลีชันตอน Optimization study Plan 3 ด้วย Central Composite Design.....	251
ตารางที่ 4.16 แสดง Model Validation Summary ของขั้นตอน Optimization study Plan 3	253
ตารางที่ 4.17 แสดงค่าเป้าหมายของการเพิ่มประสิทธิภาพของตัวแปรตอบสนองใน Optimization Study Plan 3 จากโปรแกรม MODDE 7.0.....	287
ตารางที่ 4.18 ผลการวิเคราะห์ค่าที่เหมาะสมของปัจจัยและการตอบสนองใน Optimization Study Plan 3 จากโปรแกรม MODDE 7.0.....	288
ตารางที่ 4.19 แสดงการเปรียบเทียบค่าคาดการณ์และค่าตรวจสอบ (Verification) ใน Optimization Study Plan 3.....	290
ตารางที่ 4.20 แสดงผลการศึกษากการสกัดสารสำคัญจากเหง้าโพลีชันตอน Optimization study Plan 4 ด้วย Central Composite Design.....	294

ตารางที่ 4.21 แสดง Model Validation Summary ของขั้นตอน Optimization study Plan 4	296
ตารางที่ 4.22 แสดงค่าเป้าหมายของการเพิ่มประสิทธิภาพของตัวแปรตอบสนองใน Optimization Study Plan 4 จากโปรแกรม MODDE 7.0	320
ตารางที่ 4.23 ผลการวิเคราะห์ค่าที่เหมาะสมของปัจจัยและค่าการตอบสนองใน Optimization Study Plan 4 จากโปรแกรม MODDE 7.0	321
ตารางที่ 4.24 แสดงการเปรียบเทียบค่าคาดการณ์และค่าตรวจสอบ (Verification) ใน Optimization Study Plan 4	323
ตารางที่ 4.25 แสดงผลการศึกษาการสกัดสารสำคัญจากเหง้าโพลขั้นตอน Optimization study Plan 5 ด้วย Central Composite Design	327
ตารางที่ 4.26 แสดง Model Validation Summary ของขั้นตอน Optimization study Plan 5	329
ตารางที่ 4.27 แสดงค่าเป้าหมายของการเพิ่มประสิทธิภาพของตัวแปรตอบสนองใน Optimization Study Plan 5 จากโปรแกรม MODDE 7.0	374
ตารางที่ 4.28 ผลการวิเคราะห์ค่าที่เหมาะสมของปัจจัยและค่าการตอบสนองใน Optimization Study Plan 5 จากโปรแกรม MODDE 7.0	375
ตารางที่ 4.29 แสดงการเปรียบเทียบค่าคาดการณ์และค่าตรวจสอบ (Verification) ใน Optimization Study Plan 5	377
ตารางที่ 4.30 ผลการสกัดสารสำคัญจากเหง้าโพลโดยเทคนิควิธีการสกัดโดยใช้ Cyclodextrin และสารช่วยสกัดในน้ำเปรียบเทียบกับวิธีการสกัดด้วยวิธีดั้งเดิม	381



สารบัญรูปภาพ

หน้า

ภาพที่ 1.1 กรอบแนวคิดการวิจัย	28
ภาพที่ 2.1 รูปลักษณะของเครื่องยา	30
ภาพที่ 2.2 ภาพลายเส้นไพล (Zingiber montanum (Koenig) Link ex Dietr.)	31
ภาพที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของสารกลุ่ม phenylbutanoid ที่พบส่วนใหญ่ในเหง้าไพล.....	34
ภาพที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของสารกลุ่ม Curcuminoids ที่พบส่วนใหญ่ในเหง้าไพล.....	35
ภาพที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของสารกลุ่ม Terpenoids ที่พบส่วนใหญ่ในเหง้าไพล	36
ภาพที่ 2.6 โครงสร้างของหน่วยย่อยกลูโคสไพราโนสในไซโคลเด็กซ์ทรินขนาดและโครงสร้างของโพรงภายใน (Kali, G et al., 2024)	47
ภาพที่ 2.7 แผนภาพเชิงแนวคิดของทฤษฎีล็อกและกุญแจในกระบวนการ Docking ระหว่าง ligand และ receptor.....	51
ภาพที่ 3.1 โครงสร้างของ Cyclodextrins ในรูปแบบ a; 2D structures และ b; 3D structures. 70	
ภาพที่ 3.2 โครงสร้างสารสำคัญจากเหง้าไพล 12 ชนิด ในรูปแบบ a; 2D structures และ b; 3D structures (PubChem, 2024).....	73
ภาพที่ 4.1 ผลการศึกษา Molecular docking ของ Alpha-Cyclodextrins ร่วมกับสารกลุ่ม Phenylbutanoids.....	106
ภาพที่ 4.2 ผลการศึกษา Molecular docking ของ Alpha-Cyclodextrins ร่วมกับสารกลุ่ม Curcuminoids.....	107
ภาพที่ 4.3 ผลการศึกษา Molecular docking ของ Alpha-Cyclodextrins ร่วมกับสารกลุ่ม Terpenoids	108
ภาพที่ 4.4 ผลการศึกษา Molecular docking ของ Beta-Cyclodextrins ร่วมกับสารกลุ่ม Phenylbutanoids.....	110
ภาพที่ 4.5 ผลการศึกษา Molecular docking ของ Beta-Cyclodextrins ร่วมกับสารกลุ่ม Curcuminoids.....	111
ภาพที่ 4.6 ผลการศึกษา Molecular docking ของ Beta-Cyclodextrins ร่วมกับสารกลุ่ม Terpenoids	112

ภาพที่ 4.7 ผลการศึกษา Molecular docking ของ Gamma-Cyclodextrins ร่วมกับสารกลุ่ม Phenylbutanoids.....	114
ภาพที่ 4.8 ผลการศึกษา Molecular docking ของ Gamma-Cyclodextrins ร่วมกับสารกลุ่ม Curcuminoids.....	115
ภาพที่ 4.9 ผลการศึกษา Molecular docking ของ Gamma-Cyclodextrins ร่วมกับสารกลุ่ม Terpenoids	116
ภาพที่ 4.10 ผลการศึกษา Molecular docking ของ Methyl-Beta-Cyclodextrins ร่วมกับสารกลุ่ม Phenylbutanoids.....	118
ภาพที่ 4.11 ผลการศึกษา Molecular docking ของ Methyl-Beta-Cyclodextrins ร่วมกับสารกลุ่ม Curcuminoids	119
ภาพที่ 4.12 ผลการศึกษา Molecular docking ของ Methyl-beta-Cyclodextrins ร่วมกับสารกลุ่ม Terpenoids.....	120
ภาพที่ 4.13 ผลการศึกษา Molecular docking ของ Sufobutylether-Beta-Cyclodextrin ร่วมกับสารกลุ่ม Phenylbutanoids.....	122
ภาพที่ 4.14 ผลการศึกษา Molecular docking Sufobutylether-Beta-Cyclodextrinร่วมกับสารกลุ่ม Curcuminoids	123
ภาพที่ 4.15 ผลการศึกษา Molecular docking ของ Sufobutylether-Beta-Cyclodextrin ร่วมกับสารกลุ่ม Terpenoids.....	124
ภาพที่ 4.16 ผลการศึกษา Molecular docking ของ Hydroxypropyl-Beta-Cyclodextrins ร่วมกับสารกลุ่ม Phenylbutanoids.....	126
ภาพที่ 4.17 ผลการศึกษา Molecular docking ของ Hydroxypropyl- Beta-Cyclodextrins ร่วมกับสารกลุ่ม Curcuminoids.....	127
ภาพที่ 4.18 ผลการศึกษา Molecular docking ของ Hydroxypropyl-Beta -beta-Cyclodextrins ร่วมกับสารกลุ่ม Terpenoids	128
ภาพที่ 4.19 โครมาโทแกรมของตัวอย่างสารสกัดจากเหง้าโพลีในขั้นตอน Screening study และสารมาตรฐานวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC.....	132
ภาพที่ 4.20 กราฟ Summary of Fit แสดงผลค่า R^2 และ Q^2 สำหรับแต่ละตัวแปร	135
ภาพที่ 4.21 กราฟ Lack of Fit แสดงถึงการประเมินค่าการทดสอบสำหรับแต่ละตัวแปร	137

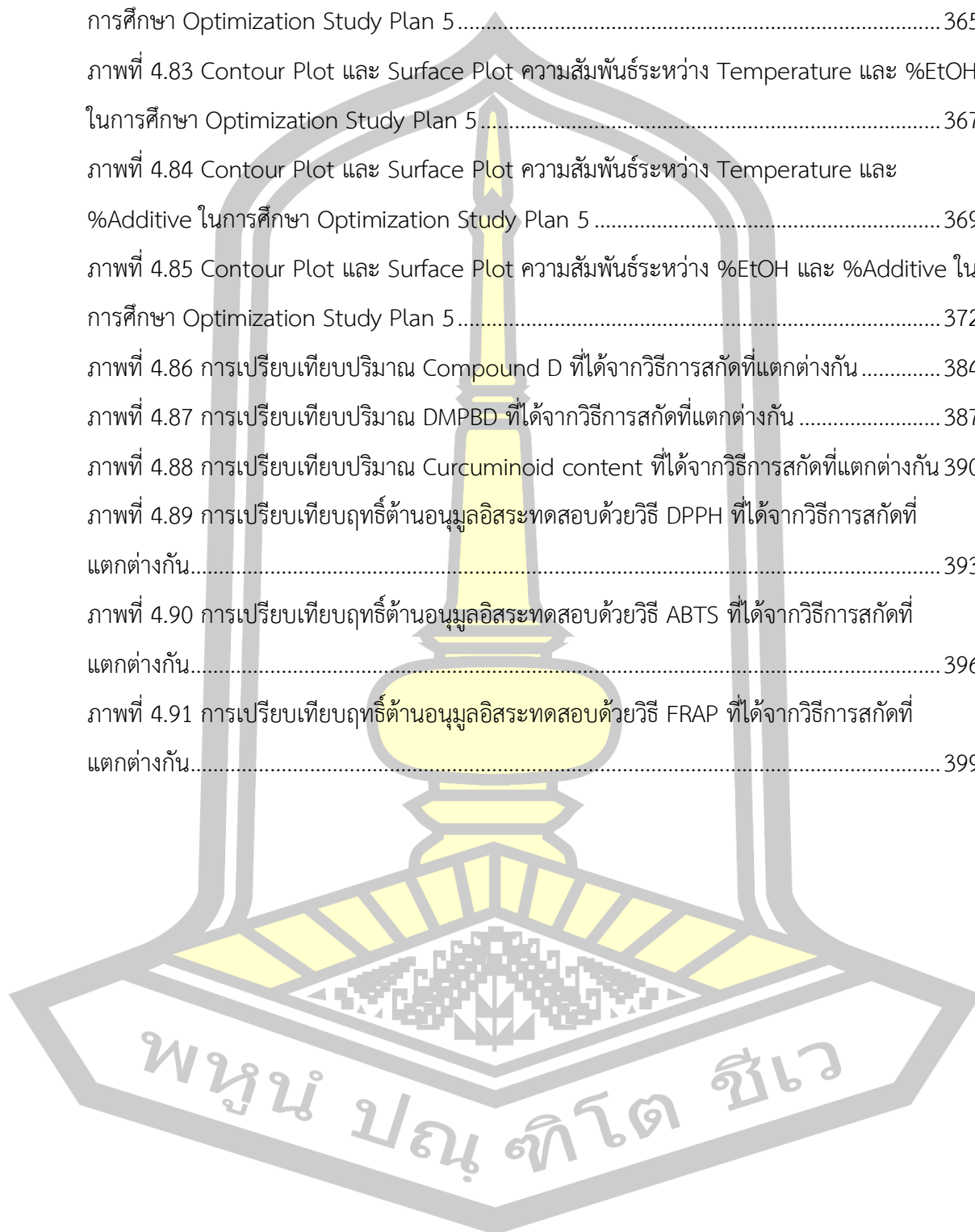
ภาพที่ 4.22 กราฟ N-Probability Plot ของ Standardized Residuals	140
ภาพที่ 4.23 กราฟ Residuals compared to Predicted Y Plot	142
ภาพที่ 4.24 กราฟ Residuals compared to Run Order Plot.....	144
ภาพที่ 4.25 กราฟ Residuals compared to Variable Plot แสดงการกระจายตัวแบบสุ่มของ Residuals ตามชนิดของ CD ยืนยันว่าโมเดลไม่มีปัญหาในการอธิบายความแปรปรวน	146
ภาพที่ 4.26 กราฟ ANOVA แสดงการกระจายของความแปรปรวน	150
ภาพที่ 4.27 กราฟค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficient) ของการตอบสนองของการศึกษา.....	152
ภาพที่ 4.28 กราฟค่าผลกระทบ (Effects Plot).....	155
ภาพที่ 4.29 กราฟ Distance to Model.....	157
ภาพที่ 4.30 กราฟความสำคัญของตัวแปร (Variable Importance Plot; VIP).....	159
ภาพที่ 4.31 โครมาโทแกรมของตัวอย่างสารสกัดจากเหง้าโพลในขั้นตอน Optimization study Plan 1 และสารมาตรฐานวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC	167
ภาพที่ 4.32 กราฟ Summary of Fit แสดงผลค่า R^2 และ Q^2 สำหรับแต่ละตัวแปรของ ขั้นตอน Optimization study Plan 1	169
ภาพที่ 4.33 ผลการวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยต่อค่าการตอบสนองใน Optimization Study Plan 1	170
ภาพที่ 4.34 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของปัจจัยที่มีผลต่อค่าการตอบสนอง ใน Optimization Study Plan 1.....	175
ภาพที่ 4.35 Contour Plot และ Surface Plot ความสัมพันธ์ระหว่าง Conc. HPBCD และ Time ในการศึกษา Optimization Study Plan 1	185
ภาพที่ 4.36 Contour Plot และ Surface Plot ความสัมพันธ์ระหว่าง Conc. HPBCD และ Power ในการศึกษา Optimization Study Plan 1	187
ภาพที่ 4.37 Contour Plot และ Surface Plot ความสัมพันธ์ระหว่าง Conc. HPBCD และ %EtOH ในการศึกษา Optimization Study Plan 1	189
ภาพที่ 4.38 Contour Plot และ Surface Plot ความสัมพันธ์ระหว่าง Conc. HPBCD และ %Additive ในการศึกษา Optimization Study Plan 1	191
ภาพที่ 4.39 Contour Plot และ Surface Plot ความสัมพันธ์ระหว่าง Time และ Power ใน การศึกษา Optimization Study Plan 1	193

ภาพที่ 4.40 Contour Plot และ Surface Plot ความสัมพันธ์ระหว่าง Time และ %EtOH ใน การศึกษา Optimization Study Plan 1	195
ภาพที่ 4.41 Contour Plot และ Surface Plot ความสัมพันธ์ระหว่าง Time และ %Additive ในการศึกษา Optimization Study Plan 1	197
ภาพที่ 4.42 Contour Plot และ Surface Plot ความสัมพันธ์ระหว่าง Power และ %EtOH ในการศึกษา Optimization Study Plan 1	199
ภาพที่ 4.43 Contour Plot และ Surface Plot ความสัมพันธ์ระหว่าง Power และ %Additive ใน การศึกษา Optimization Study Plan 1	201
ภาพที่ 4.44 Contour Plot และ Surface Plot ความสัมพันธ์ระหว่าง %EtOH และ %Additive ใน การศึกษา Optimization Study Plan 1	203
ภาพที่ 4.45 โคโรนาโทรแกรมของตัวอย่างสารสกัดจากเหง้าโพลในขั้นตอน Optimization study Plan 2 และสารมาตรฐานวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC	213
ภาพที่ 4.46 กราฟ Summary of Fit แสดงผลค่า R^2 และ Q^2 สำหรับแต่ละตัวแปรของ ขั้นตอน Optimization study Plan 2	215
ภาพที่ 4.47 ผลการวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยต่อค่าการตอบสนองใน Optimization Study Plan 2	216
ภาพที่ 4.48 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของปัจจัยที่มีผลต่อค่าการตอบสนองใน Optimization Study Plan 2	221
ภาพที่ 4.49 Contour Plot และ Surface Plot ความสัมพันธ์ระหว่าง Conc. HPBCD และ Time ในการศึกษา Optimization Study Plan 2	231
ภาพที่ 4.50 Contour Plot และ Surface Plot ความสัมพันธ์ระหว่าง Conc. HPBCD และ Power ในการศึกษา Optimization Study Plan 2	233
ภาพที่ 4.51 Contour Plot และ Surface Plot ความสัมพันธ์ระหว่าง Conc. HPBCD และ %EtOH ในการศึกษา Optimization Study Plan 2	235
ภาพที่ 4.52 Contour Plot และ Surface Plot ความสัมพันธ์ระหว่าง Time และ Power ใน การศึกษา Optimization Study Plan 2	237
ภาพที่ 4.53 Contour Plot และ Surface Plot ความสัมพันธ์ระหว่าง Time และ %EtOH ในการศึกษา Optimization Study Plan 2	239

ภาพที่ 4.54 Contour Plot และ Surface Plot ความสัมพันธ์ระหว่าง Power และ %EtOH ในการศึกษา Optimization Study Plan 2.....	241
ภาพที่ 4.55 โครมาโทแกรมของตัวอย่างสารสกัดจากเหง้าโพลในขั้นตอน Optimization study Plan 3 และสารมาตรฐานวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC.....	252
ภาพที่ 4.56 กราฟ Summary of Fit แสดงผลค่า R^2 และ Q^2 สำหรับแต่ละตัวแปรของ ขั้นตอน Optimization study Plan 3	254
ภาพที่ 4.57 ผลการวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยต่อค่าการตอบสนองใน Optimization Study Plan 3.....	255
ภาพที่ 4.58 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของปัจจัยที่มีผลต่อค่าการตอบสนองใน Optimization Study Plan 3	260
ภาพที่ 4.59 Contour Plot และ Surface Plot ความสัมพันธ์ระหว่าง Conc. HPBCD และ Time ในการศึกษา Optimization Study Plan 3.....	270
ภาพที่ 4.60 Contour Plot และ Surface Plot ความสัมพันธ์ระหว่าง Conc. HPBCD และ Power ในการศึกษา Optimization Study Plan 3.....	273
ภาพที่ 4.61 Contour Plot และ Surface Plot ความสัมพันธ์ระหว่าง Conc. HPBCD และ %Additive ในการศึกษา Optimization Study Plan 3	276
ภาพที่ 4.62 Contour Plot และ Surface Plot ความสัมพันธ์ระหว่าง Time และ Power ใน การศึกษา Optimization Study Plan 3.....	279
ภาพที่ 4.63 Contour Plot และ Surface Plot ความสัมพันธ์ระหว่าง Time และ %Additive ใน การศึกษา Optimization Study Plan 3.....	282
ภาพที่ 4.64 Contour Plot และ Surface Plot ความสัมพันธ์ระหว่าง Power และ %Additive ใน การศึกษา Optimization Study Plan 3.....	285
ภาพที่ 4.65 โครมาโทแกรมของตัวอย่างสารสกัดจากเหง้าโพลในขั้นตอน Optimization study Plan 4 และสารมาตรฐานวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC.....	295
ภาพที่ 4.66 กราฟ Summary of Fit แสดงผลค่า R^2 และ Q^2 สำหรับแต่ละตัวแปรของ ขั้นตอน Optimization study Plan 4	297
ภาพที่ 4.67 ผลการวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยต่อค่าการตอบสนองใน Optimization Study Plan 4	298

ภาพที่ 4.68 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของปัจจัยที่มีผลต่อค่าการตอบสนอง ใน Optimization Study Plan 4	303
ภาพที่ 4.69 Contour Plot และ Surface Plot ความสัมพันธ์ระหว่าง Conc. HPBCD และ Time ในการศึกษา Optimization Study Plan 4	314
ภาพที่ 4.70 Contour Plot และ Surface Plot ความสัมพันธ์ระหว่าง Conc. HPBCD และ Power ในการศึกษา Optimization Study Plan 4	316
ภาพที่ 4.71 Contour Plot และ Surface Plot ความสัมพันธ์ระหว่าง Time และ Power ใน การศึกษา Optimization Study Plan 2	318
ภาพที่ 4.72 โครมาโทแกรมของตัวอย่างสารสกัดจากเหง้าโพลในขั้นตอน Optimization study Plan 5 และสารมาตรฐานวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC	328
ภาพที่ 4.73 กราฟ Summary of Fit แสดงผลค่า R^2 และ Q^2 สำหรับแต่ละตัวแปรของ ขั้นตอน Optimization study Plan 5	330
ภาพที่ 4.74 ผลการวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยต่อค่าการตอบสนองใน Optimization Study Plan 5	331
ภาพที่ 4.75 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของปัจจัยที่มีผลต่อค่าการตอบสนอง ใน Optimization Study Plan 5	336
ภาพที่ 4.76 Contour Plot และ Surface Plot ความสัมพันธ์ระหว่าง Conc. HPBCD และ Time ในการศึกษา Optimization Study Plan 5	347
ภาพที่ 4.77 Contour Plot และ Surface Plot ความสัมพันธ์ระหว่าง Conc. HPBCD และ Temperature ในการศึกษา Optimization Study Plan 5	350
ภาพที่ 4.78 Contour Plot และ Surface Plot ความสัมพันธ์ระหว่าง Conc. HPBCD และ %EtOH ในการศึกษา Optimization Study Plan 5	353
ภาพที่ 4.79 Contour Plot และ Surface Plot ความสัมพันธ์ระหว่าง Conc. HPBCD และ %Additive ในการศึกษา Optimization Study Plan 5	356
ภาพที่ 4.80 Contour Plot และ Surface Plot ความสัมพันธ์ระหว่าง Time และ Temperature ในการศึกษา Optimization Study Plan 5	359
ภาพที่ 4.81 Contour Plot และ Surface Plot ความสัมพันธ์ระหว่าง Time และ %EtOH ใน การศึกษา Optimization Study Plan 5	362

ภาพที่ 4.82 Contour Plot และ Surface Plot ความสัมพันธ์ระหว่าง Time และ %Additive ในการศึกษา Optimization Study Plan 5	365
ภาพที่ 4.83 Contour Plot และ Surface Plot ความสัมพันธ์ระหว่าง Temperature และ %EtOH ในการศึกษา Optimization Study Plan 5	367
ภาพที่ 4.84 Contour Plot และ Surface Plot ความสัมพันธ์ระหว่าง Temperature และ %Additive ในการศึกษา Optimization Study Plan 5	369
ภาพที่ 4.85 Contour Plot และ Surface Plot ความสัมพันธ์ระหว่าง %EtOH และ %Additive ในการศึกษา Optimization Study Plan 5	372
ภาพที่ 4.86 การเปรียบเทียบปริมาณ Compound D ที่ได้จากวิธีการสกัดที่แตกต่างกัน	384
ภาพที่ 4.87 การเปรียบเทียบปริมาณ DMPBD ที่ได้จากวิธีการสกัดที่แตกต่างกัน	387
ภาพที่ 4.88 การเปรียบเทียบปริมาณ Curcuminoid content ที่ได้จากวิธีการสกัดที่แตกต่างกัน	390
ภาพที่ 4.89 การเปรียบเทียบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระทดสอบด้วยวิธี DPPH ที่ได้จากวิธีการสกัดที่แตกต่างกัน	393
ภาพที่ 4.90 การเปรียบเทียบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระทดสอบด้วยวิธี ABTS ที่ได้จากวิธีการสกัดที่แตกต่างกัน	396
ภาพที่ 4.91 การเปรียบเทียบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระทดสอบด้วยวิธี FRAP ที่ได้จากวิธีการสกัดที่แตกต่างกัน	399



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ไพล (*Zingiber montanum* (J.Koenig) Link ex A.Dietr) เป็นสมุนไพรที่มีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมสมุนไพรของไทยและได้รับการส่งเสริมให้เป็นพืชเศรษฐกิจที่มีศักยภาพสูง ด้วยคุณสมบัติทางเภสัชวิทยาหลากหลาย เช่นฤทธิ์ด้านการอักเสบ บรรเทาอาการปวด นอกจากนี้ สารสำคัญที่พบในไพล เช่น กลุ่ม Phenylbutanoids (Compound D, DMPBD) และ Curcuminoids (Curcumin) ยังแสดงฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งเป็นกลไกสำคัญที่ช่วยปกป้องเซลล์จากความเสียหายของอนุมูลอิสระ และเกี่ยวข้องกับกระบวนการอักเสบและการเสื่อมสภาพของผิว โดยเฉพาะในผลิตภัณฑ์เวชสำอางและสุขภาพ (Choudhury et al., 2018; Devkota et al., 2021) เช่น ครีมไพลและน้ำมันไพล ซึ่งถูกบรรจุอยู่ในบัญชียาหลักแห่งชาติ (คณะอนุกรรมการจัดทำตำราอ้างอิงยาสมุนไพรไทย, 2555) สะท้อนให้เห็นถึงความสำคัญทั้งทางการแพทย์และเศรษฐกิจ แม้ว่าความต้องการผลิตภัณฑ์จากไพลจะเพิ่มขึ้น แต่กระบวนการสกัดสารสำคัญยังคงมีข้อจำกัด โดยเฉพาะความไม่เสถียรของสารสำคัญและการเสื่อมสภาพจากความร้อนและออกซิเดชันในกระบวนการสกัดแบบดั้งเดิม เช่น การทอดน้ำมัน ซึ่งอาจส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้การใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ยังอาจทำให้เกิดสารตกค้างที่เป็นอันตราย (Khunnamwong et al., 2020) จึงมีความจำเป็นในการพัฒนาเทคนิคการสกัดที่สามารถรักษาคุณสมบัติของสารออกฤทธิ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

Green Extraction เป็นแนวทางที่ช่วยลดการใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ ลดการปนเปื้อน และเพิ่มความเสถียรของสารสำคัญ ทำให้เหมาะสมกับอุตสาหกรรมเวชสำอางและเภสัชกรรม (Chemat et al., 2017) หนึ่งในเทคนิคที่น่าสนใจคือ Cyclodextrin-assisted Extraction (CAE) ซึ่งใช้ไซโคลเด็กซ์ทริน (Cyclodextrins, CDs) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการสกัด โดย CDs สามารถสร้างโครงสร้างเชิงซ้อนกับสารออกฤทธิ์ ช่วยป้องกันการเสื่อมสภาพ เพิ่มความเสถียร และเพิ่มการละลายของสารในกระบวนการสกัด ทำให้ได้สารสกัดที่มีคุณภาพสูงขึ้น (Loftsson & Brewster, 2011)

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ CAE กับวิธีการสกัดแบบดั้งเดิม และประเมินปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการสกัด เพื่อหาแนวทางที่เหมาะสมในการเพิ่มปริมาณและคุณภาพของสารออกฤทธิ์ ซึ่งไม่เพียงช่วยพัฒนาอุตสาหกรรมสมุนไพรไทยให้สามารถแข่งขันในระดับนานาชาติ

ได้ แต่ยังตอบโจทย์ความต้องการของผู้บริโภคที่ให้ความสำคัญกับผลิตภัณฑ์จากธรรมชาติที่ปลอดภัย และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากเหง้าไพลโดยใช้ cyclodextrins และ cyclodextrin derivatives

1.2.2 เพื่อศึกษา inclusion complex และ thermodynamic interaction ระหว่างสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพและ cyclodextrins

1.2.3 เพื่อเปรียบเทียบวิธีการสกัดแบบดั้งเดิม (การทอดน้ำมัน) การสกัดโดยใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ และการใช้ cyclodextrins และ cyclodextrin derivatives

1.2.4 เพื่อศึกษาผลของการใช้สารช่วยทางเภสัชกรรมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัดที่ใช้ cyclodextrins หรือ cyclodextrin derivatives ในการสกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากเหง้าไพล

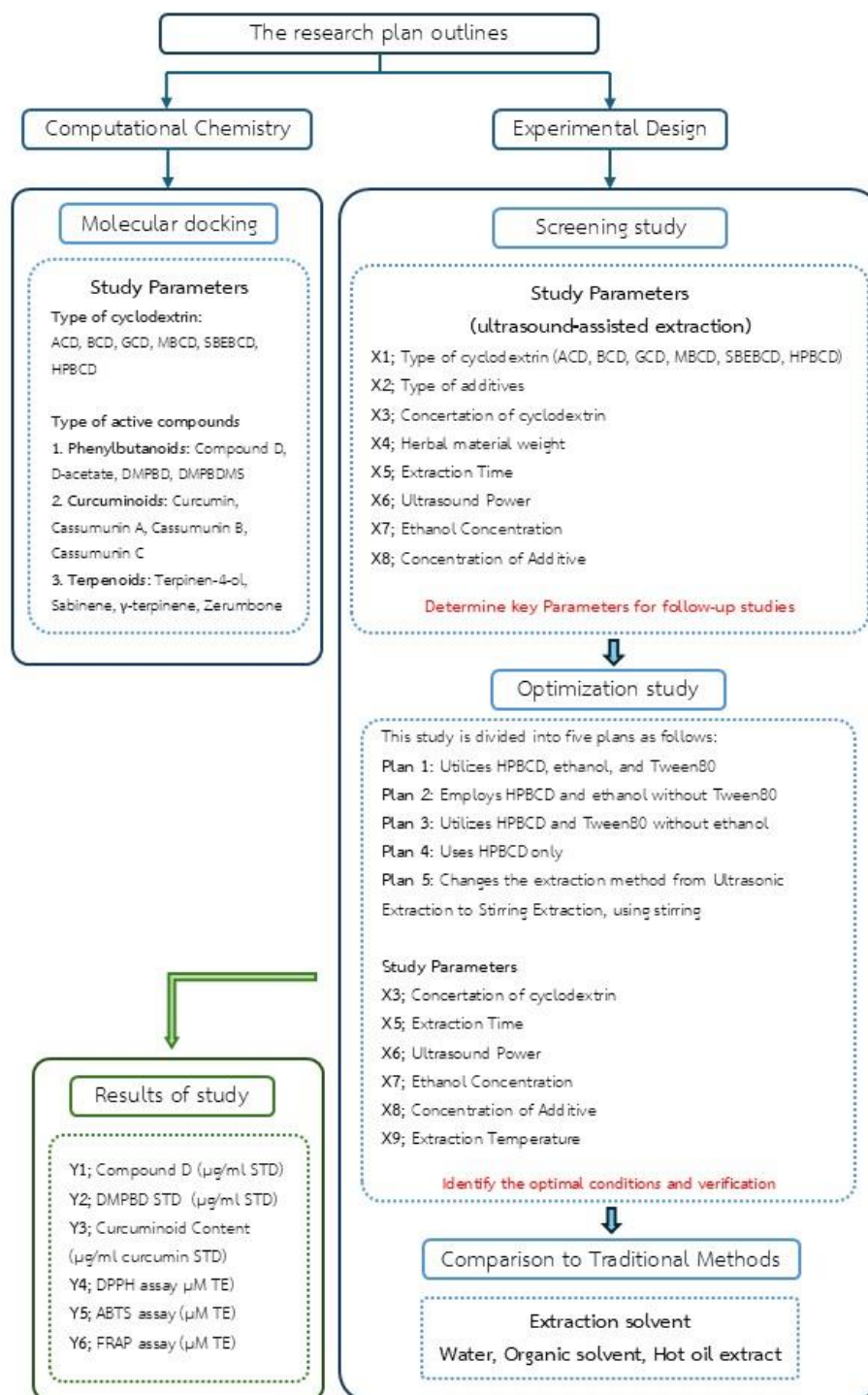
1.3 สมมติฐานของงานวิจัย

การสกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากเหง้าไพลในตัวกลางที่เป็นน้ำโดยใช้ cyclodextrins ช่วยเพิ่ม yield ในการสกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ หรือการใช้ร่วมสารช่วยทางเภสัชกรรม ตัวทำละลายอินทรีย์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม สามารถเพิ่ม yields ในการสกัดได้เช่นกัน

1.4 ขอบเขตการวิจัย

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากเหง้าไพลโดยใช้ cyclodextrins และ cyclodextrin derivatives และผลของการใช้ร่วมกับสารช่วยทางเภสัชกรรมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัด รวมไปถึงการศึกษาลักษณะการ Inclusion complex และ thermodynamic interaction ระหว่าง cyclodextrins กับสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่สกัดได้จากเหง้าไพล แล้วทำการเปรียบเทียบวิธีการสกัดแบบดั้งเดิม (การเจียน้ำมัน) หรือการใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ กับวิธีการสกัดโดยใช้ cyclodextrins และ cyclodextrin derivatives

1.5 กรอบแนวคิด



ภาพที่ 1.1 กรอบแนวคิดการวิจัย

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้สารสกัดที่มีปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพสูง ใช้เทคนิคที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (green extraction) โดยการสกัดในตัวกลางที่เป็นน้ำ ไม่มีการใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม

1.5.2 เป็นประโยชน์ในด้านเทคโนโลยีการสกัด ให้หน่วยงานภาครัฐหรือภาคอุตสาหกรรม เพื่อนำไปเป็นแนวทางในการพัฒนาผลิตภัณฑ์รูปแบบใช้ภายนอก เช่น ลดการอักเสบหรือแก้ปวด หรือฤทธิ์ยับยั้งเชื้อราและแบคทีเรีย

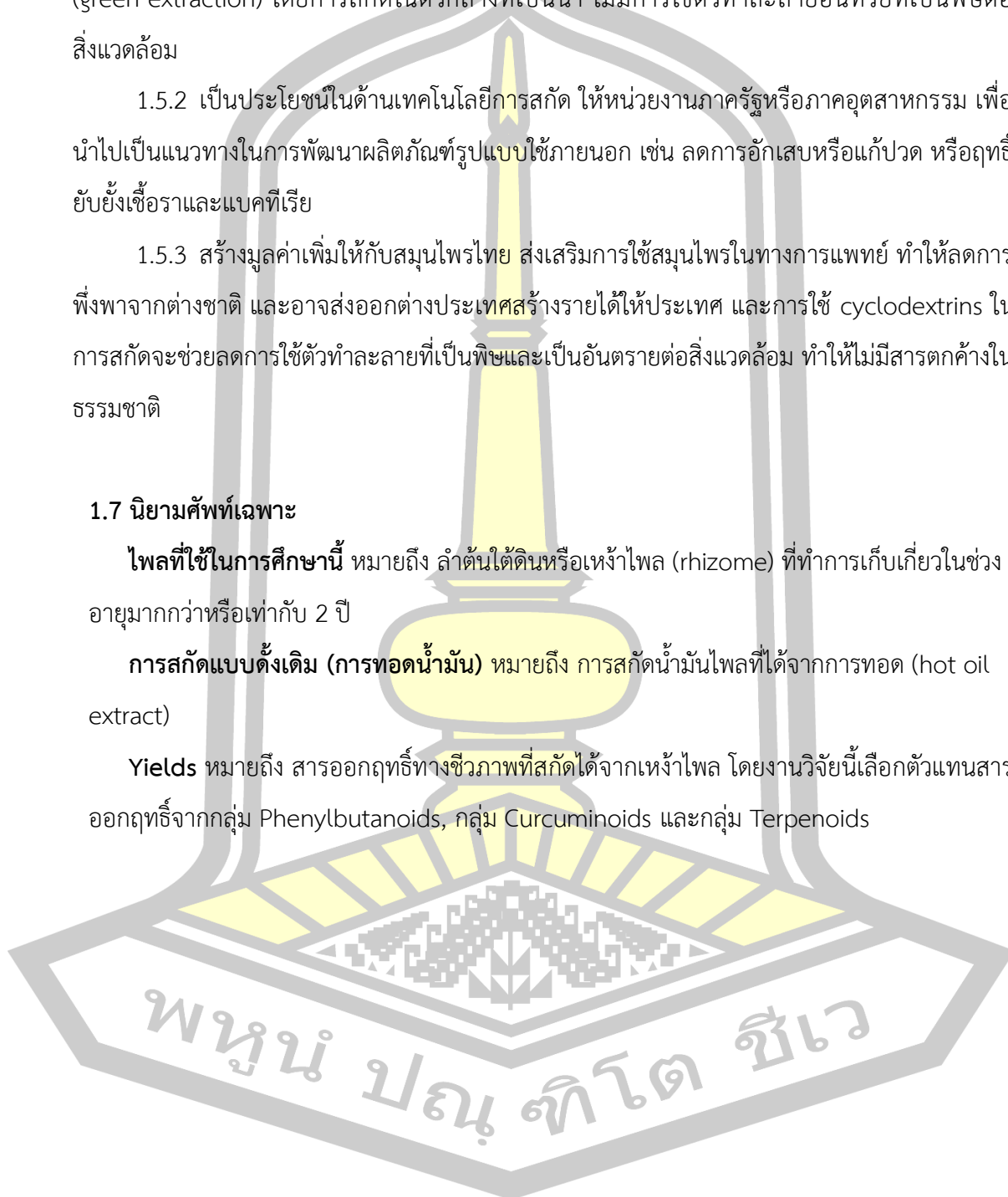
1.5.3 สร้างมูลค่าเพิ่มให้กับสมุนไพรไทย ส่งเสริมการใช้สมุนไพรในทางการแพทย์ ทำให้ลดการพึ่งพาจากต่างชาติ และอาจส่งออกต่างประเทศสร้างรายได้ให้ประเทศ และการใช้ cyclodextrins ในการสกัดจะช่วยลดการใช้ตัวทำละลายที่เป็นพิษและเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม ทำให้ไม่มีสารตกค้างในธรรมชาติ

1.7 นิยามศัพท์เฉพาะ

ไพลที่ใช้ในการศึกษา หมายถึง ลำต้นใต้ดินหรือเหง้าไพล (rhizome) ที่ทำการเก็บเกี่ยวในช่วงอายุมากกว่าหรือเท่ากับ 2 ปี

การสกัดแบบดั้งเดิม (การทอดน้ำมัน) หมายถึง การสกัดน้ำมันไพลที่ได้จากการทอด (hot oil extract)

Yields หมายถึง สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่สกัดได้จากเหง้าไพล โดยงานวิจัยนี้เลือกตัวแทนสารออกฤทธิ์จากกลุ่ม Phenylbutanoids, กลุ่ม Curcuminoids และกลุ่ม Terpenoids



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้ได้รับรวบรวมแนวคิด ทฤษฎี และบทความวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยแบ่งเนื้อหาออกเป็น 8 ส่วน โดยเสนอตามลำดับดังนี้

- 2.1 ข้อมูลทั่วไปและลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของไพล
- 2.2 เทคโนโลยีการสกัดที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม
- 2.3 ไซโคลเด็กซ์ทรินและบทบาทในกระบวนการสกัด
- 2.4 การสกัดโดยใช้ไซโคลเด็กซ์ทรินช่วย (Cyclodextrin-assisted Extraction, CAE)
- 2.5 การใช้ Molecular Docking ในการวิเคราะห์การจับตัวของสารออกฤทธิ์
- 2.6 การออกแบบการทดลองแบบลำดับขั้น (Sequential Experimental Design)
- 2.7 สารช่วยทางเภสัชกรรมในการเพิ่มประสิทธิภาพการสกัด
- 2.8 บทบาทของนวัตกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.1 ข้อมูลทั่วไปและลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของไพล

ไพล (*Zingiber montanum* (Koenig) Link ex Dietr.) หรือที่รู้จักในชื่อ *Zingiber cassumunar* Roxb. เป็นพืชล้มลุกที่อยู่ในวงศ์ Zingiberaceae ซึ่งรวมถึงสมุนไพรสำคัญอื่น ๆ เช่น ขิง ข่า และขมิ้นชัน ไพลมีเหง้าใต้ดินเป็นส่วนสำคัญทางเศรษฐกิจที่ถูกนำมาใช้ประโยชน์ทั้งในทางยาและอุตสาหกรรมอาหาร ลักษณะของเหง้าไพลมีเปลือกนอกสีน้ำตาลอมเหลือง ขณะที่เนื้อในมีสีเหลืองสด มีกลิ่นหอมเฉพาะตัว เหง้ามีการแตกแขนงเป็นลำต้นย่อยคล้ายนิ้วมือ มีความยาวประมาณ 3-7 เซนติเมตร และหนาประมาณ 1-2 เซนติเมตร เมื่อแห้งแล้ว ผิวนอกจะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองอมเทา หรือน้ำตาลอ่อน และเมื่อหักจะพบเนื้อในสีขาวอมเหลืองอมส้ม เหง้าแห้งมักถูกหั่นเป็นชิ้นบาง 2-5 มิลลิเมตร หรือทำแห้งบดเป็นผง (ภาพที่ 2.1) เพื่อนำมาใช้เป็นยาสมุนไพรในตำรับยาไทยและอุตสาหกรรมการผลิตผลิตภัณฑ์สมุนไพร



ภาพที่ 2.1 รูปลักษณะของเครื่องยา

ลำต้นของไพลเจริญขึ้นจากเหง้าใต้ดิน มีความสูงประมาณ 1-1.5 เมตร ใบเป็นใบเดี่ยวเรียงสลับ ใบมีลักษณะขอบขนานแกมใบหอก กว้างประมาณ 5-8 เซนติเมตร และยาวประมาณ 20-30 เซนติเมตร ปลายใบแหลม ขอบใบเรียบ ผิวใบเรียบและเป็นมัน กาบใบหุ้มลำต้นเป็นชั้น ๆ ทำให้ลำต้นแข็งแรงและตั้งตรง ฤดูกาลเจริญเติบโตของไพลสอดคล้องกับฤดูฝน โดยลำต้นและใบจะแห้งในฤดูแล้ง เหลือเพียงเหง้าที่สะสมอาหารอยู่ใต้ดินและสามารถแทงยอดใหม่ในฤดูฝนถัดไป (Sanatombi & Sanatombi, 2017)

ดอกของไพลเป็นดอกช่อที่เจริญจากเหง้าใต้ดิน ช่อดอกประกอบด้วยดอกย่อยหลายดอกที่มีโครงสร้างแบบช่อเชิงลด (spike inflorescence) กลีบดอกมีสีขาวนวล และใบประดับมีสีม่วง ช่อดอกจะปรากฏในช่วงฤดูฝนซึ่งเป็นระยะที่ต้นไพลเจริญเติบโตอย่างสมบูรณ์ ลักษณะดอกที่โดดเด่นทำให้ไพลเป็นที่รู้จักทั้งในด้านพฤกษศาสตร์และการปลูกเชิงพาณิชย์ (Bua-in & Paisooksantivatana, 2009) ผลของไพลเป็นผลแห้งขนาดเล็ก รูปทรงกลม เมื่อผลแก่จะแตกออกเป็นสามพู ภายในมีเมล็ดรูปไข่กลมสีดำจำนวนมาก ซึ่งช่วยให้ไพลขยายพันธุ์ตามธรรมชาติได้ดี (ภาพที่ 2.2)



ภาพที่ 2.2 ภาพลายเส้นไพล (*Zingiber montanum* (Koenig) Link ex Dietr.)

(คณะอนุกรรมการจัดทำตำราอ้างอิงยาสมุนไพรไทย, 2555)

โพลีเอทิลีนได้ตีในดินที่มีความชื้นพอเหมาะและสามารถระบายน้ำได้ดี โดยพบมากในป่าโปร่งที่มีความชื้นสูงหรือในพื้นที่ที่ดินชุ่มชื้น การปลูกโพลีเอทิลีนในเชิงพาณิชย์มักใช้ระยะเวลา 12-24 เดือนจึงจะเก็บเกี่ยวได้ โดยช่วงเวลานี้เหง้าจะสะสมสารสำคัญในปริมาณสูงสุด โพลีเอทิลีนสามารถเติบโตในดินหลากหลายประเภท และเหมาะสมกับสภาพอากาศร้อนชื้น (Musdja, 2021) การปลูกโพลีเอทิลีนเป็นพืชเศรษฐกิจจึงได้รับความนิยมในประเทศไทย อินโดนีเซีย และอินเดีย เนื่องจากความต้องการใช้ที่สูงในอุตสาหกรรมสมุนไพรและเครื่องสำอาง (Devkota et al., 2021)

ในประเทศไทย โพลีเอทิลีนพบได้ทั้งในป่าธรรมชาติและในแปลงเพาะปลูกเพื่อการค้าเกษตรกรรมนิยมปลูกโพลีเอทิลีนเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมยา อาหาร และเครื่องสำอาง นอกเหนือจากการใช้โพลีเอทิลีนในตำรับยาพื้นบ้านแล้ว ยังมีการนำไปใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์บำรุงผิวและผลิตภัณฑ์รักษาอาการอักเสบ นอกจากนี้ โพลีเอทิลีนยังมีบทบาทสำคัญในวัฒนธรรมพื้นบ้านไทย โดยมีการใช้โพลีเอทิลีนอย่างยาวนานในการบรรเทาอาการปวดกล้ามเนื้อ อักเสบ และรักษาอาการปวดประจำเดือนสำหรับสตรี (Worasing et al., 2023) ความนิยมของโพลีเอทิลีนทั้งในเชิงพฤกษศาสตร์และอุตสาหกรรม ทำให้พืชชนิดนี้ยังคงเป็นที่สนใจของนักวิจัยและภาคอุตสาหกรรมในการพัฒนาแนวทางการใช้ประโยชน์ที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น

2.1.1 มาตรฐานลักษณะทางกายภาพและเคมีที่เหมาะสมของเหง้าโพลีเอทิลีน

เหง้าโพลีเอทิลีนเป็นสมุนไพรที่มีคุณค่าทางเภสัชกรรมและถูกนำมาใช้ในผลิตภัณฑ์หลากหลายประเภท มาตรฐานด้านลักษณะทางกายภาพและเคมีของเหง้าโพลีเอทิลีนจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยรับรองคุณภาพของผลิตภัณฑ์สมุนไพร มาตรฐานที่กำหนดครอบคลุมหลายด้าน เช่น ปริมาณความชื้นในเหง้าโพลีเอทิลีนต้องไม่เกิน 13.0% w/w เพื่อป้องกันการเจริญเติบโตของเชื้อราและยืดอายุการเก็บรักษา (Kaewchoothong, 2009) ปริมาณสิ่งแปลกปลอมต้องไม่เกิน 2.0% w/w เพื่อรักษาความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์ ปริมาณเถ้ารวมที่ไม่ควรเกิน 9.0% w/w ใช้เป็นตัวบ่งชี้สารอินทรีย์ที่ตกค้างจากกระบวนการผลิต ขณะที่ปริมาณเถ้าที่ไม่ละลายในกรดต้องไม่เกิน 3.0% w/w เพื่อบ่งชี้การปนเปื้อนจากแร่ธาตุ เช่น ดินและทราย (Bua-in & Paisooksantivatana, 2009)

นอกจากนี้ ปริมาณสารสำคัญทางเภสัชวิทยา เช่น ฟีนิลบิวทานอยด์ ต้องไม่น้อยกว่า 5.0% w/w ซึ่งสามารถละลายได้ในคลอโรฟอร์ม ขณะที่ปริมาณสารสกัดที่ละลายในเฮกเซน ซึ่งเป็นตัวทำละลายสำหรับสารที่ไม่มีขั้ว ต้องไม่น้อยกว่า 3.0% w/w ส่วนปริมาณน้ำมันหอมระเหยที่มีคุณสมบัติช่วยด้านการอักเสบและบรรเทาอาการปวด ต้องไม่น้อยกว่า 2.0% v/w เพื่อให้ผลิตภัณฑ์จากโพลีเอทิลีนมีประสิทธิภาพในการรักษาอย่างมีประสิทธิภาพ (Sanatombi & Sanatombi, 2017) มาตรฐานเหล่านี้เป็นข้อกำหนดสำคัญที่ช่วยรับรองคุณภาพ ความปลอดภัย และประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์จากโพลีเอทิลีน

ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการรักษาโรค การผลิตเครื่องสำอาง และอาหารเสริมได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

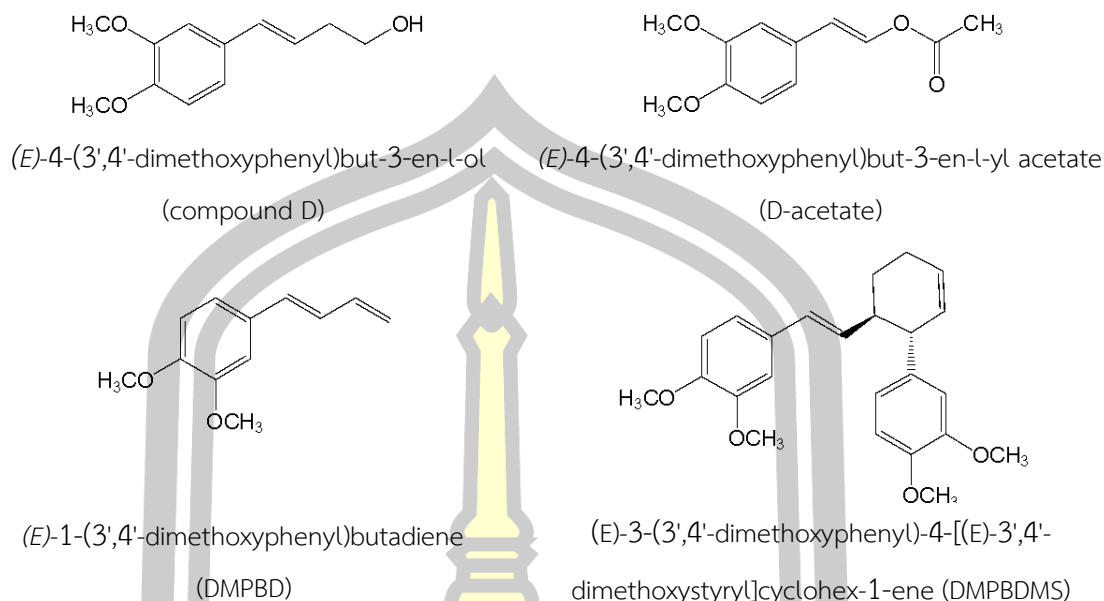
2.1.2 องค์ประกอบทางเคมีและสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในเหง้าไพล

เหง้าไพลประกอบด้วยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพหลายชนิดที่มีบทบาทสำคัญทางเภสัชวิทยา โดยสามารถจำแนกออกเป็นกลุ่มหลัก ได้แก่ Phenylbutanoids, Curcuminoids และ Terpenoids ซึ่งแต่ละกลุ่มมีคุณสมบัติทางชีวภาพที่แตกต่างกันและถูกนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์ยาและเครื่องสำอาง (Bua-in & Paisooksantivatana, 2009; Sanatombi & Sanatombi, 2017)

1. กลุ่มฟีนิลบิวทานอยด์ (Phenylbutanoids)

เป็นสารออกฤทธิ์หลักที่พบในเหง้าไพล มีคุณสมบัติด้านการอักเสบและบรรเทาอาการปวด โดยปริมาณของสารสำคัญในกลุ่มนี้ที่พบในเหง้าไพลอยู่ในช่วงประมาณ 0.1-0.5% w/w ขึ้นอยู่กับสายพันธุ์และแหล่งเพาะปลูก (Kaewchoothong, 2009) สารสำคัญในกลุ่มนี้ ได้แก่ (*E*)-4-(3',4'-dimethoxyphenyl)but-3-en-1-ol (compound D), (*E*)-4-(3',4'-dimethoxyphenyl)but-3-en-1-yl acetate (D-acetate), (*E*)-1-(3',4'-dimethoxyphenyl)butadiene (DMPBD) และ (*E*)-3-(3',4'-dimethoxyphenyl)-4-[(*E*)-3',4'-dimethoxystyryl]cyclohex-1-ene (DMPBDMS) จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า สารประกอบ (*E*)-1-(3',4'-dimethoxyphenyl)but-1,3-diene และอนุพันธ์อื่นๆ ถูกแยกได้ในปริมาณมาก โดยมีรายงานว่าในกระบวนการสกัดด้วย petroleum ether ปริมาณ phenylbutenoids คิดเป็นประมาณ 46% ขององค์ประกอบในน้ำมันหอมระเหย ในขณะที่การสกัดด้วยไอน้ำให้ปริมาณอยู่ที่ประมาณ 25% (Han et al., 2021) ซึ่งมีฤทธิ์เด่นในการลดการบวมและช่วยบรรเทาอาการปวดกล้ามเนื้อ มาตรฐานคุณภาพของสารสกัดจากไพลมักใช้สารกลุ่มนี้เป็นตัวชี้วัด โดยสารสกัดที่ได้จากการใช้เฮกเซนเป็นตัวทำละลายจะให้ปริมาณสารออกฤทธิ์ที่สูงขึ้น

พญ. ปณ. จิตโต ชีวะ

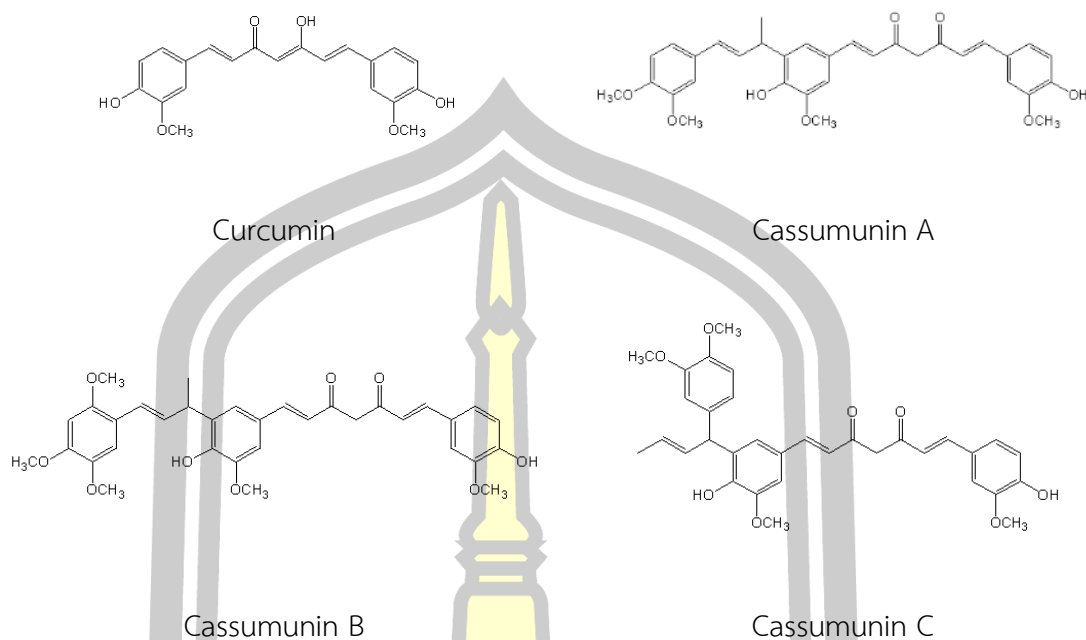


ภาพที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของสารกลุ่ม phenylbutanoid ที่พบส่วนใหญ่ในเหง้าไพล

(PubChem, 2024)

2. กลุ่มเคอร์คูมินอยด์ (Curcuminoids)

เป็นสารกลุ่มที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูง โดยปริมาณของสารกลุ่มนี้ที่พบในเหง้าไพลอยู่ในช่วงประมาณ 0.05-0.3% w/w โดยสารประกอบหลักในกลุ่มนี้คือ (E,E)-1,7-bis(4-hydroxy-3-methoxyphenyl)-1,6-heptadiene-3,5-dione (Curcumin), Cassumunin A, Cassumunin B และ Cassumunin C โดยที่มีรายงานว่า curcumin สามารถแยกได้จากเหง้าไพลในอัตรา มากกว่า 0.2% w/w และสารกลุ่ม cassumunins A-C ก็พบในปริมาณที่มีนัยสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระที่ได้รับการยืนยันในระดับเซลล์ (Han et al., 2021) ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงในการป้องกันความเสื่อมของเซลล์และช่วยลดการอักเสบ สารเหล่านี้ถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมยาและเครื่องสำอางอย่างแพร่หลาย (Sanatombi & Sanatombi, 2017)

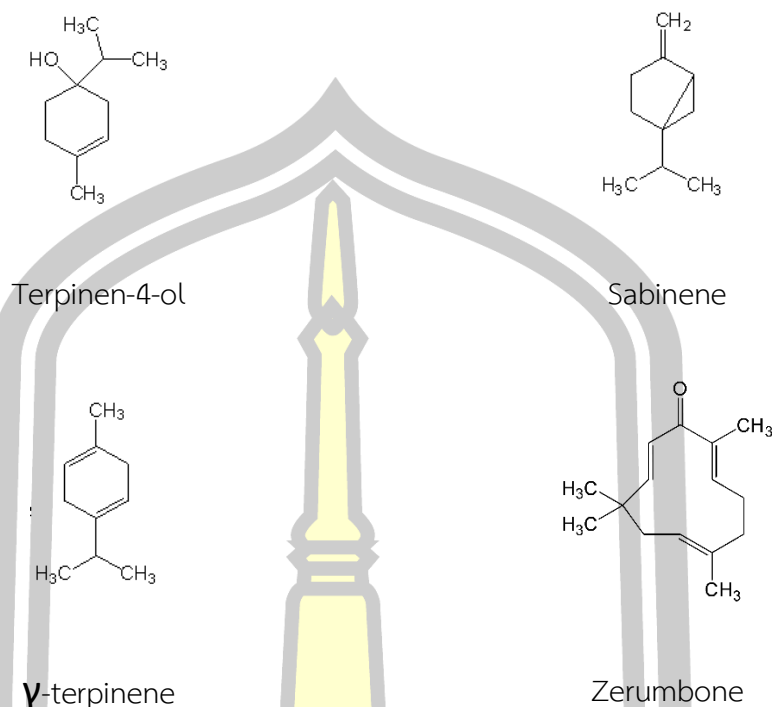


ภาพที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของสารกลุ่ม Curcuminoids ที่พบส่วนใหญ่ในเหง้าไพล

(PubChem, 2024)

3. กลุ่มเทอร์พีนอยด์ (Terpenoids)

เป็นองค์ประกอบหลักของน้ำมันหอมระเหยจากเหง้าไพล ซึ่งมีปริมาณน้ำมันหอมระเหยเฉลี่ยประมาณ 0.5-3.0% v/w สารสำคัญในกลุ่มนี้ ได้แก่ α -pinene, sabinene, γ -terpinene และ terpinen-4-ol โดยเฉพาะ (2E,6E,10E)-2,6,9,9-tetramethyl-2,6,10-cycloundecatrien-1-one (Zerumbone) ซึ่งเป็น sesquiterpene ที่มีศักยภาพสูงในการต้านมะเร็ง (Devkota et al., 2021) สารหลักที่พบ ได้แก่ sabinene และ terpinen-4-ol โดยในน้ำมันหอมระเหยจากเหง้าไพลพบว่า terpinen-4-ol อาจมีสัดส่วนถึง 31.3% ขึ้นกับวิธีสกัด (Han et al., 2021) ทั้งนี้ การสกัดด้วยวิธี hydrodistillation ให้ผลใกล้เคียงกับรายงานในอดีต การศึกษาสารออกฤทธิ์เหล่านี้ช่วยให้เข้าใจถึงกลไกการออกฤทธิ์ของไพลมากขึ้น และส่งเสริมการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีประสิทธิภาพในด้าน การแพทย์และอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง (Musdja, 2021; Worasing et al., 2023)



ภาพที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของสารกลุ่ม Terpenoids ที่พบส่วนใหญ่ในเหง้าไพล
(PubChem, 2024)

2.1.3ฤทธิ์ทางเภสัชวิทยาของเหง้าไพล

ไพลเป็นสมุนไพรที่ได้รับความสนใจในการศึกษาทางเภสัชวิทยา เนื่องจากมีสารออกฤทธิ์ที่มีประโยชน์หลายชนิด ซึ่งส่งผลต่อระบบต่าง ๆ ในร่างกาย ฤทธิ์ทางเภสัชวิทยาที่สำคัญของไพล ได้แก่

ฤทธิ์ต้านการอักเสบ (Anti-inflammatory activity) สารกลุ่ม Phenylbutanoids โดยเฉพาะ compound D และ DMPBD มีฤทธิ์ลดอาการบวมและอักเสบได้อย่างมีประสิทธิภาพ งานวิจัยพบว่าสาร compound D มีผลลดการอักเสบที่สูงกว่าแอสไพริน และ DMPBD มีฤทธิ์แรงกว่า diclofenac ถึง 11 เท่าในการทดสอบบางกรณี (Bua-in & Paisooksantivatana, 2009) นอกจากนี้ สารเหล่านี้ยังช่วยยับยั้งการหลั่งสารไซโตไคน์ (cytokines) ที่เกี่ยวข้องกับการกระบวนการอักเสบเรื้อรัง เช่น IL-6 และ TNF- α ซึ่งเป็นตัวกลางสำคัญที่กระตุ้นปฏิกิริยาการอักเสบในร่างกาย (Kaewchoothong, 2009)

ฤทธิ์บรรเทาปวด (Analgesic activity) สารสำคัญ เช่น compound D และ DMPBD มีคุณสมบัติช่วยลดอาการปวดที่เกี่ยวข้องกับการอักเสบและปวดกล้ามเนื้อ โดยมีฤทธิ์ลดการรับรู้ความเจ็บปวดผ่านการยับยั้งการสังเคราะห์ของ prostaglandins ที่เกี่ยวข้องกับการกระตุ้นตัวรับความ

เจ็บปวด (nociceptors) (Sanatombi & Sanatombi, 2017) นอกจากนี้ยังพบว่าไพลสามารถลดอาการปวดเส้นประสาท (neuropathic pain) ในการศึกษาทางคลินิกบางกรณีได้อีกด้วย

ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant activity) สารกลุ่ม Curcuminoids และ Phenylbutanoids มีฤทธิ์ช่วยลดความเสียหายจากอนุมูลอิสระและลดความเสี่ยงของโรคเรื้อรัง เช่น มะเร็งและโรคหัวใจ โดยเฉพาะสาร Cassumunin A, Cassumunin B ที่พบในไพลมีความสามารถในการยับยั้งการเกิดออกซิเดชันของไขมันและป้องกันการเสื่อมของเซลล์ประสาท (Devkota et al., 2021) การศึกษายังแสดงให้เห็นว่าสารเหล่านี้มีบทบาทในการกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระ เช่น superoxide dismutase (SOD) และ catalase ซึ่งช่วยลดความเสียหายของเซลล์จากอนุมูลอิสระในระดับโมเลกุล (Musdja, 2021)

ฤทธิ์ต้านเชื้อจุลชีพ (Antimicrobial activity) น้ำมันหอมระเหยจากไพลที่มีสาร Terpinen-4-ol และ Sabinene มีฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรียและเชื้อราที่ก่อให้เกิดโรคทางผิวหนังและทางเดินหายใจ โดยสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *Staphylococcus aureus*, *Streptococcus pyogenes* และ *Pseudomonas aeruginosa* ได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Musdja, 2021) นอกจากนี้สารเหล่านี้ยังมีศักยภาพในการใช้เป็นสารเสริมฤทธิ์กับยาต้านจุลชีพทั่วไปเพื่อลดปัญหาการดื้อยาของแบคทีเรีย (Devkota et al., 2021)

ฤทธิ์ต้านมะเร็ง (Anticancer activity) Zerumbone ซึ่งเป็นสารในกลุ่ม Sesquiterpenoids สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเซลล์มะเร็งโดยกระตุ้นกระบวนการตายของเซลล์ (apoptosis) ผ่านเส้นทางของ caspase-3 และ caspase-9 ซึ่งเป็นเอนไซม์สำคัญที่ควบคุมการตายของเซลล์มะเร็ง (Sanatombi & Sanatombi, 2017) มีงานวิจัยที่แสดงว่าสาร Zerumbone สามารถยับยั้งเซลล์มะเร็งปอดและมะเร็งลำไส้ใหญ่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยทำให้เซลล์เหล่านี้เกิดภาวะเครียดออกซิเดชันและลดการแบ่งตัวของเซลล์มะเร็ง (Kaewchoothong, 2009)

ฤทธิ์กระตุ้นระบบภูมิคุ้มกัน (Immunostimulant activity) สาร Phenylbutanoids และ Curcuminoids สามารถเสริมการทำงานของระบบภูมิคุ้มกัน โดยเฉพาะการทำงานของเซลล์เม็ดเลือดขาวชนิดแมคโครฟาจ (macrophages) และเซลล์ Natural Killer (NK cells) ที่มีบทบาทในการกำจัดเชื้อโรคและเซลล์มะเร็ง (Worasing et al., 2023) การศึกษายังพบว่าไพลสามารถช่วยกระตุ้นการผลิตแอนติบอดี และเพิ่มประสิทธิภาพของระบบภูมิคุ้มกันในการต่อสู้กับเชื้อไวรัสบางชนิด (Musdja, 2021)

ด้วยคุณสมบัติทางเภสัชวิทยาที่หลากหลาย ไพลจึงเป็นพืชสมุนไพรที่มีศักยภาพสูงในการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์สมุนไพร ยา และผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพสำหรับป้องกันและรักษาโรคในอนาคต

2.1.4 การศึกษาด้านความปลอดภัยและพิษวิทยาของไพล

การศึกษาด้านความปลอดภัยและพิษวิทยาของไพลเป็นองค์ประกอบสำคัญในการยืนยันความปลอดภัยของการใช้สมุนไพรชนิดนี้ ทั้งในทางการแพทย์และอุตสาหกรรมยาและเครื่องสำอาง โดยมีการศึกษาทั้งในระดับ พิษเฉียบพลัน (acute toxicity), พิษกึ่งเฉียบพลัน (subacute toxicity), พิษเรื้อรัง (chronic toxicity), พิษต่อผิวหนัง (dermal toxicity), และผลกระทบต่อระบบอวัยวะภายใน (systemic toxicity) ซึ่งผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าไพลมีความปลอดภัยสูงในปริมาณที่แนะนำ

พิษเฉียบพลัน (Acute Toxicity) การศึกษาพิษเฉียบพลันในสัตว์ทดลองพบว่า สารสกัดจากเหง้าไพลในขนาดสูง (มากกว่า 20 กรัมต่อกิโลกรัมของน้ำหนักตัว) ไม่มีผลทำให้สัตว์ทดลองเสียชีวิตหรือเกิดความผิดปกติทางพฤติกรรมอย่างมีนัยสำคัญ ค่า LD_{50} (ค่าปริมาณของสารที่ทำให้สัตว์ทดลองตาย 50%) อยู่ในระดับสูง ซึ่งบ่งชี้ถึงความปลอดภัยของไพล (Musdja, 2021)

พิษกึ่งเฉียบพลันและเรื้อรัง (Subacute and Chronic Toxicity) การใช้สารสกัดไพลในปริมาณสูงเป็นระยะเวลานานไม่ได้แสดงผลกระทบเชิงลบที่สำคัญในหนูทดลอง การศึกษาพบว่า การให้สารสกัดไพลในปริมาณที่สูงกว่าขนาดปกติถึง 1,168 เท่า ไม่ก่อให้เกิดความเสียหายของอวัยวะภายใน ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของพฤติกรรม การกินอาหาร และไม่พบอาการพิษเรื้อรัง (Bua-in & Paisooksantivatana, 2009)

พิษต่อผิวหนัง (Dermal Toxicity) การทดสอบผลิตภัณฑ์ที่มีสารสกัดจากไพลในสัตว์ทดลอง เช่น กระต่าย และหนูตะเภา พบว่าไม่มีการระคายเคืองหรืออาการแพ้ที่รุนแรง ผลลัพธ์ที่ใช้สารสกัดไพลมีค่า LD_{50} ทางผิวหนังมากกว่า 2 กรัมต่อกิโลกรัมของน้ำหนักตัว ซึ่งหมายถึงความปลอดภัยของการใช้ภายนอก (Sanatombi & Sanatombi, 2017)

พิษต่อระบบอวัยวะภายใน (Systemic Toxicity) การศึกษาผลของสารสกัดไพลต่อระบบอวัยวะภายใน เช่น ตับ ไต หัวใจ และอวัยวะอื่น ๆ พบว่าไม่มีผลกระทบเชิงลบในระดับโมเลกุลหรือทางสรีรวิทยา ค่าเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของตับและไต เช่น AST, ALT และ BUN ไม่พบการเปลี่ยนแปลงผิดปกติ ซึ่งแสดงว่าไพลไม่ก่อให้เกิดความเป็นพิษต่ออวัยวะภายในเมื่อใช้ในปริมาณที่เหมาะสม (Kaewchoothong, 2009)

พิษเฉพาะด้านและข้อควรระวัง แม้ว่าไพลจะมีความปลอดภัยสูง แต่การใช้ในปริมาณที่มากเกินไปหรือต่อเนื่องเป็นเวลานานอาจส่งผลกระทบต่อระบบทางเดินอาหาร เช่น การระคายเคืองกระเพาะอาหารในบางกรณี ผู้ที่มีภาวะไวต่อสมุนไพรควรปรึกษาผู้เชี่ยวชาญก่อนใช้ นอกจากนี้ การใช้ไพลในหญิงตั้งครรภ์ควรอยู่ภายใต้การดูแลของแพทย์ เนื่องจากสารบางชนิดในไพลอาจมีผลต่อการหดตัวของมดลูก (Musdja, 2021)

จากการศึกษาทางพิษวิทยาพบว่า ไพลเป็นสมุนไพรที่มีความปลอดภัยสูงเมื่อใช้ในปริมาณที่เหมาะสมและอยู่ภายใต้การควบคุมของผู้เชี่ยวชาญ การศึกษาต่าง ๆ สนับสนุนว่าไพลสามารถนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์ยาและเครื่องสำอางได้อย่างปลอดภัย อย่างไรก็ตาม ควรมีการควบคุมปริมาณและติดตามผลการใช้อย่างเหมาะสมเพื่อป้องกันผลข้างเคียงที่อาจเกิดขึ้น

2.1.5 การใช้ไพลในทางแพทย์แผนไทยและการแพทย์ทางเลือก

ไพลเป็นสมุนไพรที่มีบทบาทสำคัญในทางการแพทย์แผนไทยและการแพทย์ทางเลือก โดยถูกนำมาใช้เพื่อรักษาและบรรเทาอาการต่าง ๆ มาอย่างยาวนาน โดยเฉพาะในด้านการบรรเทาอาการปวด ลดการอักเสบ และเสริมสร้างสุขภาพโดยรวม ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มการใช้งานหลักดังนี้:

การบรรเทาอาการปวดกล้ามเนื้อและข้อ น้ำมันไพลเป็นผลิตภัณฑ์สำคัญที่ใช้ในทางแพทย์แผนไทยสำหรับบรรเทาอาการปวดเมื่อยและอักเสบ โดยเฉพาะในผู้ที่มีอาการปวดกล้ามเนื้อ ข้ออักเสบ และฟกช้ำ ตำรับยาแผนไทย เช่น ยาขี้ผึ้งไพลและน้ำมันไพล ถูกนำมาใช้เพื่อทาภายนอกบริเวณที่มีอาการปวด และมักใช้ร่วมกับการนวดและอบสมุนไพรเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการรักษา (Sanatombi & Sanatombi, 2017)

การดูแลสุขภาพสตรีหลังคลอด ไพลมีบทบาทสำคัญในกระบวนการ อยู่ไฟหลังคลอด ซึ่งเป็นภูมิปัญญาไทยที่ช่วยปรับสมดุลร่างกายของสตรีหลังคลอด ตำรับยา เช่น ยาประสะไพล ถูกใช้เพื่อขับน้ำคาวปลา กระตุ้นการไหลเวียนโลหิต และช่วยลดอาการปวดเมื่อยของมารดาหลังคลอด ไพลยังมีฤทธิ์ช่วยบรรเทาอาการปวดประจำเดือนและปรับสมดุลฮอร์โมนในร่างกาย (Devkota et al., 2021)

การรักษาอาการระบบทางเดินอาหาร ไพลถูกใช้ในตำรับยาแผนไทยสำหรับรักษาอาการท้องอืด ท้องเฟ้อ และแน่นจุกเสียด โดยมีสรรพคุณช่วยขับลมและกระตุ้นการย่อยอาหาร ตำรับยาไทย เช่น ยาประสะกานพลู ซึ่งมีไพลเป็นส่วนประกอบหลัก ถูกใช้ในการบรรเทาอาการปวดท้องและช่วยระบบทางเดินอาหารให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Worasing et al., 2023)

การรักษาการใช้และอักเสบทั่วไป ตามตำรับแพทย์แผนไทย ไพลมีการใช้เพื่อลดไข้และบรรเทาอาการอักเสบ เช่น อาการปวดศีรษะ เจ็บคอ และไข้หวัด โดยสามารถใช้ไพลในรูปแบบของยาต้ม ยาประคบ หรืออบระเหยเพื่อพอกบริเวณที่มีอาการอักเสบ ตำรับยาไทยในคัมภีร์โบราณ เช่น พระคัมภีร์ธาตุวิงค์และพระคัมภีร์โรคนิทาน ได้ระบุถึงการไพลเพื่อบรรเทาอาการไข้และลดการอักเสบที่เกี่ยวข้องกับโรคติดเชื้อ (Bua-in & Paisooksantivatana, 2009)

การดูแลผิวพรรณและการใช้ในเครื่องสำอาง ไพลถูกใช้ใน ผลิตภัณฑ์ดูแลผิวพรรณ เนื่องจากมีคุณสมบัติด้านการอักเสบและช่วยลดอาการระคายเคืองของผิวหนัง น้ำมันหอมระเหยจาก

ไพลถูกใช้เป็นส่วนประกอบของครีมบำรุงผิวและสบู่ โดยช่วยลดอาการแพ้ ผื่นคัน และสิว อีกทั้งยังช่วยให้ผิวมีความชุ่มชื้นและลดอาการอักเสบของผิวหนัง (Mudja, 2021)

การใช้ไพลในบัญชียาหลักแห่งชาติ ไพลได้รับการยอมรับใน บัญชียาหลักแห่งชาติของประเทศไทย ว่าเป็นสมุนไพรที่มีประสิทธิภาพและปลอดภัยในการรักษาอาการต่าง ๆ โดยถูกบรรจุในตำรับยา เช่น ยาประสะไพล (ใช้บรรเทาอาการปวดประจำเดือน), ยาประสะกานพลู (ใช้รักษาอาการระบบทางเดินอาหาร), ยาขี้ผึ้งไพลและน้ำมันไพล (ใช้บรรเทาอาการปวดกล้ามเนื้อและข้อ) ซึ่งสะท้อนถึงความสำคัญของไพลในระบบสาธารณสุขไทย (Devkota et al., 2021)

การใช้ไพลในทางแพทย์แผนไทยและการแพทย์ทางเลือกมีความหลากหลาย ตั้งแต่การรักษาอาการปวด บรรเทาอาการทางเดินอาหาร ไปจนถึงการดูแลสุขภาพสตรีหลังคลอด นอกจากนี้ ไพลยังถูกนำมาใช้ในเครื่องสำอางและได้รับการยอมรับในบัญชียาหลักแห่งชาติ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของไพลในฐานะสมุนไพรที่มีบทบาทสำคัญในการดูแลสุขภาพและบำบัดโรคตามศาสตร์การแพทย์แผนไทยและการแพทย์ทางเลือก

2.1.6 การใช้ประโยชน์ของไพลในเชิงพาณิชย์และการแพทย์

ไพลเป็นสมุนไพรที่มีการใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลายในด้านอุตสาหกรรมเชิงพาณิชย์และการแพทย์ โดยเฉพาะการผลิตยา ผลิตภัณฑ์เสริมอาหาร และเครื่องสำอาง ความสำคัญของไพลเกิดจากคุณสมบัติทางเภสัชวิทยาที่มีประสิทธิภาพ ทั้งในด้านการบรรเทาปวด ด้านการอักเสบ ด้านอนุมูลอิสระ และการดูแลสุขภาพผิวพรรณ การใช้ประโยชน์ของไพลสามารถแบ่งออกเป็นหมวดหมู่หลักดังนี้

ผลิตภัณฑ์เสริมอาหารและยา ไพลถูกนำมาใช้เป็นส่วนประกอบสำคัญใน ผลิตภัณฑ์เสริมอาหารและยา สำหรับบรรเทาอาการปวดกล้ามเนื้อและข้อต่อ สารออกฤทธิ์ในไพล เช่น compound D และ DMPBD มีฤทธิ์ด้านการอักเสบและบรรเทาปวด ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากไพล ได้แก่ ยาขี้ผึ้งไพล น้ำมันไพล และครีมบรรเทาปวด ซึ่งได้รับความนิยมทั้งในประเทศไทยและประเทศอื่น ๆ ในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ โดยผลิตภัณฑ์เหล่านี้ช่วยบรรเทาอาการปวดจากข้ออักเสบ ฟกช้ำ และการบาดเจ็บของกล้ามเนื้อ (Bua-in & Paisooksantivatana, 2009)

อุตสาหกรรมเครื่องสำอางในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง ไพลเป็นที่ยอมรับในผลิตภัณฑ์บำรุงผิว เนื่องจากมีคุณสมบัติในการต้านการอักเสบ ลดอาการระคายเคือง และช่วยบำรุงผิวให้ชุ่มชื้น สารสำคัญในกลุ่ม Terpenoids เช่น Terpinen-4-ol และ Sabinene ที่พบในน้ำมันหอมระเหยจากไพลช่วยลดอาการบวมและการอักเสบของผิวหนัง ไพลถูกนำมาใช้ใน ครีมทาผิว สบู่ แชมพู และผลิตภัณฑ์น้ำมันหอมระเหย เพื่อช่วยให้ผิวแข็งแรงและลดอาการแพ้ต่าง ๆ นอกจากนี้ เทรนด์การใช้

สมุนไพรในผลิตภัณฑ์บำรุงผิวที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทำให้โพลกลายเป็นวัตถุดิบที่ได้รับความนิยมในตลาดเครื่องสำอาง (Musdja, 2021)

ผลิตภัณฑ์น้ำมันหอมระเหยและสปา น้ำมันหอมระเหยจากโพลเป็นที่นิยมใน อุตสาหกรรมสปาและอโรมาเธอราพี (Aromatherapy) เนื่องจากกลิ่นของโพลมีคุณสมบัติช่วย ผ่อนคลาย ความเครียด บรรเทาอาการเมื่อยล้า และกระตุ้นการไหลเวียนโลหิต สถานบริการด้านสุขภาพและสปาในประเทศไทยและต่างประเทศนิยมนำน้ำมันโพลสำหรับ นวดตัว อบสมุนไพร และทำทรีทเมนต์ เพื่อบรรเทาอาการปวดเมื่อย (Worasing et al., 2023)

การใช้โพลในตำรับยาหลักแห่งชาติ โพลได้รับการรับรองให้เป็นสมุนไพรที่มีประโยชน์สูง และถูกบรรจุใน บัญชียาหลักแห่งชาติของประเทศไทย ซึ่งใช้เป็นส่วนประกอบหลักในตำรับยาแผนไทย เช่น ยาประสะโพล (รักษาอาการปวดประจำเดือน) ยาประสะกานพลู (บรรเทาอาการแน่นท้อง ท้องอืด) และยาขี้ผึ้งโพล น้ำมันโพล (รักษาอาการปวดกล้ามเนื้อและข้อ) ซึ่งผลิตภัณฑ์เหล่านี้ได้รับการยอมรับในโรงพยาบาลและสถานพยาบาลทั่วประเทศ รวมถึงผลิตภัณฑ์สมุนไพรที่จำหน่ายในเชิงพาณิชย์ (Devkota et al., 2021)

แนวโน้มการพัฒนาและตลาดผลิตภัณฑ์จากโพล ความต้องการ ผลิตภัณฑ์จากสมุนไพรธรรมชาติที่ปลอดภัยและมีประสิทธิภาพสูง กำลังเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในตลาดโลก ส่งผลให้อุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับโพล เช่น ยาทาภายนอก ผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง และผลิตภัณฑ์เสริมอาหาร มีการลงทุนด้านการวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ ๆ เทคโนโลยีการสกัดที่ทันสมัย เช่น การสกัดด้วยตัวทำละลายที่ปลอดภัยและเทคนิคการสกัดเย็น ช่วยเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์และตอบสนองต่อความต้องการของผู้บริโภคที่ต้องการผลิตภัณฑ์จากธรรมชาติ (Worasing et al., 2023)

โพลเป็นสมุนไพรที่มีศักยภาพสูงทั้งในด้านการแพทย์และอุตสาหกรรมเชิงพาณิชย์ ผลิตภัณฑ์จากโพลได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางในตลาดทั้งในประเทศและต่างประเทศ ไม่ว่าจะเป็น ยาเสริมสุขภาพ ผลิตภัณฑ์บำรุงผิว และน้ำมันหอมระเหย การเติบโตของอุตสาหกรรมสมุนไพรทำให้โพลมีแนวโน้มที่จะเป็นส่วนสำคัญในอุตสาหกรรมสุขภาพและความงามทั่วโลกในอนาคต

2.1.7 วิธีการสกัดและควบคุมคุณภาพสารสกัดจากโพล

การสกัดสารสำคัญจากเหง้าโพลเป็นขั้นตอนสำคัญที่มีผลโดยตรงต่อปริมาณและคุณภาพของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ เช่น Phenylbutanoids, Curcuminoids และ Terpenoids ซึ่งมีบทบาทในอุตสาหกรรมยา เครื่องสำอาง และผลิตภัณฑ์เสริมอาหาร การเลือกใช้วิธีสกัดที่เหมาะสมจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของสารสำคัญ โดยกระบวนการสกัดและการควบคุมคุณภาพสามารถแบ่งออกเป็นขั้นตอนดังนี้

วิธีการสกัดสารจากไพล

การสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent Extraction) การสกัดสารจากไพลด้วยตัวทำละลาย เป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ตัวทำละลายที่นิยมใช้ ได้แก่ เฮกเซน (Hexane), คลอโรฟอร์ม (Chloroform), เมทานอล (Methanol) และเอทานอล (Ethanol) โดยตัวทำละลายแต่ละชนิดจะมี ประสิทธิภาพในการสกัดสารที่แตกต่างกัน เช่น เฮกเซนใช้สกัด Phenylbutanoids ที่ละลายในไขมัน ส่วนเมทานอลใช้สกัด Curcuminoids ที่ละลายในน้ำ กระบวนการนี้มักดำเนินการโดยการหมักเหง้าไพลแห้งในตัวทำละลายที่เลือก จากนั้นนำสารละลายไประเหยแยกตัวทำละลายออกเพื่อให้ได้สารสกัดเข้มข้น (Sanatombi & Sanatombi, 2017)

การกลั่นด้วยน้ำ (Steam Distillation) วิธีนี้ใช้สำหรับสกัดน้ำมันหอมระเหยจากไพลโดยใช้ไอน้ำพาสารสำคัญออกจากเหง้าไพล แล้วควบแน่นไอน้ำเพื่อแยกน้ำมันหอมระเหยที่มีสารสำคัญ เช่น Terpinen-4-ol และ Sabinene ซึ่งมีฤทธิ์ด้านการอักเสบและช่วยบรรเทาอาการปวดกล้ามเนื้อ (Musdja, 2021)

การสกัดเย็น (Cold Press Extraction) วิธีนี้ไม่ใช้ความร้อน จึงช่วยรักษาสารสำคัญที่ไวต่ออุณหภูมิ เช่น Phenylbutanoids และน้ำมันหอมระเหย โดยกระบวนการนี้เหมาะสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางที่ต้องการความบริสุทธิ์และคงประสิทธิภาพของสารสำคัญ (Worasing et al., 2023)

การสกัดด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง (Ultrasonic Extraction) ใช้คลื่นเสียงความถี่สูงเพื่อกระตุ้นให้เซลล์ของเหง้าไพลแตกตัว ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัดสารสำคัญ วิธีนี้เหมาะกับการสกัด Curcuminoids และ Phenylbutanoids โดยสามารถลดเวลาในการสกัดและเพิ่มปริมาณสารสำคัญได้อย่างมีนัยสำคัญ

การควบคุมคุณภาพของสารสกัดจากไพล

1. **การตรวจสอบลักษณะทางกายภาพ** สารสกัดจากไพลควรมีสีเหลืองอมน้ำตาลที่สอดคล้องกับสารออกฤทธิ์ เช่น Phenylbutanoids และ Curcuminoids ต้องมีกลิ่นหอมเฉพาะตัวของไพลและปราศจากสิ่งปนเปื้อน
2. **การตรวจสอบปริมาณสารออกฤทธิ์** ใช้เทคนิค HPLC (High-Performance Liquid Chromatography) เพื่อตรวจสอบปริมาณ compound D, DMPBD และ Curcuminoids ให้ตรงตามมาตรฐานกำหนด (Sanatombi & Sanatombi, 2017)
3. **การตรวจสอบความบริสุทธิ์** ตรวจวัดปริมาณเถ้ารวม (ไม่เกิน 9.0% w/w) และเถ้าที่ไม่ละลายในกรด (ไม่เกิน 3.0% w/w) รวมถึงปริมาณน้ำในสารสกัด (ไม่เกิน 13.0% w/w) เพื่อป้องกันการเจริญเติบโตของเชื้อรา (Devkota et al., 2021)

4. การตรวจสอบปริมาณน้ำมันหอมระเหย ใช้เทคนิค GC-MS (Gas Chromatography-Mass Spectrometry) ตรวจสอบปริมาณ Terpinen-4-ol และ Sabinene ซึ่งต้องไม่น้อยกว่า 2.0% v/w ของน้ำหนักแห้งแห้ง (Worasing et al., 2023)
5. การตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมและจุลินทรีย์ ตรวจสอบการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ เช่น แบคทีเรียและเชื้อรา ด้วยวิธีเพาะเลี้ยงเชื้อ เพื่อให้มั่นใจว่าสารสกัดมีความปลอดภัย (Kaewchoothong, 2009)

กระบวนการสกัดและการควบคุมคุณภาพของไพลเป็นขั้นตอนที่สำคัญในการรักษาคุณภาพและความปลอดภัยของสารสกัด การเลือกใช้วิธีการสกัดที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับประเภทของสารออกฤทธิ์ที่ต้องการสกัด การควบคุมคุณภาพต้องอาศัยมาตรฐานทางวิทยาศาสตร์เพื่อให้มั่นใจว่าสารสกัดที่ได้มีความบริสุทธิ์ ปลอดภัย และมีปริมาณสารสำคัญที่เพียงพอสำหรับการใช้ในอุตสาหกรรมยาและเครื่องสำอาง

2.2 ภาพรวมของวิธีการสกัดที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

การสกัดที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (Green Extraction) เป็นแนวทางที่ได้รับการพัฒนาเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากพืชหรือวัตถุดิบธรรมชาติ โดยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของผู้ปฏิบัติงาน แนวทางนี้เน้นการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ ลดการใช้ตัวทำละลายที่เป็นพิษ และเพิ่มความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้าย (Chemat et al., 2012)

วิธีการสกัดแบบดั้งเดิม เช่น การใช้เฮกเซนหรือเมทานอล มักก่อให้เกิดปัญหาทางสิ่งแวดล้อมและสุขภาพ เช่น การปนเปื้อนของสารพิษและการใช้พลังงานสูง นอกจากนี้ กระบวนการที่ใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ยังอาจทำให้สารสำคัญบางชนิดเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนหรือการออกซิเดชัน (Armenta et al., 2019) เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว แนวทาง Green Extraction ได้รับการพัฒนาโดยใช้เทคโนโลยีที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสกัด ลดการใช้ตัวทำละลายที่เป็นพิษ และยังสามารถรักษาคุณสมบัติของสารสำคัญในกระบวนการสกัดได้ รูปการณ์ทำงานของแต่ละวิธีการสกัดในตารางที่ 2.1

2.2.1 เทคโนโลยีการสกัดที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

การสกัดด้วยของไหลวิกฤติยิ่งยวด (Supercritical Fluid Extraction: SFE)

เทคนิค SFE ใช้ของไหลที่อยู่ในสถานะวิกฤติยิ่งยวด เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ซึ่งมีคุณสมบัติคล้ายของเหลวและก๊าซ สามารถแทรกซึมเข้าไปในเซลล์พืชได้ดี ทำให้สามารถดึงสารสำคัญออกมาได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยไม่ต้องใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ที่เป็นพิษ อีกทั้งยังช่วยรักษาสารออก

ฤทธิ์ที่ไวต่อความร้อน เช่น น้ำมันหอมระเหยและสารต้านอนุมูลอิสระ (Picot-Allain et al., 2021) ข้อดีของวิธีนี้คือสามารถนำ CO₂ กลับมาใช้ใหม่ ลดการเกิดของเสีย และช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

การสกัดด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง (Ultrasound-Assisted Extraction: UAE)

เทคนิค UAE ใช้พลังงานจากคลื่นเสียงความถี่สูงเพื่อกระตุ้นการซึมผ่านของตัวทำละลายเข้าสู่โครงสร้างพืช ทำให้สามารถสกัดสารออกฤทธิ์ได้รวดเร็วขึ้นและลดการใช้ตัวทำละลาย UAE มีประสิทธิภาพสูงในการสกัดสารต้านอนุมูลอิสระและสารสกัดจากสมุนไพร อีกทั้งยังสามารถใช้ร่วมกับสารช่วยละลาย เช่น ไซโคลเด็กซ์ทรีน (Cyclodextrin) เพื่อเพิ่มปริมาณสารสกัดที่ได้ (Ameer et al., 2017)

การสกัดด้วยไมโครเวฟ (Microwave-Assisted Extraction: MAE)

MAE ใช้พลังงานจากไมโครเวฟเพื่อให้ความร้อนแก่ตัวทำละลายและวัสดุพืช ช่วยเพิ่มอัตราการสกัดสารออกฤทธิ์ ลดระยะเวลาการสกัด และลดการใช้พลังงาน วิธีนี้สามารถควบคุมอุณหภูมิและพลังงานได้อย่างแม่นยำ ทำให้ลดความเสี่ยงในการเสื่อมสภาพของสารออกฤทธิ์ และช่วยลดการใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ (Chemat et al., 2012)

การสกัดด้วยของเหลวแรงดันสูง (Pressurized Liquid Extraction: PLE)

PLE ใช้ตัวทำละลายภายใต้อุณหภูมิและความดันสูง ซึ่งช่วยเพิ่มการซึมผ่านของตัวทำละลายเข้าสู่เนื้อเยื่อพืช ทำให้สามารถดึงสารออกฤทธิ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ กระบวนการนี้สามารถใช้ร่วมกับตัวทำละลายที่ไม่เป็นพิษ เช่น น้ำ หรือเอทานอล ช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและเพิ่มความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์ (Armenta et al., 2019)

การสกัดด้วยไซโคลเด็กซ์ทรีนช่วย (Cyclodextrin-Assisted Extraction: CAE)

CAE เป็นเทคนิคที่ใช้ไซโคลเด็กซ์ทรีน ซึ่งเป็นโอลิโกแซคคาไรด์ที่สามารถสร้างโครงสร้างคอมเพล็กซ์กับสารออกฤทธิ์ที่มีคุณสมบัติไม่ละลายในน้ำ ทำให้สามารถสกัดสารได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยไม่ต้องใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ที่เป็นพิษ นอกจากนี้ ไซโคลเด็กซ์ทรีนยังช่วยเพิ่มความคงตัวของสารสำคัญและลดการสลายตัวของสารออกฤทธิ์ในกระบวนการสกัด (Cai et al., 2018; Kfoury & Fourmentin, 2024)

2.2.2 ตัวทำละลายที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

ตัวทำละลายที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (Green Solvents) เป็นปัจจัยสำคัญของ Green Extraction เนื่องจากช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและความเสี่ยงต่อสุขภาพของมนุษย์ ตัวทำ

ละลายเหล่านี้น่าจะมีคุณสมบัติที่สำคัญ เช่น สามารถย่อยสลายได้ ปลอดภัย และนำกลับมาใช้ใหม่ได้ (Lajoie et al., 2022)

ประเภทของตัวทำละลายที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

น้ำ (Water) น้ำถือเป็นตัวทำละลายที่ปลอดภัยที่สุด เนื่องจากไม่มีพิษและสามารถใช้ได้กับกระบวนการสกัดที่ต้องการความอ่อนโยน อย่างไรก็ตาม น้ำมักมีข้อจำกัดในการละลายสารไฮโดรโฟบิก จึงนิยมใช้ร่วมกับสารช่วยละลาย เช่น โซโคเลเด็กซ์ทรีน (Cai et al., 2018)

เอทานอล (Ethanol) เอทานอลเป็นตัวทำละลายที่นิยมใช้เนื่องจากสามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ และได้รับการยอมรับว่าปลอดภัยในอุตสาหกรรมอาหารและยา สามารถใช้ร่วมกับน้ำเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดของสารที่มีความเป็นขี้และไม่มีขี้ (Lajoie et al., 2022)

ตัวทำละลายยูเทคติกแบบลึก (Deep Eutectic Solvents: DES) DES เป็นสารละลายที่ประกอบด้วยส่วนผสมของสารประกอบที่สร้างพันธะไฮโดรเจน ทำให้สามารถละลายสารออกฤทธิ์ได้ดี อีกทั้งยังสามารถออกแบบให้มีคุณสมบัติเฉพาะตัวสำหรับสารออกฤทธิ์แต่ละชนิดได้ (Ameer et al., 2017)

ตัวทำละลายวิกฤตยิ่งยวด (Supercritical Fluids) โดยเฉพาะ Supercritical CO₂ ซึ่งสามารถสกัดสารออกฤทธิ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยไม่ก่อให้เกิดของเสียที่เป็นพิษ นอกจากนี้ CO₂ ยังสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้หลายครั้ง (Picot-Allain et al., 2021)

ไซโคลเด็กซ์ทรีน (Cyclodextrins) ไซโคลเด็กซ์ทรีนช่วยเพิ่มความสามารถในการละลายของสารไฮโดรโฟบิก และลดการใช้ตัวทำละลายที่เป็นอันตราย การใช้ไซโคลเด็กซ์ทรีนร่วมกับตัวทำละลายที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เช่น น้ำ หรือเอทานอล สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการสกัดและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Jug & Mura, 2018)

ข้อดีของตัวทำละลายที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

ปลอดภัยและไม่เป็นพิษ ตัวทำละลายที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เช่น น้ำ เอทานอล และ CO₂ มีความปลอดภัยสูงและไม่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ (Lajoie et al., 2022)

สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ตัวทำละลายเหล่านี้สามารถสลายตัวได้เองในธรรมชาติ ลดการสะสมของสารเคมีที่เป็นพิษ (Ameer et al., 2017)

สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ เช่น CO₂ ที่ใช้ในกระบวนการสกัดวิกฤตยิ่งยวดสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ ทำให้มีความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (Picot-Allain et al., 2021)

เพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัด ตัวทำละลายเหล่านี้ช่วยให้สามารถสกัดสารออกฤทธิ์จากพืชได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ลดการสูญเสียสารสำคัญ (Chemat et al., 2012)

ตัวทำละลายที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมีบทบาทสำคัญในการพัฒนากระบวนการสกัดที่ยั่งยืนและปลอดภัย การเลือกใช้ตัวทำละลายที่เหมาะสมจะช่วยลดผลกระทบต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม ในขณะที่ยังสามารถคงไว้ซึ่งคุณภาพและประสิทธิภาพของสารออกฤทธิ์ที่สกัดได้

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพและความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมของเทคนิคการสกัดต่างๆ

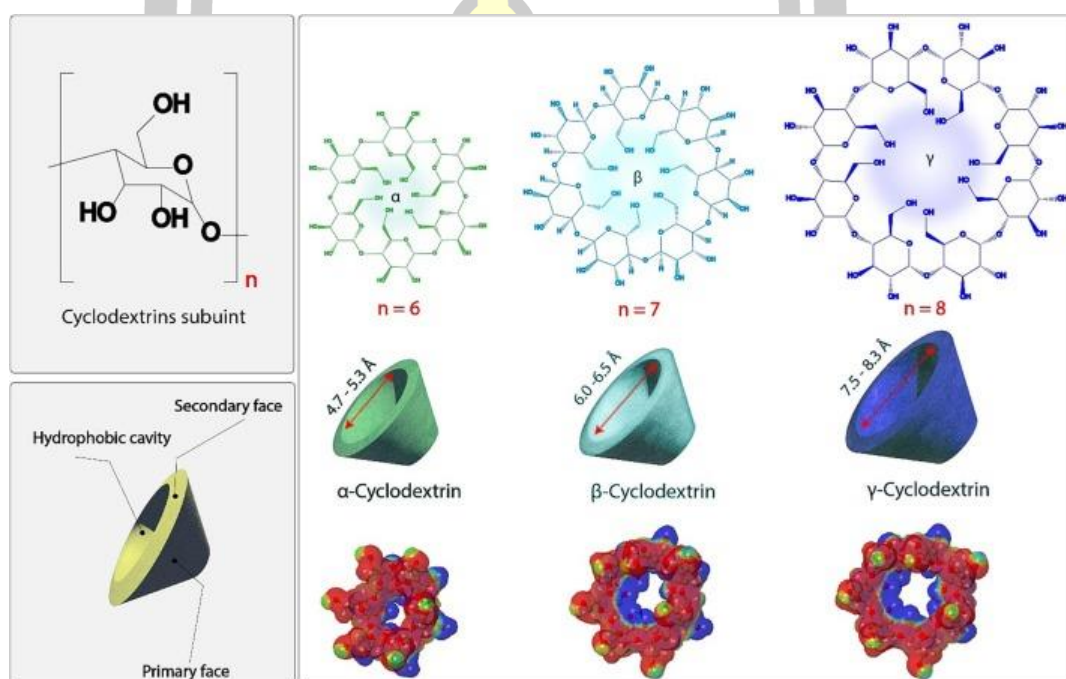
เทคนิคการสกัด	ประสิทธิภาพในการสกัดสาร	ความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม	การรักษาสารสำคัญ
Supercritical Fluid Extraction (SFE)	สูง	ดี	เหมาะสำหรับสารไวต่อความร้อน
Ultrasound-Assisted Extraction (UAE)	ปานกลาง	ดี	อาจมีปัญหการสลายตัวของสารในบางกรณี
Microwave-Assisted Extraction (MAE)	ปานกลาง	ดี	มีความเสี่ยงต่อการสลายตัวของสาร
Cyclodextrin-assisted Extraction (CAE)	สูง	ดีเยี่ยม	ช่วยเพิ่มความเสถียรของสารและรักษาคุณภาพได้ดีเยี่ยม

2.3 ไซโคลเด็กซ์ทรีน (Cyclodextrins)

ไซโคลเด็กซ์ทรีน (CDs) เป็นโอลิโกแซ็กคาไรด์เชิงซ้อนที่ประกอบด้วยหน่วยย่อยของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -(1,4)-glycosidic โดยมีโครงสร้างเป็นวงแหวนและมีโพรงภายในที่สามารถกักเก็บสารประกอบที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำได้ (Loftsson & Duchêne, 2007; Rajewski & Stella, 1996) α -(1,4)-glycosidic โดยมีโครงสร้างเป็นวงแหวนและมีโพรงภายในที่สามารถกักเก็บสารประกอบที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำได้ CDs ถูกสังเคราะห์ขึ้นจากแป้งโดยเอนไซม์ไซโคลเด็กซ์ทรีน ไกลโคซิลทรานสเฟอเรส (Cyclodextrin glycosyltransferase, CGTase) ซึ่งทำให้เกิดผลิตภัณฑ์หลัก ได้แก่ Alpha-Cyclodextrin (α -CD), Beta-Cyclodextrin (β -CD) และ Gamma-Cyclodextrin (γ -CD) ซึ่งแตกต่างกันตามจำนวนหน่วยของกลูโคสในโครงสร้างวงแหวน (Loftsson & Duchêne, 2007; Rajewski & Stella, 1996)

2.3.1 โครงสร้างของไซโคลเด็กซ์ทริน

ไซโคลเด็กซ์ทรินมีโครงสร้างเป็นโพรงทรงกรวย (torus-shaped cavity) (ภาพที่ 2.6) ที่ประกอบด้วยด้านในที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำ และด้านนอกที่มีหมู่ไฮดรอกซิลซึ่งทำให้ละลายน้ำได้ดี ความแตกต่างระหว่าง α -CD, β -CD และ γ -CD อยู่ที่ขนาดของโพรง โดย α -CD มีขนาดเล็กที่สุด (6 หน่วยกลูโคส), β -CD มีขนาดปานกลาง (7 หน่วยกลูโคส) และ γ -CD มีขนาดใหญ่ที่สุด (8 หน่วยกลูโคส) ซึ่งส่งผลต่อความสามารถในการกักเก็บโมเลกุลของแขกที่มีขนาดแตกต่างกัน นอกจากนี้ โครงสร้างของไซโคลเด็กซ์ทรินสามารถปรับเปลี่ยนได้โดยการเติมหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ เพื่อเพิ่มความสามารถในการละลายน้ำและลดการตกผลึกของโมเลกุลพื้นฐาน (Del Valle, 2004)



ภาพที่ 2.6 โครงสร้างของหน่วยย่อยกลูโคสในไซโคลเด็กซ์ทรินขนาดและโครงสร้างของโพรงภายใน (Kali, G et al., 2024)

2.3.2 สมบัติทางกายภาพและเคมีของไซโคลเด็กซ์ทรินและอนุพันธ์ (Cyclodextrins and Their Derivatives)

ไซโคลเด็กซ์ทรินสามารถปรับเปลี่ยนโครงสร้างเพื่อเพิ่มความสามารถในการละลายน้ำและการกักเก็บสารออกฤทธิ์ (Stella & He, 2008) โดยการดัดแปลงทางเคมี เช่น การเติมหมู่ไฮดรอกซีโพรพิล (Hydroxypropyl-Beta-Cyclodextrin, HP- β -CD), เมทิล (Methyl-Beta-Cyclodextrin, M- β -CD) และซัลโฟบิวทิลอีเทอร์ (Sulfobutylether-Beta-Cyclodextrin, SBE- β -CD) การปรับ

โครงสร้างนี้ช่วยเพิ่มการละลายของ CDs ในสารละลายน้ำ และสามารถเพิ่มเสถียรภาพของสารออกฤทธิ์ที่มีความไวต่อสิ่งแวดล้อม เช่น แสง, ความร้อน, และออกซิเดชัน อนุพันธ์ของไซโคลเด็กซ์ทรีนยังช่วยเพิ่มความสามารถในการละลายของสารที่มีขั้วต่ำ รวมทั้งช่วยป้องกันการตกผลึกในบางระบบเคมี นอกจากนี้ อนุพันธ์ที่ถูกปรับปรุงเหล่านี้ยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการนำส่งสารสำคัญไปยังเซลล์เป้าหมายในร่างกาย ทำให้เกิดการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมยาทางเภสัชกรรมและเครื่องสำอางอย่างแพร่หลาย (Stella & He, 2008) แสดงสรุปผลคุณสมบัติของ CDs ชนิดต่างๆ ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ตารางคุณสมบัติของ Cyclodextrins และอนุพันธ์ในการช่วยในการสกัด

Cyclodextrin/Derivatives	ขนาดโพรงภายใน (Å)	ความสามารถในการละลายน้ำ (g/100 mL ที่ 25°C)	ความเสถียร	การสร้างโครงสร้างรวม (Inclusion Complex)	การใช้งานในกระบวนการสกัด
α -cyclodextrin (ACD)	4.7-5.3	14.5	สูง	เหมาะสำหรับโมเลกุลขนาดเล็ก เช่น โพลีเอทิลีนไกลคอล (PEG)	สกัดสารขนาดเล็กที่ไม่ละลายน้ำ แต่มีความเป็นขั้ว
β -cyclodextrin (BCD)	6.0-6.5	1.85	ปานกลาง	เหมาะสำหรับโมเลกุลที่มีวงแหวนอะโรมาติก เช่น ฟีนอล	เหมาะสำหรับการสกัดสารที่ไม่ละลายน้ำ เช่น ฟลาโวนอยด์
γ -cyclodextrin (GCD)	7.5-8.3	23.2	สูง	เหมาะสำหรับโมเลกุลขนาดใหญ่ เช่น สเตอรอยด์	ช่วยสกัดสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ เช่น สเตอรอยด์
methyl- β -cyclodextrin (MBCD)	6.0-6.5	>50	สูง	เสริมสร้างความสามารถในการละลายน้ำและเสถียรภาพของโมเลกุล	ช่วยสกัดสารที่ไม่ละลายน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น
hydroxypropyl- β -cyclodextrin (HPBCD)	6.0-6.5	>60	สูง	เพิ่มความสามารถในการละลายน้ำและลดการตกผลึก	เหมาะสำหรับสกัดสารที่ไม่เสถียรและต้องการเพิ่มความเสถียร
sulfobutylether- β -cyclodextrin (SBE-BCD)	6.0-6.5	>50	สูงมาก	เพิ่มความเสถียรและละลายน้ำดีมาก	ใช้ในกระบวนการสกัดสารที่ต้องการความปลอดภัยสูง เช่น ยาฉีด

2.3.3 ความสามารถในการก่อโครงสร้างรวม (Inclusion Complex)

ไซโคลเด็กซ์ทรีนสามารถก่อโครงสร้างรวม (Inclusion Complex) กับโมเลกุลของสารที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำผ่านปฏิสัมพันธ์แบบ Van der Waals, แรงไฮโดรโฟบิก และพันธะไฮโดรเจน ส่งผลให้สามารถเพิ่มความสามารถในการละลายน้ำของสารสำคัญที่มีความไม่เสถียร หรือมีความสามารถในการละลายน้ำต่ำแต่มีฤทธิ์ทางชีวภาพสูง การก่อโครงสร้างรวมนี้ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางเภสัช

จลนศาสตร์ของสารสำคัญ รวมถึงสามารถลดอัตราการสลายตัว และยืดอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ยาและเครื่องสำอางที่มีองค์ประกอบของสารที่ไวต่อสภาวะแวดล้อม (Loftsson & Duchêne, 2007)

ในทางปฏิบัติ การก่อโครงสร้างร่วมสามารถใช้ได้กับสารหลายชนิด เช่น สารต้านอนุมูลอิสระ, สารกันแดด, สารต้านจุลชีพ และสารต้านอักเสบ ทำให้ไซโคลเด็กซ์ทรินมีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมอาหาร ยา และเวชสำอาง อีกทั้งยังช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ให้อยู่ในรูปแบบที่ใช้งานได้ง่ายขึ้น (Del Valle, 2004)

2.3.4 การศึกษาด้านความปลอดภัยและความเป็นพิษของไซโคลเด็กซ์ทริน

ไซโคลเด็กซ์ทริน (CDs) ถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมยา อาหาร และเครื่องสำอางอย่างกว้างขวาง เนื่องจากความสามารถในการช่วยเพิ่มความคงตัวของสารออกฤทธิ์ ลดการเสื่อมสภาพจากสภาวะแวดล้อม เช่น แสง ความร้อน และการออกซิเดชัน รวมถึงเพิ่มความสามารถในการละลายของสารในน้ำ อย่างไรก็ตาม มีการศึกษาถึงความปลอดภัยและความเป็นพิษของ CDs ในหลายแง่มุมเพื่อให้มั่นใจว่าสามารถใช้ได้อย่างปลอดภัยในผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ

การศึกษาในสัตว์ทดลองพบว่า CDs ส่วนใหญ่มีค่าความเป็นพิษต่ำและสามารถขับออกจากร่างกายผ่านทางปัสสาวะได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Rajewski & Stella, 1996; Stella & He, 2008) นอกจากนี้ การทดลองในมนุษย์ยังแสดงให้เห็นว่าปริมาณ CDs ในระดับที่เหมาะสมไม่ก่อให้เกิดผลข้างเคียงที่เป็นอันตราย อย่างไรก็ตาม การใช้ไซโคลเด็กซ์ทรินในปริมาณสูงอาจมีผลกระทบต่อระบบไต เช่น การเกิด nephrotoxicity โดยเฉพาะในกรณีของ β -CD ที่ยังไม่ได้ปรับปรุงโครงสร้างในทางตรงกันข้าม อนุพันธ์อย่าง HP- β -CD และ SBE- β -CD ได้รับการพิสูจน์ว่ามีความปลอดภัยมากกว่าและถูกใช้อย่างแพร่หลายในสูตรตำรับยา เพื่อเพิ่มความสามารถในการละลายของสารออกฤทธิ์และลดความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้น

ในอนาคตการศึกษาเพิ่มเติมในด้านความปลอดภัยของ CDs อาจเน้นการตรวจสอบผลกระทบระยะยาวจากการใช้งานต่อเนื่อง และประเมินขนาดที่เหมาะสมในผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เพื่อให้มั่นใจได้ว่าผู้บริโภคสามารถใช้ผลิตภัณฑ์ที่มีส่วนผสมของไซโคลเด็กซ์ทรินได้อย่างปลอดภัยและมีประสิทธิภาพสูงสุด

ไซโคลเด็กซ์ทรินเป็นสารตัวช่วยที่มีบทบาทสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพของสารสกัดจากพืชสมุนไพร โดยสามารถก่อโครงสร้างร่วมกับสารออกฤทธิ์ ช่วยเพิ่มความคงตัว การละลาย และการนำส่งสารสำคัญ นอกจากนี้ อนุพันธ์ของ CDs ยังช่วยลดข้อจำกัดของ β -CD ดั้งเดิม ทำให้สามารถนำไปใช้ได้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมยา อาหารเสริม และเครื่องสำอาง การศึกษาเพิ่มเติม

เกี่ยวกับกลไกของไซโคลเด็กซ์ทรินในกระบวนการก่อโครงสร้างร่วม รวมถึงผลกระทบทางชีวภาพ จะช่วยให้การนำไปใช้มีประสิทธิภาพและปลอดภัยมากยิ่งขึ้น (Loftsson & Duchène, 2007; Stella & He, 2008)

2.4 การสกัดโดยใช้ไซโคลเด็กซ์ทรินช่วย (Cyclodextrin-assisted Extraction)

การสกัดสารออกฤทธิ์ด้วย CDs เป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมเนื่องจากช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของสารที่มีความไม่ละลายน้ำหรือมีความไวต่อปัจจัยภายนอก CDs และอนุพันธ์ของมันสามารถเพิ่มการละลายน้ำของสาร เปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีกายภาพ และป้องกันการเสื่อมสภาพของสารเป้าหมาย นอกจากนี้ เทคนิคนี้ยังเป็นที่ยอมรับในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อาหาร ยา และเครื่องสำอาง ซึ่งต้องการความเสถียรและคุณภาพที่สูงขึ้นของสารออกฤทธิ์ (Cai et al., 2018; Matencio et al., 2020; Szente & Szejtli, 2004; Schwarz et al., 2017)

หลักการของการสกัดโดยใช้ไซโคลเด็กซ์ทรินช่วย

กลไกหลักของการสกัดโดยใช้ CDs อาศัยความสามารถของโครงสร้างโมเลกุลที่มีโพรงภายใน ซึ่งสามารถโอบล้อมโมเลกุลของสารเป้าหมายที่มีลักษณะไม่ชอบน้ำให้สามารถละลายในน้ำได้ดีขึ้น กระบวนการนี้ยังช่วยปกป้องสารออกฤทธิ์จากปัจจัยที่อาจทำให้เสื่อมสภาพ เช่น แสง ออกซิเจน และ อุณหภูมิที่สูง นอกจากนี้ CDs ยังช่วยให้สารที่ถูกสกัดมีความเสถียรสูงขึ้น ส่งผลต่อการนำไปใช้ในกระบวนการพัฒนาและผลิตภัณฑ์ในภาคอุตสาหกรรม (Szente & Szejtli, 2004; Schwarz et al., 2017)

ประเภทของ CDs ที่เหมาะสมกับการสกัดขึ้นอยู่กับขนาดและโครงสร้างของสารเป้าหมาย ACD มักใช้สำหรับโมเลกุลขนาดเล็กที่มีความไม่ละลายน้ำ เช่น ฟีนอล ในขณะที่ BCD เหมาะกับสารที่มีโครงสร้างวงแหวน เช่น ฟลาโวนอยด์ ส่วน GCD ใช้สำหรับสารโมเลกุลขนาดใหญ่ เช่น สเตอรอยด์ อนุพันธ์ของ CDs เช่น HPBCD และ SBE-BCD ช่วยเพิ่มการละลายน้ำและเพิ่มความคงตัวของสาร ทำให้สามารถนำไปใช้ได้อย่างกว้างขวางมากขึ้น (Stella & Rajewski, 2020) กระบวนการสกัดประกอบด้วยขั้นตอนหลัก ได้แก่ การเตรียมสารละลาย CDs ให้มีความเข้มข้นเหมาะสม การนำ CDs ไปทำปฏิกิริยากับสารเป้าหมายผ่านกระบวนการสกัดทางกายภาพหรือเคมี และการแยกสารออกฤทธิ์ที่ถูกตรึงอยู่ใน CDs ออกมาในรูปแบบที่บริสุทธิ์เพื่อนำไปใช้ต่อไป (Davis & Brewster, 2004)

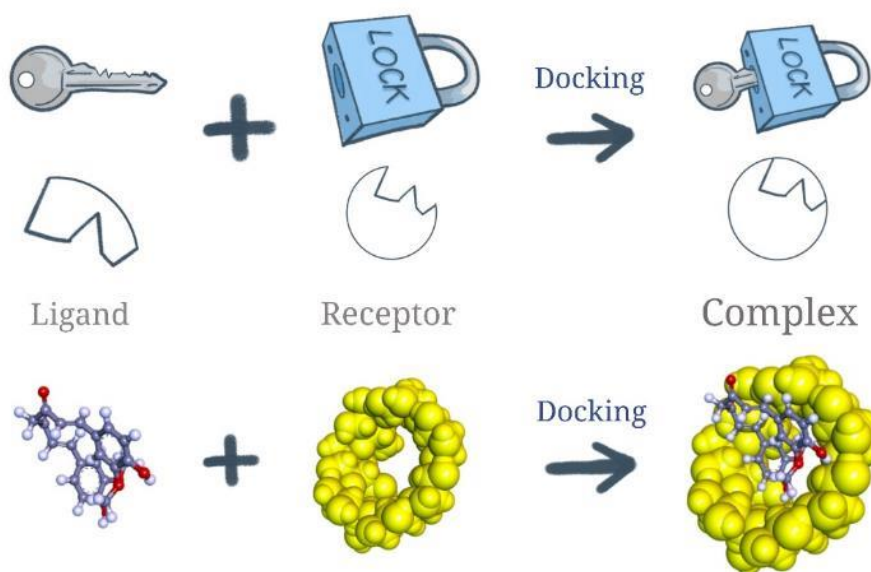
2.5 การใช้ Molecular Docking ในการวิเคราะห์การจับตัวของสารออกฤทธิ์

Molecular Docking เป็นกระบวนการคำนวณเชิงโครงสร้างที่ใช้เพื่อทำนายปฏิสัมพันธ์ระหว่างโมเลกุลขนาดเล็ก (ligand) กับโมเลกุลขนาดใหญ่ (receptor) โดยเฉพาะในกรณี ligand

เป็นสารประกอบที่เราสนใจ เช่น ยาหรือสารออกฤทธิ์จากพืช และ receptor มักเป็นโปรตีนหรือเอนไซม์ การทำ Molecular Docking ช่วยทำนายทิศทางและการจัดเรียงตัวของโมเลกุลเหล่านี้เพื่อค้นหาว่า ligand สามารถจับตัวกับ receptor ได้ดีที่สุดอย่างไร โดยปกติจะมีการคำนวณพลังงานการจับตัวเพื่อประเมินความเสถียรของโครงสร้างที่เกิดขึ้น (Fan et al., 2019)

2.5.1 หลักการพื้นฐานของ Molecular Docking

ทฤษฎี “Lock-and-Key” ที่ Fischer เสนอ เปรียบ receptor เป็น “แม่กุญแจ” และ ligand เป็น “กุญแจ” ที่จะจับกันได้เมื่อมีรูปร่างที่เข้ากันอย่างเหมาะสม ในแบบจำลองนี้ receptor และ ligand ถูกมองว่าเป็นโครงสร้างที่แข็งและไม่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ (ภาพที่ 2.7) (Agarwal & Mehrotra, 2016) อย่างไรก็ตาม ทฤษฎี “Induced Fit” ของ Koshland ขยายแนวคิดนี้โดยเสนอว่า ligand และ receptor สามารถปรับเปลี่ยนโครงสร้างให้พอดีกับการจับตัวกันได้ ซึ่งได้รับการสนับสนุนโดยหลักฐานจากการศึกษา X-ray Crystallography (Pagadala et al., 2017)



ภาพที่ 2.7 แผนภาพเชิงแนวคิดของทฤษฎีล็อคและกุญแจในกระบวนการ Docking ระหว่าง ligand และ receptor

การคำนวณพลังงานการจับตัวเป็นองค์ประกอบสำคัญในการทำ Molecular Docking พลังงานนี้ประกอบด้วยพลังงาน van der Waals, พลังงานไฟฟ้าสถิต และพลังงานจากพันธะไฮโดรเจน ซึ่งช่วยระบุว่าการจับตัวของ ligand และ receptor มีความเสถียรเพียงใด (Li et al., 2022)

2.5.2 กระบวนการ Molecular Docking

กระบวนการ Molecular Docking เริ่มต้นจากการเตรียมโครงสร้างโมเลกุลของ ligand และ receptor โดยซอฟต์แวร์เฉพาะทาง เช่น AutoDock Vina, DOCK, FlexX หรือ Glide ขั้นตอนนี้รวมถึงการเติมไฮโดรเจนและการคำนวณประจุของอะตอม (Mazurek et al., 2021) ซอฟต์แวร์ Molecular Docking มีหลายประเภท โดยสามารถเลือกใช้ตามความต้องการที่ต่างกัน เช่น

Molecular Docking แบบ rigid docking ซึ่ง receptor และ ligand ถูกมองว่าเป็นโครงสร้างที่แข็ง ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ เหมาะสำหรับระบบที่มีโครงสร้างแน่นอนและต้องการความเร็วในการคำนวณ

Flexible docking ซึ่ง ligand สามารถหมุนและปรับโครงสร้างเพื่อให้จับกับ receptor ได้ดีขึ้น เหมาะสำหรับการศึกษาการจับตัวของโมเลกุลที่อาจมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง

Covalent docking ซึ่งใช้เมื่อนักวิจัยต้องการศึกษาปฏิสัมพันธ์ของ ligand ที่สามารถสร้างพันธะโควาเลนต์กับ receptor ได้

Blind docking ซึ่งเป็นการค้นหาตำแหน่งการจับตัวของ ligand โดยไม่ระบุตำแหน่ง binding site ล่วงหน้า เหมาะสำหรับการศึกษาสารประกอบใหม่ที่ยังไม่มีข้อมูลเกี่ยวกับบริเวณจับตัวของ receptor

หลังจากเตรียมโครงสร้างแล้ว โปรแกรมจะทำการคำนวณการจับตัวของ ligand และ receptor ในหลายรูปแบบ (conformation) โดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ในการประเมินพลังงานการจับตัว ซอฟต์แวร์ Molecular Docking จะให้ผลลัพธ์ในรูปแบบโครงสร้างสามมิติพร้อมค่าคะแนน binding affinity score ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการจับตัวของ ligand และ receptor มีเสถียรภาพมากเพียงใด โมเลกุลที่มีพลังงานการจับตัวต่ำที่สุดจะถือว่าเป็นตัวเลือกที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยและการพัฒนา (Fan et al., 2019)

2.5.3 การใช้ AutoDock Vina ในการทำ Molecular Docking

AutoDock Vina เป็นซอฟต์แวร์ Molecular Docking ที่ได้รับความนิยมในงานวิจัยด้านชีววิทยาและเคมี โดยเฉพาะการออกแบบยาด้วยคอมพิวเตอร์ (Computer-Aided Drug Design, CADD) โปรแกรมนี้ได้รับการพัฒนาต่อยอดจาก AutoDock เพื่อเพิ่มความแม่นยำและความเร็วในการคำนวณ (Fan et al., 2019; Pagadala et al., 2017)

AutoDock Vina ใช้อัลกอริทึมที่พัฒนามาจาก AutoDock เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการคำนวณพลังงานการจับตัวระหว่าง ligand และ receptor โดยใช้ genetic algorithm (GA) และ

local search optimization ทำให้สามารถค้นหา conformations ที่เหมาะสมที่สุดได้รวดเร็วขึ้น โปรแกรมนี้ยังสามารถรองรับการทำ Flexible Docking ซึ่งช่วยให้ ligand สามารถหมุนและปรับตัวให้เข้ากับ receptor ได้ดีขึ้น

กระบวนการทำงานของ AutoDock Vina

เตรียมโครงสร้างโมเลกุล Ligand และ receptor จะต้องได้รับการเตรียมโดยการเติมไฮโดรเจน กำหนดสถานะประจุ และแปลงไฟล์ให้อยู่ในรูปแบบที่ซอฟต์แวร์สามารถใช้ได้ (เช่น PDBQT)

กำหนดพื้นที่การจับตัว (Grid Box) นักวิจัยต้องกำหนดพื้นที่ที่ ligand จะทำการ Docking บน receptor ซึ่งเรียกว่า search space โดยใช้ค่าพิกัด XYZ เพื่อจำกัดขอบเขตของการคำนวณ

รันการจำลอง Molecular Docking AutoDock Vina จะทำการสุ่มตำแหน่งและทิศทางของ ligand หลาย ๆ แบบ จากนั้นคำนวณพลังงานการจับตัวในแต่ละตำแหน่งเพื่อหาค่า binding affinity ที่ต่ำที่สุด

การวิเคราะห์ผลลัพธ์ โปรแกรมจะให้ค่าคะแนนพลังงาน (binding energy) พร้อมทั้งแสดงโครงสร้างสามมิติของ ligand ที่จับตัวกับ receptor สามารถนำไปวิเคราะห์เพิ่มเติมได้โดยใช้โปรแกรมแสดงผล เช่น PyMOL หรือ Discovery Studio

AutoDock Vina ถูกนำมาใช้ในหลายสาขา เช่น

- **ออกแบบยา (Drug Discovery)** ใช้ทำนายโครงสร้างของโมเลกุลที่สามารถจับกับเอนไซม์เป้าหมายในโรคต่าง ๆ เช่น ยาด้านมะเร็งหรือยาด้านเชื้อไวรัส
- **ชีววิทยาโครงสร้าง (Structural Biology)** ศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างโปรตีนและโมเลกุลขนาดเล็ก
- **วิทยาศาสตร์สมุนไพร (Herbal Drug Research)** ทดสอบว่าสารออกฤทธิ์จากพืชสามารถจับตัวกับเอนไซม์หรือโปรตีนที่เกี่ยวข้องกับกลไกของโรคได้หรือไม่
- **ศึกษาการทำงานของสารเคมีชีวภาพ** ใช้ในการพัฒนาสารที่มีผลต่อเอนไซม์ เช่น Inhibitor หรือ Activator

AutoDock Vina ถือเป็นเครื่องมือสำคัญที่ช่วยให้นักศึกษาทางชีววิทยาโมเลกุลมีประสิทธิภาพและแม่นยำมากขึ้น อีกทั้งยังช่วยลดต้นทุนในการทดลองเชิงปฏิบัติ ทำให้นักวิจัยสามารถทำนายการจับตัวของโมเลกุลต่าง ๆ ได้ก่อนทำการทดลองจริงในห้องปฏิบัติการ (Li et al., 2022)

2.6 การออกแบบการทดลองแบบลำดับขั้น (Sequential Experimental Design)

Sequential Experimental Design เป็นแนวทางที่ใช้ในการออกแบบการทดลองโดยแบ่งกระบวนการออกเป็นลำดับขั้น เพื่อให้สามารถปรับปรุงและปรับแต่งเงื่อนไขการทดลองตามข้อมูลที่ได้รับในแต่ละขั้นตอน การดำเนินการเริ่มต้นจากการทดลองที่มีขอบเขตกว้างและยังไม่เจาะจงปัจจัยที่สำคัญ (เช่น Screening) และพัฒนาไปสู่การทดลองที่ซับซ้อนขึ้นเพื่อลดความไม่แน่นอน และค้นหาสถานะที่เหมาะสมที่สุด (เช่น Optimization) กระบวนการนี้ช่วยให้การทดลองสามารถทำซ้ำได้และให้ผลลัพธ์ที่เชื่อถือได้มากขึ้น (Alaeddini et al., 2013)

2.6.1 ความสำคัญของ Sequential Experimental Design

การออกแบบการทดลองแบบ Sequential ช่วยให้เราสามารถปรับเปลี่ยนแผนการทดลองได้ตามข้อมูลที่ได้รับ ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบที่สำคัญต่อการพัฒนากระบวนการทางวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม โดยเฉพาะในด้านเภสัชกรรม เคมี การเกษตร และอาหาร ซึ่งต้องมีการปรับปรุงกระบวนการเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ การทดลองลักษณะนี้ช่วยลดความเสี่ยงจากการลงทุนที่ไม่จำเป็น และช่วยให้สามารถปรับแต่งปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการได้อย่างแม่นยำยิ่งขึ้น (Jones et al., 2021)

การดำเนินการเริ่มต้นด้วย Scoping Study เพื่อประเมินปัจจัยเบื้องต้นที่อาจมีผลต่อกระบวนการทดลอง ต่อมาคือ Screening Study ซึ่งเป็นกระบวนการคัดกรองเพื่อระบุปัจจัยที่มีอิทธิพลมากที่สุด จากนั้นจึงเข้าสู่ Optimization Study ซึ่งเป็นการศึกษาสถานะที่เหมาะสมของปัจจัยที่คัดเลือกไว้ และในท้ายที่สุด Robustness Study จะช่วยตรวจสอบความเสถียรของกระบวนการภายใต้สถานะที่แตกต่างกันเพื่อให้มั่นใจว่ากระบวนการสามารถดำเนินไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Mäkelä, 2017)

2.6.2 Screening Study

Screening Study เป็นขั้นตอนสำคัญที่ช่วยระบุปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อผลตอบสนองของกระบวนการ การศึกษานี้มีบทบาทสำคัญในการลดความซับซ้อนของกระบวนการทดลองโดยการตัดปัจจัยที่ไม่มีผลกระทบออก และทำให้สามารถจัดสรรทรัพยากรไปยังปัจจัยที่สำคัญได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น วิธีการที่ใช้ในการคัดกรองมักเป็นการออกแบบการทดลองเชิงสถิติ เช่น Factorial Design, Fractional Factorial Design, และ D-Optimal Design (ตารางที่ 2.3) ซึ่งช่วยให้สามารถคัดเลือกปัจจัยที่มีผลกระทบได้อย่างแม่นยำโดยใช้จำนวนการทดลองที่น้อยที่สุด (Jones et al., 2021)

ตารางที่ 2.3 ความแตกต่าง Factorial/Fractional Factorial Design กับ D-Optimal Design

ประเด็น	Factorial Design (Full)	Fractional Factorial Design	D-Optimal Design
จำนวนการทดลอง	สูงมากตามจำนวนปัจจัย (2^n)	ลดจำนวนการทดลอง ลงจาก Full Factorial	สามารถควบคุมให้ใช้การทดลองน้อยที่สุด
ความซับซ้อน	สูง เนื่องจากใช้ทุกการรวมค่าของปัจจัย	ซับซ้อนน้อยกว่า Full Factorial และคัดเฉพาะบางค่า	ต้องใช้อัลกอริทึมที่ซับซ้อนและซอฟต์แวร์ช่วย
การโต้ตอบของปัจจัย	ตรวจสอบการโต้ตอบได้ทั้งหมด	ตรวจสอบบางส่วน	ตรวจสอบบางส่วน ขึ้นกับการออกแบบ
เหมาะสำหรับ	การทดลองที่มีปัจจัยน้อย	การทดลองที่มีปัจจัยมาก และต้องการลดจำนวนการทดลอง	การทดลองที่มีข้อจำกัดด้านทรัพยากร
ข้อดี	ข้อมูลสมบูรณ์ ครอบคลุมทุกการโต้ตอบ	ลดจำนวนการทดลอง และยังคงได้ข้อมูลการโต้ตอบหลัก	ยืดหยุ่นสูงและสามารถกำหนดการทดลองที่เหมาะสมได้
ข้อจำกัด	ใช้ทรัพยากรมาก	อาจมองข้ามปัจจัยบางอย่าง	ไม่ครอบคลุมการโต้ตอบทั้งหมด ต้องการซอฟต์แวร์ช่วย

D-Optimal Design เป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมใน Screening Study เนื่องจากมีความยืดหยุ่นสูงและสามารถใช้ได้กับระบบที่มีข้อจำกัดด้านทรัพยากรและงบประมาณ วิธีการนี้เลือกชุดของการทดลองที่ให้ข้อมูลสูงสุดโดยไม่จำเป็นต้องทดสอบทุกค่าของปัจจัยทั้งหมด ทำให้สามารถลดจำนวนการทดลองที่ต้องทำลงได้โดยยังคงรักษาคุณภาพของข้อมูล วิธีการนี้ใช้หลักการของ Determinant-based Criterion เพื่อเพิ่มเสถียรภาพของแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล โดยเน้นการเลือกค่าของปัจจัยที่ช่วยเพิ่มความแม่นยำของการพยากรณ์ผลลัพธ์ (Mäkelä, 2017)

การวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จาก Screening Study มักใช้วิธีทางสถิติ เช่น Analysis of Variance (ANOVA) และ Regression Analysis เพื่อตรวจสอบว่าปัจจัยใดมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อผลตอบสนองของกระบวนการ โดยพิจารณาจากค่า p-value และค่าความแปรปรวนที่วิเคราะห์ผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ปัจจัยที่ไม่มีผลกระทบที่สำคัญจะถูกตัดออก ทำให้สามารถโฟกัสไปที่ปัจจัยหลักที่มีผลจริงต่อกระบวนการและเพิ่มประสิทธิภาพของแบบจำลองที่ใช้ในขั้นตอนต่อไป (Jones et al., 2021)

ผลลัพธ์จาก Screening Study จะถูกนำไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบการทดลองในขั้นตอน Optimization Study เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของกระบวนการ วิธีการที่ใช้ใน Screening Study มีบทบาทสำคัญในการลดข้อผิดพลาดและเพิ่มความแม่นยำของแบบจำลอง ซึ่งเป็นพื้นฐานสำคัญสำหรับการปรับปรุงกระบวนการในระยะยาว (Jones et al., 2021)

2.6.3 Optimization Study หรือ Response Surface Methodology (RSM)

Optimization Study หรือ Response Surface Methodology (RSM) เป็นกระบวนการที่ใช้ในการหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกระบวนการ การศึกษานี้มีบทบาทสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการ ลดของเสีย และช่วยควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ โดย RSM สามารถใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ช่วยทำนายค่าการตอบสนองภายใต้สภาวะต่าง ๆ ได้ (Mäkelä, 2017)

หลักการสำคัญของ RSM คือการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เช่น Polynomial Regression เพื่อตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ควบคุมได้กับค่าการตอบสนองของกระบวนการ วิธีการนี้ช่วยให้สามารถระบุค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยได้อย่างแม่นยำผ่านการสร้างกราฟพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Plot) และแผนที่คอนทัวร์ (Contour Plot) ที่ช่วยให้เห็นแนวโน้มของผลตอบสนองภายใต้เงื่อนไขต่างๆ

การออกแบบการทดลองใน RSM มักใช้ Central Composite Design (CCD) หรือ Box-Behnken Design (BBD) ขึ้นอยู่กับลักษณะของกระบวนการที่ศึกษา (ตารางที่ 2.5) CCD เหมาะสำหรับกรณีที่ต้องการวิเคราะห์ค่าขอบสุดของปัจจัยทั้งหมดและสามารถศึกษาปฏิสัมพันธ์ของปัจจัยได้อย่างละเอียด BBD มีจำนวนการทดลองน้อยกว่า CCD และเหมาะสำหรับกรณีที่มีข้อจำกัดด้านทรัพยากรและต้องการลดความเสี่ยงในการตั้งค่าปัจจัยที่ไม่ปลอดภัย (Jones et al., 2021)



ตารางที่ 2.4 สรุปความแตกต่างของ Central Composite Design (CCD) และ Box-Behnken Design

คุณสมบัติ	Central Composite Design (CCD)	Box-Behnken Design (BBD)
จุดประสงค์	ใช้สำหรับการครอบคลุมขอบเขตปัจจัยที่กว้าง พร้อมกับวิเคราะห์การโค้ง	ใช้สำหรับการลดจำนวนการทดลองในพื้นที่ที่ไม่ต้องการค่าที่สุด
จำนวนการทดลอง	มากกว่า	น้อยกว่า
การตั้งค่า Axial Distance	ปรับค่า α ได้เพื่อเพิ่มหรือลดการครอบคลุม	ไม่มีการตั้งค่า Axial Distance
เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์	ปัจจัยที่ต้องการทดสอบระดับสูงสุด/ต่ำสุด และตรวจสอบความโค้งของพื้นที่	ปัจจัยที่ต้องการทดสอบความสัมพันธ์เชิงโค้ง แต่ไม่ต้องการค่าขอบสุด
ความเสี่ยงและความปลอดภัย	ความเสี่ยงสูงขึ้นสำหรับปัจจัยที่ระดับสูงสุด/ต่ำสุด	ความเสี่ยงต่ำ เนื่องจากไม่มีค่าขอบสุด
ความประหยัดทรัพยากร	ต้องการทรัพยากรมากขึ้นสำหรับปัจจัยหลายตัว	ใช้ทรัพยากรน้อยกว่า เหมาะกับการทดลองที่มีข้อจำกัดด้านทรัพยากร

นอกจากนี้ การใช้เทคนิค Desirability Function เป็นอีกแนวทางที่ช่วยให้สามารถกำหนดค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยได้โดยการพิจารณาค่าการตอบสนองหลายตัวแปรพร้อมกัน เทคนิคนี้ช่วยให้สามารถเลือกค่าของปัจจัยที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดในเชิงสถิติและสามารถนำไปใช้ในกระบวนการผลิตจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Mäkelä, 2017)

2.7 สารช่วยทางเภสัชกรรมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัดโดยใช้ไซโคลเด็กซ์ทริน

การสกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากพืชสมุนไพรโดยใช้ไซโคลเด็กซ์ทริน (Cyclodextrin, CD) และอนุพันธ์ของไซโคลเด็กซ์ทริน (Cyclodextrin Derivatives) เป็นตัวช่วยสกัดนั้นได้รับความสนใจอย่างมาก เนื่องจากไซโคลเด็กซ์ทรินสามารถสร้าง Inclusion Complex กับสารประกอบที่มีขั้วต่ำหรือมีความสามารถในการละลายในน้ำต่ำ ส่งผลให้สามารถเพิ่มค่าการละลาย (Solubility) ความคงตัว (Stability) และชีวปริมาณออกฤทธิ์ (Bioavailability) ของสารออกฤทธิ์ได้ อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพของการสกัดโดยใช้ไซโคลเด็กซ์ทรินยังสามารถเพิ่มขึ้นได้อีกผ่านการใช้สารช่วยทางเภสัชกรรม (Pharmaceutical Excipients) ซึ่งทำหน้าที่เสริมสร้างประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดให้สามารถดึงสารสำคัญออกมาได้มากขึ้น รวมถึงช่วยเพิ่มความสามารถในการละลายของ Inclusion Complex ทำให้สารที่สกัดได้สามารถคงตัวอยู่ในสารละลายได้นานขึ้น

การคัดเลือกสารช่วยทางเภสัชกรรมในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อเสริมประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดด้วยไซโคลเด็กซ์ทริน โดยคำนึงถึงปัจจัยสำคัญ ได้แก่ ความสามารถในการละลายน้ำของสาร, ความสามารถในการเกิด inclusion complex, เสถียรภาพของสารสกัดในระบบน้ำ และความเข้ากันได้กับ cyclodextrin รวมถึงความปลอดภัยต่อการใช้ในผลิตภัณฑ์สมุนไพร ทั้งนี้ได้เลือกสารเติมแต่งจากกลุ่ม co-solvents, humectants และ non-ionic surfactants ที่ได้รับการยอมรับทางเภสัชศาสตร์ว่าช่วยเพิ่มการละลายของสารออกฤทธิ์และเสถียรภาพของ complex ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเลือกใช้สารที่มีลักษณะกายภาพและคุณสมบัติหลากหลาย เพื่อประเมินผลต่อประสิทธิภาพของระบบการสกัดอย่างครอบคลุม

ในการศึกษานี้ ได้มีการใช้ PEG 400, Glycerin, Propylene Glycol, Sorbitol, Tween 20 และ Tween 80 เป็นสารช่วยทางเภสัชกรรมร่วมกับไซโคลเด็กซ์ทริน เพื่อประเมินผลของสารเติมแต่งเหล่านี้ต่อการเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากเหง้าไพล สารช่วยแต่ละชนิดมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไปและสามารถทำงานร่วมกับไซโคลเด็กซ์ทรินผ่านกลไกที่ต่างกันไป ไม่ว่าจะเป็นการช่วยให้สารออกฤทธิ์สามารถรวมตัวกับไซโคลเด็กซ์ทรินได้ง่ายขึ้น การลดแรงตึงผิวของตัวทำละลายเพื่อเพิ่มอัตราการเกิด Inclusion Complex หรือการเพิ่มความสามารถในการละลายของสารออกฤทธิ์ที่มีขั้วต่ำ รายละเอียดของสารช่วยแต่ละชนิดมีดังต่อไปนี้

2.7.1 PEG 400 (Polyethylene Glycol 400)

PEG 400 เป็นพอลิเมอร์ที่ใช้เป็นสารร่วมตัวทำละลาย (Co-Solvent) เพื่อช่วยเพิ่มการละลายของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ โดยเฉพาะสารที่มีความสามารถในการละลายในน้ำต่ำ PEG 400 สามารถทำให้ Inclusion Complex ที่เกิดขึ้นมีความคงตัวมากขึ้น เนื่องจากมีความสามารถในการดึงดูดโมเลกุลของน้ำและช่วยรักษาโครงสร้างของ Inclusion Complex ให้มีความยืดหยุ่นมากขึ้น ซึ่งช่วยให้การจับตัวกับสารออกฤทธิ์เกิดขึ้นได้ดีขึ้น นอกจากนี้ PEG 400 ยังช่วยลดความหนืดของสารละลาย ทำให้กระบวนการสกัดเกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการใช้ PEG 400 ในปริมาณที่เหมาะสมสามารถเพิ่มผลผลิตของสารออกฤทธิ์ได้ โดยช่วยให้สารสำคัญที่อยู่ในเหง้าไพลสามารถละลายออกมาได้ดีขึ้นและพร้อมสำหรับการจับตัวกับไซโคลเด็กซ์ทริน ส่งผลให้ Inclusion Complex มีเสถียรภาพและสามารถละลายน้ำได้ดีขึ้น (Chadwick et al., 1977)

2.7.2 กลีเซอริน (Glycerin)

Glycerin เป็นสารให้ความชุ่มชื้น (Humectant) ที่สามารถใช้เป็นตัวทำละลายร่วม (Co-Solvent) เพื่อช่วยป้องกันการตกตะกอนของสารออกฤทธิ์หลังจากการสกัดเสร็จสิ้นแล้ว โดยมีคุณสมบัติในการจับตัวกับโมเลกุลของน้ำได้ดี ทำให้สามารถลดการเกิดการตกผลึกของ Inclusion Complex ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญในระบบสกัดที่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย นอกจากนี้ การใช้ Glycerin ยังช่วยทำให้สารออกฤทธิ์ที่สกัดได้สามารถคงตัวอยู่ในสารละลายได้นานขึ้น ลดการสูญเสียของสารที่สกัดออกมา และช่วยลดการระเหยของสารสกัดในระหว่างกระบวนการสกัด ซึ่งช่วยให้สามารถคงปริมาณของสารออกฤทธิ์ไว้ได้มากขึ้น (Padmawar & Bhadoriya, 2018)

2.7.3 โพรพิลีนไกลคอล (Propylene Glycol)

Propylene Glycol (PG) เป็นตัวทำละลายที่สามารถทำงานร่วมกับไซโคลเด็กซ์ทรินได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีบทบาทในการลดแรงตึงผิวของตัวทำละลาย ทำให้ Inclusion Complex สามารถเกิดขึ้นได้ง่ายขึ้นและมีเสถียรภาพมากขึ้น นอกจากนี้ PG ยังช่วยให้สารออกฤทธิ์ที่มีขั้วต่ำสามารถละลายได้ดีขึ้นในระบบที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบหลัก จากการทดลองพบว่าการใช้ Propylene Glycol ช่วยเพิ่มปริมาณของสารออกฤทธิ์ที่สามารถละลายออกมาได้ และช่วยให้ Inclusion Complex มีเสถียรภาพมากขึ้น ส่งผลให้ผลผลิตของสารออกฤทธิ์ที่ได้จากการสกัดสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่ไม่มีการเติม Propylene Glycol (Ramstad et al., 1978)

2.7.4 ซอร์บิทอล (Sorbitol)

Sorbitol เป็นสารให้ความหวานที่สามารถใช้เป็นสารช่วยเพิ่มความคงตัวของ Inclusion Complex ในระบบที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย โดยมีคุณสมบัติในการดึงดูน้ำได้ดี ทำให้สามารถช่วยลดโอกาสที่ Inclusion Complex จะเกิดการตกผลึกหลังจากการสกัดเสร็จสิ้น จากผลการทดลองพบว่า Sorbitol สามารถช่วยทำให้ Inclusion Complex ที่เกิดขึ้นสามารถละลายในน้ำได้ดีขึ้น ลดการตกตะกอนของสารออกฤทธิ์ และช่วยให้สามารถคงปริมาณของสารที่สกัดได้มากขึ้น (Xiang et al., 2022)

2.7.5 Tween 20 และ Tween 80 (Polysorbates 20 และ 80)

Tween 20 และ Tween 80 เป็นสารลดแรงตึงผิวแบบไม่ไอออนิกที่สามารถช่วยให้ Inclusion Complex กระจายตัวได้ดีขึ้นในสารละลาย Tween 20 มีค่าความสมดุลของไฮโดรฟิลิก-ไลโปฟิลิก (HLB) สูงกว่า Tween 80 ซึ่งหมายความว่า Tween 20 มีความสามารถในการละลายน้ำ

ได้ดีกว่า ขณะที่ Tween 80 มีความสามารถในการละลายในน้ำมันได้ดีกว่า การเลือกใช้ Tween 20 หรือ Tween 80 ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารออกฤทธิ์ที่ต้องการสกัด โดยการใช้ Tween ในปริมาณที่เหมาะสมสามารถช่วยให้สารออกฤทธิ์สามารถละลายได้ดีขึ้นและเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัด (Iswandana et al., 2020)

ตารางที่ 2.5 สรุปคุณสมบัติของสารช่วยทางเภสัชกรรม

สารช่วยทางเภสัชกรรม	ประเภท	สูตรทางเคมี	ความสามารถในการละลาย	บทบาทในงานวิจัยนี้	ค่า DIELECTRIC CONSTANT	ค่า HLB
PEG 400	Co-Solvent	$\text{H}(\text{OCH}_2\text{CH}_2)_n\text{OH}$	ละลายในน้ำและตัวทำละลายอินทรีย์บางชนิด	ช่วยเพิ่มการละลายของ Inclusion Complex และลดแรงตึงผิว	-	-
GLYCERIN	Humectant	$\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$	ละลายในน้ำได้ดี	ช่วยรักษาความชุ่มชื้น ป้องกันการตกตะกอน และเสริมความเสถียรของ Inclusion Complex	42.5	-
PROPYLENE GLYCOL	Co-Solvent	$\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_2$	ละลายในน้ำและตัวทำละลายอินทรีย์บางชนิด	ช่วยเพิ่มการละลายของสารออกฤทธิ์ และลดแรงตึงผิวของตัวทำละลาย	32	-
SORBITOL	Humectant	$\text{C}_6\text{H}_{14}\text{O}_6$	ละลายในน้ำได้ดีมาก	ช่วยให้ Inclusion Complex คงตัวและเพิ่มความสามารถในการละลายของสารออกฤทธิ์	45	-
TWEEN 20	Nonionic Surfactant	$\text{C}_{58}\text{H}_{114}\text{O}_{26}$	ละลายในน้ำและตัวทำละลายอินทรีย์บางชนิด	ช่วยกระจายตัวของ Inclusion Complex และเพิ่มการละลายของสารออกฤทธิ์ในตัวกลางน้ำ	-	16.7
TWEEN 80	Nonionic Surfactant	$\text{C}_{64}\text{H}_{124}\text{O}_{26}$	ละลายในน้ำและตัวทำละลายอินทรีย์บางชนิด	ช่วยลดแรงตึงผิวของตัวทำละลาย และเพิ่มประสิทธิภาพของ Inclusion Complex	-	15

2.8 บทบทวนวรรณกรรม

ในงานวิจัยเกี่ยวกับการใช้ไซโคลเด็กซ์ทรินเพื่อช่วยในการสกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ มีหลายงานวิจัยที่แสดงถึงประสิทธิภาพและประโยชน์ของการใช้ไซโคลเด็กซ์ทรินในกระบวนการสกัด โดยเฉพาะการสกัดจากวัตถุดิบธรรมชาติ ในส่วนนี้จะกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องหลายฉบับที่ได้ศึกษาการใช้ไซโคลเด็กซ์ทรินในกระบวนการสกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากพืชต่างๆ

การพัฒนากระบวนการสกัดโพลีฟีนอลจากเปลือกมันฝรั่งโดยใช้ Hydroxypropyl- β -Cyclodextrin (HPBCD) งานวิจัยนี้เน้นไปที่การพัฒนากระบวนการสกัดที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมในการสกัดสารโพลีฟีนอลจากเปลือกมันฝรั่ง โดยใช้ HPBCD เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการสกัด งานวิจัยพบว่า HPBCD มีประสิทธิภาพสูงในการสกัดสารโพลีฟีนอลที่มีคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระ โดยกระบวนการที่ใช้ได้ผลดีที่สุดที่อุณหภูมิ 30°C และไม่มี ความจำเป็นต้องใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ที่เป็นพิษ (Lakka et al., 2020)

การสกัดสารโพลีฟีนอลจากใบมะกอกโดยใช้ β -Cyclodextrin (BCD) ร่วมกับตัวทำละลาย Deep Eutectic Solvent (DES) งานวิจัยนี้ใช้ BCD ร่วมกับตัวทำละลาย DES เพื่อสกัดสารโพลีฟีนอลจากใบมะกอก โดยพบว่า BCD ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดโพลีฟีนอลและสารต้านอนุมูลอิสระได้อย่างมีนัยสำคัญ งานวิจัยนี้ยังใช้การออกแบบ Box-Behnken เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการสกัด และพบว่าอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้ได้ปริมาณโพลีฟีนอลมากขึ้น โดยไม่มีการลดลงของคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระ (Chakroun et al., 2021)

การสกัดสารต้านอนุมูลอิสระจาก *Salvia fruticosa* โดยใช้ไซโคลเด็กซ์ทริน งานวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับการใช้ไซโคลเด็กซ์ทรินในการสกัดสารต้านอนุมูลอิสระจากพืช *Salvia fruticosa* โดยเปรียบเทียบไซโคลเด็กซ์ทรินสามชนิด คือ methyl β -cyclodextrin (MBCD), hydroxypropyl β -cyclodextrin (HPCD), และ β -cyclodextrin (BCD) งานวิจัยนี้พบว่า MBCD ให้ประสิทธิภาพการสกัดสูงที่สุด และการสกัดที่อุณหภูมิสูงช่วยเพิ่มการสกัดสารต้านอนุมูลอิสระ (Grigorakis et al., 2020)

การใช้ BCD ในการสกัดสารออกฤทธิ์จากกากกาแฟ งานวิจัยนี้ใช้สารละลายของ BCD ในการสกัดสารออกฤทธิ์จากกากกาแฟ ผลการทดลองพบว่าสารสกัดที่ได้มีปริมาณคลอโรเจนิกแอซิดและคาเฟอีนสูง ซึ่งมีคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระ และการใช้ไซโคลเด็กซ์ทรินช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดได้ดี (Loukri et al., 2020)

การสกัดโพลีฟีนอลและรงควัตถุจากของเสียหัวหอมโดยใช้ไซโคลเด็กซ์ทริน ในงานวิจัยนี้ ไซโคลเด็กซ์ทรินถูกใช้เป็นตัวช่วยในกระบวนการสกัดสารโพลีฟีนอลและรงควัตถุจากของเสียจากการ

แปรรูปหัวหอม งานวิจัยพบว่า MBCD และ HPBCD เป็นตัวช่วยที่มีประสิทธิภาพสูงในการสกัดสารโพลีฟีนอลเมื่อเปรียบเทียบกับตัวทำละลายอื่นๆ (Bozinou et al., 2021)

การใช้ไซโคลเด็กซ์ทรินในการสกัดสารโพลีฟีนอลจากใบรูออบอสเซีย ในงานวิจัยของ Vhangani และคณะ (2022) ได้ทำการสกัดสารโพลีฟีนอลจากใบรูออบอสเซีย (*Aspalathus linearis*) โดยใช้ BCD เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัด โดยมีการใช้อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสม ซึ่งทำให้สารสกัดมีปริมาณโพลีฟีนอลและคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ (Vhangani et al., 2022)

การสกัดฟลาโวนอยด์จาก *Rhizoma Smilacis Glabrae* ด้วยไซโคลเด็กซ์ทรินและเรซิน Zhang และคณะ (2019) ได้ใช้ BCD ร่วมกับการดูดซับด้วยเรซินเพื่อสกัดฟลาโวนอยด์จาก *Rhizoma Smilacis Glabrae* โดยพบว่าไซโคลเด็กซ์ทรินช่วยเพิ่มความสามารถในการสกัดฟลาโวนอยด์ และสามารถทำให้ได้ปริมาณสารสกัดที่มีความบริสุทธิ์สูงขึ้นกว่าการใช้ตัวทำละลายเอทานอลเพียงอย่างเดียว (Zhang et al., 2019)

การสกัดสารออกฤทธิ์จากปืทุทโดยใช้การสกัดด้วยอัลตราซาวด์และ BCD ในการศึกษาโดย Tutunchi และคณะ (2019) การใช้ BCD ร่วมกับการสกัดด้วยอัลตราซาวด์ทำให้สามารถสกัดสารออกฤทธิ์จากปืทุทได้อย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น โดยเฉพาะสารเบทานินและสารโพลีฟีนอลที่มีคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระสูง ซึ่งการใช้ไซโคลเด็กซ์ทรินช่วยเพิ่มความเสี่ยงของสารสกัดในผลิตภัณฑ์อาหาร เช่น เครื่องดื่มและลูกอม (Tutunchi et al., 2019)

การสกัดสารโพลีฟีนอลจากกากองุ่นโดยใช้การสกัดร่วมกับไซโคลเด็กซ์ทรินและอัลตราซาวด์ งานวิจัยของ Alibante และคณะ (2021) แสดงให้เห็นถึงการใช้ BCD ในการสกัดสารโพลีฟีนอลจากกากองุ่นแดง ซึ่งทำให้สารสกัดมีคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้น โดยการใช้ไซโคลเด็กซ์ทรินช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดและคัดแยกสารโพลีฟีนอลจากกากองุ่นได้ดีขึ้น (Alibante et al., 2021)

การสกัดสารฟีนอลจากเปลือกทับทิมโดยใช้ไซโคลเด็กซ์ทรินเพื่อเพิ่มความเสี่ยงของแอนโทไซยานิน Kalantari และคณะ (2021) ได้ทำการสกัดสารฟีนอลจากเปลือกทับทิมโดยใช้ BCD เป็นตัวช่วยสกัด ซึ่งช่วยเพิ่มความเสี่ยงของแอนโทไซยานินในน้ำทับทิม โดยการใช้ไซโคลเด็กซ์ทรินช่วยชะลอการเสื่อมสภาพของแอนโทไซยานินและรักษาสีของน้ำทับทิมในระหว่างการเก็บรักษาได้ดียิ่งขึ้น (Kalantari et al., 2021)

การใช้ BCD ในการสกัดสารโพลีฟีนอลจากผงมะกอก งานวิจัยของ Maraulo และคณะ (2021) ได้ทำการศึกษาการใช้ BCD ร่วมกับการสกัดด้วยอัลตราซาวด์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากผงมะกอก งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า BCD มีความสามารถในการเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดสารโพลีฟีนอล ซึ่งสารสกัดนี้มีคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระสูง สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหารฟังก์ชันและผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง (Maraulo et al., 2021)

การสกัดและห่อหุ้มสารออกฤทธิ์จากเซอร์รี Cornelian งานวิจัยของ Popović และคณะ (2021) ได้ศึกษาการใช้ BCD ในการสกัดและห่อหุ้มสารออกฤทธิ์จากเซอร์รี Cornelian ซึ่งสารที่สกัดได้มีสารต้านอนุมูลอิสระที่มีประสิทธิภาพสูง การใช้ BCD ยังช่วยเพิ่มความสามารถในการละลายและเพิ่มความเสถียรของสารสกัด ทำให้สารสกัดสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหารและยาได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Popović et al., 2021)

การใช้ไซโคลเด็กซ์ทรินในการสกัดสารฟีนอลจากเปลือกทับทิม Kalantari และคณะ (2020) ได้ทำการศึกษาการสกัดสารฟีนอลจากเปลือกทับทิมโดยใช้ BCD ร่วมกับอัลตราซาวด์ ซึ่งพบว่าการใช้ไซโคลเด็กซ์ทรินช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดสารฟีนอลและสารแอนโทไซยานินได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้ได้สารสกัดที่มีคุณสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระสูงและเสถียรมากขึ้น (Kalantari et al., 2020)

การสกัดสารต้านอนุมูลอิสระจากใบโหระพาโดยใช้ BCD โดยที่ Favre และคณะ (2018) ได้ใช้ไซโคลเด็กซ์ทรินร่วมกับการสกัดด้วยอัลตราซาวด์ในการสกัดสารต้านอนุมูลอิสระจากใบโหระพา โดยการวิจัยได้ใช้ Response Surface Methodology (RSM) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสกัด พบว่าสภาวะที่ดีที่สุดช่วยให้ได้ปริมาณสารโพลีฟีนอลสูง และสารสกัดยังสามารถยับยั้งกระบวนการเกิดสีน้ำตาลในอาหารได้ด้วย (Favre et al., 2018)

การสกัดสาร Dihydromyricetin จากชาจีนโดยใช้ BCD งานวิจัยของ Wang และคณะ (2019) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการสกัดสาร Dihydromyricetin (DMY) จากชาจีน โดยใช้ BCD ร่วมกับการสกัดด้วยอัลตราซาวด์ ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า BCD ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดสาร DMY ได้อย่างมีนัยสำคัญ และยังช่วยเพิ่มความเสถียรของสารสกัดในน้ำ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารได้ (Wang et al., 2019)

การใช้ BCD ในการสกัดสารต้านอนุมูลอิสระและสารยับยั้งการเกิดไกลเคชั่นจากพริกไทยเขียว (*Piper nigrum*) งานวิจัยของ Favre และคณะ (2020) ได้ทำการสกัดสารโพลีฟีนอลจากพริกไทยเขียวโดยใช้ BCD และอัลตราซาวด์ โดยใช้ Response Surface Methodology (RSM) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัด พบว่าสารสกัดที่ได้มีปริมาณโพลีฟีนอลสูงและมีคุณสมบัติในการยับยั้งการเกิดไกลเคชั่นที่ดี ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารเพื่อยับยั้งกระบวนการที่ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของโปรตีนได้ (Favre et al., 2020)

การพัฒนาไซโคลเด็กซ์ทริน-เบสจาก Lotus corniculatus ในงานวิจัยของ Fumić และคณะ (2018) ได้ทำการพัฒนาไซโคลเด็กซ์ทริน-เบสสำหรับการสกัดสารฟลาโวนอยด์จาก Lotus corniculatus โดยใช้การออกแบบ Box-Behnken เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการสกัด พบว่าสารสกัดที่ได้มีปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระสูงและมีศักยภาพในการลดการสะสมของ glycosaminoglycans ซึ่งเป็นปัจจัยเสี่ยงต่อการเกิดโรค mucopolysaccharidosis type III (Fumić et al., 2018)

การร่วมกันเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดและการหมักโปรไบโอติกจากเปลือกทับทิม Moussaoui และคณะ (2021) ได้ศึกษาการใช้ BCD ในการสกัดสารโพลีฟีนอลจากเปลือกทับทิม ร่วมกับการหมักโปรไบโอติก พบว่าการใช้ไซโคลเด็กซ์ทรินช่วยเพิ่มปริมาณสารโพลีฟีนอลและเพิ่มคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระของสารสกัด ซึ่งสามารถนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารและเครื่องสำอางได้ (Moussaoui et al., 2021)

การใช้สารละลาย Deep Eutectic Solvents (DES) ร่วมกับ BCD ในการสกัดสารโพลีฟีนอล จากพืชสมุนไพร Georgantzi และคณะ (2017) ได้ทำการศึกษาการใช้สารละลาย DES ร่วมกับ BCD ในการสกัดสารโพลีฟีนอลจากพืชสมุนไพรพื้นเมืองของกรีซ โดยพบว่าการใช้ DES ร่วมกับไซโคลเด็กซ์ทรินช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัดสารโพลีฟีนอลได้อย่างมีนัยสำคัญ (Georgantzi et al., 2017)

การใช้ BCD ในการเพิ่มปริมาณ Isoflavone จาก *Trifolium pratense* L. Kazlauskaite และคณะ (2021) ได้ศึกษาการใช้ไซโคลเด็กซ์ทรินเพื่อเพิ่มปริมาณสาร Isoflavone จาก *Trifolium pratense* L. โดยพบว่า BCD ช่วยเพิ่มปริมาณของสาร Daidzein และ Genistein ในสารสกัดได้อย่างมีนัยสำคัญ ทำให้สารสกัดมีประสิทธิภาพสูงขึ้นในการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมยาและอาหารเสริม (Kazlauskaite et al., 2021)

การสกัดสารต้านอนุมูลอิสระจาก *Trifolium pratense* L. โดยใช้วิธีสกัดแบบดั้งเดิมและการใช้ไซโคลเด็กซ์ทรินช่วยในการสกัด งานวิจัยของ Kazlauskaite และคณะ (2022) ได้ศึกษาการใช้ไซโคลเด็กซ์ทรินช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัดสารโพลีฟีนอลจากดอก *Trifolium pratense* L. พบว่าการใช้ BCD ช่วยเพิ่มปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระได้ถึง 20.29% ในน้ำ และการใช้ γ -ไซโคลเด็กซ์ทรินช่วยเพิ่มในเอทานอลได้ถึง 22.26% ซึ่งเป็นการสกัดที่มีประสิทธิภาพสูงและปลอดภัย (Kazlauskaite et al., 2022)

การใช้ไซโคลเด็กซ์ทรินในการสกัดโพลีฟีนอลจากผลทับทิมทั้งผล งานวิจัยของ Diamanti และคณะ (2017) ศึกษาการใช้ไซโคลเด็กซ์ทรินในการสกัดโพลีฟีนอลจากผลทับทิมทั้งผล ซึ่งพบว่าไซโคลเด็กซ์ทรินช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัดโพลีฟีนอลได้ถึง 20% โดยมีการยืนยันว่ามีการสร้างคอมเพล็กซ์ระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินและสารโพลีฟีนอล ซึ่งช่วยเพิ่มความเสถียรและคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระของสารสกัด (Diamanti et al., 2017)

การสกัดฟลาโวนอยด์จากเปลือกส้มจีนโดยใช้การสกัดด้วยไฟฟ้าเชื่อมร่วมกับไซโคลเด็กซ์ทริน Zhou และคณะ (2021) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการสกัดฟลาโวนอยด์จากเปลือกส้มจีนโดยใช้วิธีการสกัดด้วยไฟฟ้าเชื่อมร่วมกับไซโคลเด็กซ์ทริน ซึ่งวิธีนี้ให้ผลผลิตฟลาโวนอยด์สูงกว่าวิธีการสกัดแบบอื่น ๆ โดยเฉพาะการใช้ HPBCD ที่ให้ผลผลิตสูงที่สุด และสารสกัดที่ได้ยังคงคุณสมบัติการต้านอนุมูลอิสระและความเสถียรในการเก็บรักษาได้ดีเยี่ยม (Zhou et al., 2021)

การสกัดโพลีฟีนอลจากกากพืชโดยใช้ไซโคลเด็กซ์ทรินช่วยในการสกัด งานวิจัยของ El Darra และคณะ (2018) เปรียบเทียบการสกัดโพลีฟีนอลจากกากพืชโดยใช้เอทานอลและไซโคลเด็กซ์ทริน พบว่าการใช้ไซโคลเด็กซ์ทรินช่วยเพิ่มปริมาณโพลีฟีนอลและฟลาโวนอยด์ในสารสกัดได้มากกว่าเอทานอล และยังมีประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระที่สูงขึ้นด้วย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าไซโคลเด็กซ์ทรินเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการสกัดโพลีฟีนอลจากพืชผล (El Darra et al., 2018)

หลายงานวิจัยได้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของไซโคลเด็กซ์ทรินในกระบวนการสกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ เช่น การใช้ HPBCD ในการสกัดโพลีฟีนอลจากเปลือกมันฝรั่ง (Lakka et al., 2020) หรือการใช้ BCD ร่วมกับตัวทำละลาย Deep Eutectic Solvent (DES) ในการสกัดโพลีฟีนอลจากใบมะกอก (Chakroun et al., 2021) อย่างไรก็ตาม งานวิจัยเหล่านี้มีข้อจำกัดในเรื่องการเลือกใช้ตัวทำละลายและอุณหภูมิที่เหมาะสม ซึ่งอาจไม่สอดคล้องกับการสกัดสารที่ไวต่อความร้อนหรือสารที่มีโครงสร้างเฉพาะที่พบในเหง้าไพล

จากการทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าไซโคลเด็กซ์ทรินเป็นสารที่มีประสิทธิภาพสูงในการช่วยเพิ่มการสกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากวัตถุดิบธรรมชาติ การใช้ไซโคลเด็กซ์ทรินสามารถเพิ่มปริมาณสารสำคัญ เช่น โพลีฟีนอล ฟลาโวนอยด์ และสารต้านอนุมูลอิสระได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะในพืชสมุนไพรและผลไม้ การใช้ไซโคลเด็กซ์ทรินยังช่วยให้สารสกัดมีความเสถียรสูงขึ้น ทำให้สารออกฤทธิ์สามารถรักษาคุณสมบัติทางชีวภาพได้นานขึ้น นอกจากนี้ กระบวนการที่ใช้ไซโคลเด็กซ์ทรินยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่า เนื่องจากลดการใช้สารเคมีที่เป็นอันตรายและใช้วิธีการสกัดที่ไม่รุนแรง การวิจัยเหล่านี้ยังเน้นให้เห็นถึงประโยชน์ที่หลากหลายของไซโคลเด็กซ์ทรินในการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดในอุตสาหกรรมอาหาร เครื่องสำอาง และยา ซึ่งการประยุกต์ใช้ไซโคลเด็กซ์ทรินไม่เพียงแต่ช่วยเพิ่มปริมาณและคุณภาพของสารสกัดเท่านั้น แต่ยังสามารถตอบโจทย์การผลิตที่ยั่งยืนและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมได้อีกด้วย การใช้ไซโคลเด็กซ์ทรินในการสกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากวัตถุดิบธรรมชาติเป็นแนวทางที่มีศักยภาพสูงสำหรับการพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพและปลอดภัย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมที่ต้องการรักษาความเสถียรและประสิทธิภาพของสารออกฤทธิ์ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการสกัดสารจากเหง้าไพล โดยใช้ไซโคลเด็กซ์ทรินและอนุพันธ์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดและลดข้อจำกัดที่พบในงานวิจัยก่อนหน้านี้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 สารเคมีและวัสดุที่ใช้ในการวิจัย

1. α -Cyclodextrin (ACD) (Wako, Lot: SAM5260)
2. β -Cyclodextrin (BCD) (Acros Organics, 98%, Lot: A0353242)
3. γ -Cyclodextrin (GCD) (Wako, Lot: SAJT795)
4. Methyl- β -Cyclodextrin (M-BCD) (Aldrich, Lot: STBD7228V, DS: $\sim$ 11.6)
5. Sulfobutylether- β -Cyclodextrin (SBE-BCD) (Thermo Scientific, Lot: A0448371, DS: $\sim$ 6.5)
6. Hydroxypropyl- β -Cyclodextrin (HPBCD) (CycloLab, Budapest, Hungary, DS: $\sim$ 4.5)
7. Methanol (Labscan, AR grade, Bangkok, Thailand)
8. Acetonitrile (CH_3CN) (RCI Labscan, HPLC grade, Lot: LC1005-G4L)
9. Trifluoroacetic acid ($\text{CF}_3\text{CO}_2\text{H}$) Sigma Aldrich, Lot: ABC1234)
10. Ethanol (EtOH) (Carlo Erba, Absolute Anhydrous, Lot: V3E033233E)
11. Ultra-purified Water (Milli-Q academic A10, Millipore, Darmstadt, Germany)
12. Hexane (Carlo Erba, Lot: P4F025084G)
13. Standard curcuminoids (รวม Curcumin, Demethoxycurcumin, Bisdemethoxycurcumin) (Sigma Aldrich, Spain)
14. Standard compound D (Biopurify Phytochemicals, Lot: PRF24083029, Store at $2-8^\circ\text{C}$, 5mg)
15. Standard DMPBD (LGC Toronto Research Chemicals, Lot: 18-XDD-130-1, MW: 190.24)
16. Standard Trolox (Aldrich, Lot: RCB5116V)
17. Tween 80 (หจก.อาร์.พี.ซี. อินเตอร์เทรด)
18. Tween 20 (หจก.อาร์.พี.ซี. อินเตอร์เทรด)
19. Polyethylene Glycol 400 (PEG 400) (หจก.อาร์.พี.ซี. อินเตอร์เทรด)
20. Glycerin (หจก.อาร์.พี.ซี. อินเตอร์เทรด)
21. Propylene Glycol (หจก.อาร์.พี.ซี. อินเตอร์เทรด)

22. Sorbitol (หจก.อาร์.พี.ซี. อินเตอร์เทรด)
23. Coconut oil (น้ำมันมะพร้าว) (น้ำมันมะพร้าวสกัดเย็น 100%, Coco'Care, 1000 mL)
24. 2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) (Aldrich, Lot: STBC5116V)
25. 2,2'-Azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) (ABTS) (Sigma, Lot: 8BCB9734)
26. Potassium persulfate ($K_2S_2O_8$) (Ajax Finechem, UNILAB)
27. Ferric chloride ($FeCl_3$) (Ajax Finechem, UNILAB)
28. 2,4,6-Tripyridyl-s-triazine (TPTZ) (Acros Organics, 99%)
29. Hydrochloric acid (HCl) (Carlo Erba, 37%, Batch Number V9I891159I, Expiry Date 2025/09)

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. High-Performance Liquid Chromatography (HPLC, Agilent 1260, ChemStation Software)
2. MODDE 7.0 (Sartorius Stedim Data Analytics AB, Sweden)
3. AutoDock Vina (Molecular Docking Software)
4. pH Meter (Mettler Toledo, Model SevenCompact)
5. Microplate Reader (Thermo Scientific, Varioskan Lux)
6. Centrifuge (Eppendorf, Model 5424R)
7. Analytical Balance (Mettler Toledo, Model MS)
8. Ultrasonic Bath (Elma, Model Transsonic T460/H)
9. Beaker (Pyrex)
10. Graduated Cylinder (Duran)
11. Spatula (Stainless Steel)
12. Stirring Rod (Glass)
13. Vial (2 mL Screw Top)
14. Micropipette (Eppendorf, 10 μ L - 1000 μ L)
15. Micropipette Tips (Axygen, Filtered, Sterile)
16. Falcon Tube (Corning, 15 mL and 50 mL)
17. Vortex Mixer (Scientific Industries, Model Vortex Genie 2)
18. Syringe (Hamilton, 1 mL and 5 mL)

19. Syringe Filters (PTFE, 0.22 μm and 0.45 μm)
20. Shaking Incubator (JSSI-100C, KTS Scientific Enterprise)

3.3 การเตรียมตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา

ในการศึกษานี้ใช้เหง้าไพลสด (rhizome) เป็นวัตถุดิบหลัก ซึ่งได้รับการเก็บเกี่ยวเมื่ออายุครบ 2 ปี จากวิสาหกิจชุมชนกลุ่มแปรรูปสมุนไพร ตำบลหนองคู อำเภอนาดูน จังหวัดมหาสารคาม เหง้าไพลผ่านการตรวจสอบเอกลักษณ์โดยโรงงานฟาร์มแคร์ก่อนนำมาใช้ในการวิจัย โดยคัดเลือกเฉพาะตัวอย่างที่ปราศจากโรคและเชื้อรา ก่อนทำการขนส่งมายังห้องปฏิบัติการเมื่อได้รับเหง้าไพลแล้ว ทำการล้างทำความสะอาดด้วยน้ำประปาเพื่อลดการปนเปื้อนของเศษดินและสิ่งสกปรก จากนั้นผึ่งให้แห้งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที ก่อนนำไปสไลด์เป็นแผ่นบางเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการอบแห้ง เหง้าไพลถูกอบแห้งในเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง หลังจากรอบแห้ง เหง้าไพลถูกบดเป็นผงละเอียดด้วยเครื่องบดสมุนไพร และบรรจุในถุงอะลูมิเนียมฟอยล์เพื่อป้องกันการสัมผัสกับความชื้น ตัวอย่างที่เตรียมไว้ถูกจัดเก็บในโถดูดความชื้นเพื่อรักษาคุณภาพ และพร้อมนำไปใช้ในการทดลองต่อไป

3.4 การศึกษา Molecular Docking

Molecular Docking เป็นเทคนิคที่ใช้เพื่อวิเคราะห์การจับตัวของไซโคลเด็กซ์ทริน (Cyclodextrins) กับสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในเหง้าไพล โดยมีเป้าหมายหลักเพื่อทำความเข้าใจปฏิสัมพันธ์ทางโมเลกุลระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินกับสารสำคัญ ซึ่งจะช่วยให้การออกแบบกระบวนการสกัดมีประสิทธิภาพมากขึ้น พร้อมทั้งลดการใช้ตัวทำละลายที่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม การศึกษานี้ใช้โปรแกรม AutoDock Vina เป็นเครื่องมือหลักในการคำนวณค่าพลังงานการจับตัว (Binding Affinity) และตรวจสอบการสร้าง Inclusion Complex ของไซโคลเด็กซ์ทรินกับสารออกฤทธิ์ต่างๆ

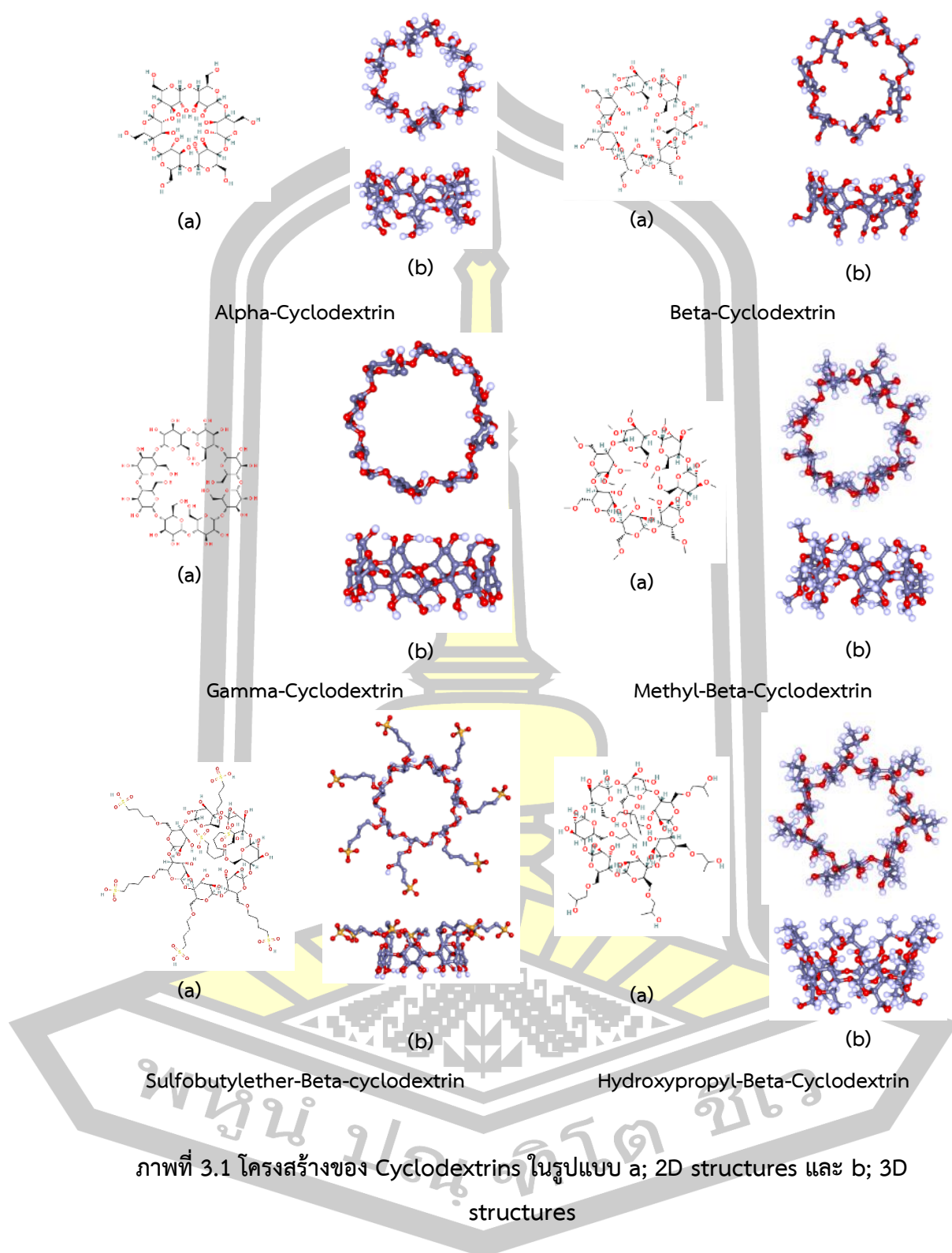
3.4.1 การเตรียมโครงสร้างของ Cyclodextrins

โครงสร้างของไซโคลเด็กซ์ทรินถูกนำเข้าจากฐานข้อมูล RCSB PDB (Protein Data Bank) และปรับแต่งเพื่อใช้ในการศึกษาครั้งนี้ โดยเลือกไซโคลเด็กซ์ทรินที่มีขนาดโพรงและคุณสมบัติต่างกัน ได้แก่ Alpha-Cyclodextrin (ACD; PDB ID: 1BTC), Beta-Cyclodextrin (BCD; PDB ID: 3CGT), Gamma-Cyclodextrin (GCD; PDB ID: 2ZYG), Methyl-Beta-Cyclodextrin (MBCD; PDB ID: 6XX3), Sulfobutylether-Beta-Cyclodextrin (SBEBCD; โมเดลโครงสร้างที่ปรับแต่งจาก BCD), และ Hydroxypropyl-Beta-Cyclodextrin (HPBCD; โมเดลโครงสร้างที่ปรับแต่งจาก BCD) โดยไซโคลเด็กซ์

ทรินสองชนิดสุดท้ายได้รับความกรุณาจาก รศ.ดร. ณัฏฐาเนตร นันทบุตร เป็นผู้ช่วยเหลือในการตัดต่อและปรับโครงสร้างให้เหมาะสม (ภาพที่ 3.1)

ก่อนนำไปใช้ในการ Docking โครงสร้างของไซโคลเด็กซ์ทรินได้รับการปรับแต่งโดยใช้ Discovery Studio 2021 Client โดยเริ่มจากการเติมอะตอมไฮโดรเจนให้ครบสมบูรณ์เพื่อลดความผิดเพี้ยนของโครงสร้าง จากนั้นทำการลบโมเลกุลน้ำและสิ่งปนเปื้อนที่อาจแฝงอยู่ในโครงสร้างที่ดาวน์โหลดมา พร้อมทั้งตรวจสอบค่า Degree of Substitution (DS) เพื่อให้แน่ใจว่าหมู่ฟังก์ชันที่ถูกดัดแปรไม่ได้ส่งผลกระทบต่อปฏิสัมพันธ์ของไซโคลเด็กซ์ทรินกับสารออกฤทธิ์





3.4.2 การเตรียมโครงสร้างของสารสำคัญจากเหง้าไพล

ในการศึกษานี้ ได้คัดเลือกสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากเหง้าไพล (*Zingiber montanum*) จำนวนทั้งสิ้น 12 ชนิด ซึ่งจำแนกออกเป็น 3 กลุ่มหลัก ได้แก่ กลุ่มฟีนิลบิวทานอยด์ (Phenylbutanoids), กลุ่มเคอร์คูมินอยด์ (Curcuminoids) และกลุ่มเทอร์ปีนอยด์ (Terpenoids) โดยมีเกณฑ์การคัดเลือกที่ครอบคลุมทั้งความสำคัญทางโครงสร้างเคมี การรายงานฤทธิ์ทางเภสัชวิทยาในวรรณกรรมวิชาการ และบทบาทในการเป็นองค์ประกอบสำคัญของไพลที่สามารถใช้เป็นสารบ่งชี้ทางชีวภาพ (chemical markers) ได้

กลุ่ม Phenylbutanoids ประกอบด้วยสาร (E)-4-(3',4'-dimethoxyphenyl)but-3-en-2-ol หรือ Compound D ซึ่งเป็นสารสำคัญเฉพาะของไพลที่มีฤทธิ์ด้านการอักเสบสูง โดยสามารถยับยั้งเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการอักเสบ เช่น COX-2 อย่างมีนัยสำคัญ [Panthong et al., 1997] รวมถึงอนุพันธ์อื่น ๆ ได้แก่ (E)-1-(3,4-dimethoxyphenyl)butadiene (DMPBD), (E)-4-(3,4-dimethoxyphenyl)but-3-en-1-ol, (E)-4-(3,4-dimethoxyphenyl)but-3-en-1-yl acetate (D-acetate) และ (E)-3-(3,4-dimethoxyphenyl)-4-[(E)-3,4-dimethoxystyryl]cyclohex-1-ene (DMPBDMS) ซึ่งล้วนแสดงศักยภาพในการออกฤทธิ์ด้านการอักเสบและบรรเทาอาการปวดในระดับที่น่าสนใจ

กลุ่ม Curcuminoids ได้แก่ Curcumin ซึ่งเป็นสารสีเหลืองเด่นของไพล มีโครงสร้างที่เสถียรและแสดงฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ด้านการอักเสบ ด้านเบาหวาน และต้านมะเร็ง โดยมีการศึกษารองรับอย่างกว้างขวาง (Choudhury et al., 2018) นอกจากนี้ยังมี Cassumunin A, Cassumunin B และ Cassumunin C ซึ่งเป็นอนุพันธ์ของเคอร์คูมินที่พบเฉพาะในไพล และแสดงศักยภาพที่คล้ายคลึงกันในการต้านอนุมูลอิสระและลดการอักเสบ โดยมีความสามารถในการเสริมฤทธิ์กับสารอื่นในสารสกัดรวม (Thepthong et al., 2023)

กลุ่มสุดท้าย คือ Terpenoids ซึ่งเป็นสารระเหยที่มีบทบาทสำคัญในด้านกลิ่นและฤทธิ์ทางเภสัชวิทยา ได้แก่ Terpinen-4-ol, γ -Terpinene, Zerumbone และ Sabinene โดยเฉพาะ Zerumbone ซึ่งเป็นสารที่มีการศึกษาว่ามีฤทธิ์ด้านการอักเสบ ด้านจุลชีพ ด้านออกซิเดชัน และต้านมะเร็งได้อย่างครอบคลุม (Devkota et al., 2021) ขณะที่ Terpinen-4-ol และ γ -Terpinene ก็มีบทบาทในการต้านจุลชีพและช่วยเสริมประสิทธิภาพของน้ำมันหอมระเหยจากไพลโดยรวม ส่วน Sabinene ซึ่งเป็นสารกลิ่นหอมที่พบในน้ำมันหอมระเหยของพืชหลายชนิดในวงศ์ Zingiberaceae มีรายงานว่าสามารถต้านจุลชีพ และมีคุณสมบัติเป็น antioxidant ตามธรรมชาติ ซึ่งมีส่วนช่วยเสริมคุณค่าทางเภสัชวิทยาของสารสกัดจากไพล (Devkota et al., 2021)

จากเหตุผลทั้งหมดนี้ สารทั้ง 12 ชนิดจึงได้รับการคัดเลือกให้เป็นตัวแทน (markers) ในการศึกษาปฏิสัมพันธ์กับไซโคลเด็กซ์ทรินผ่านเทคนิค Molecular Docking เพื่อประเมินศักยภาพของโมเลกุลในการเกิด inclusion complex และเป็นพื้นฐานสำหรับการพัฒนาเงื่อนไขการสกัดที่เหมาะสมในขั้นตอนต่อไป

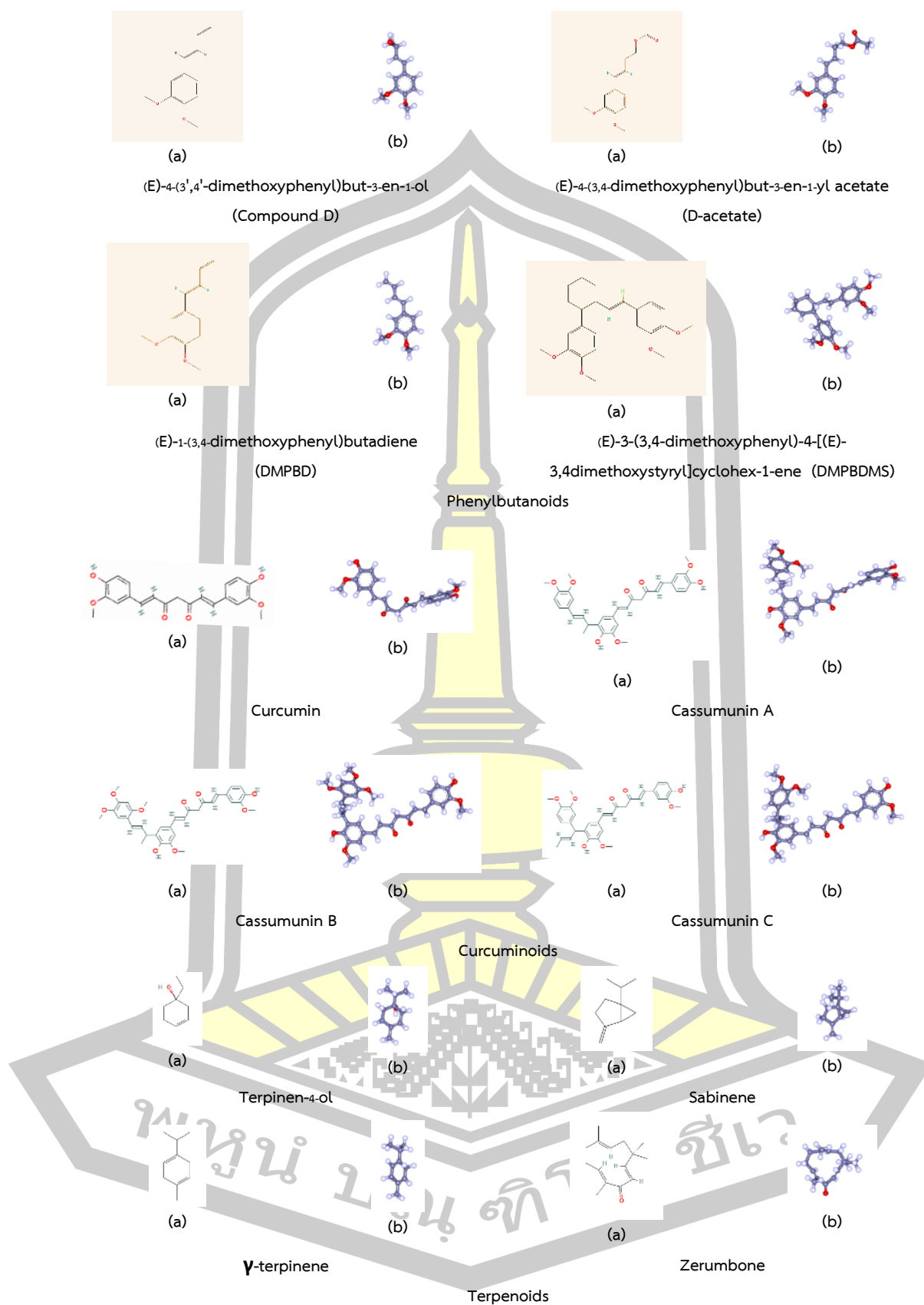
โครงสร้างสามมิติของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพได้รับการดาวน์โหลดจากฐานข้อมูล PubChem และปรับแต่งเพื่อให้เหมาะสมกับการศึกษา โดยเลือกสารออกฤทธิ์เป็นตัวแทนทั้งหมด 12 ชนิด แบ่งออกเป็นสามกลุ่มหลัก ได้แก่ Phenylbutanoids, Curcuminoids และ Terpenoids ซึ่งแต่ละกลุ่มมีองค์ประกอบโครงสร้างที่แตกต่างกันไป เมื่อนำโครงสร้างของโมเลกุลเข้าสู่โปรแกรม Discovery Studio 2021 Client มีการเติมอะตอมไฮโดรเจนเพื่อปรับโครงสร้างให้มีความเสถียรและใกล้เคียงกับสภาวะธรรมชาติของโมเลกุล พร้อมทั้งทำการลบโมเลกุลน้ำหรือสิ่งปนเปื้อนอื่น ๆ ที่อาจส่งผลต่อการคำนวณ (ภาพที่ 3.2)

3.4.3 การตั้งค่า Grid Box และการเตรียมไฟล์สำหรับ AutoDock Vina

การตั้งค่าพื้นที่การคำนวณหรือ Grid Box ในโปรแกรม AutoDockTools-1.5.7 มีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากต้องกำหนดบริเวณที่ต้องการให้เกิดการจับตัวของโมเลกุลอย่างแม่นยำ ขนาดของ Grid Box ถูกตั้งค่าไว้ที่ $40 \times 40 \times 40 \text{ \AA}$ โดยมี Grid-point spacing เท่ากับ $0.375 \text{ \AA}$ ซึ่งเป็นค่าที่ละเอียดเพียงพอในการตรวจสอบปฏิสัมพันธ์เชิงโมเลกุล ตำแหน่งศูนย์กลางของ Grid Box ถูกปรับให้อยู่บริเวณโพรงของไซโคลเด็กซ์ทริน เพื่อให้แน่ใจว่าพื้นที่ที่มีโอกาสเกิดปฏิสัมพันธ์จะถูกนำมาวิเคราะห์ทั้งหมด

ก่อนดำเนินการคำนวณ Molecular Docking ได้มีการสร้างไฟล์ configuration (.txt) สำหรับ AutoDock Vina โดยระบุค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม รวมถึงการทดสอบเบื้องต้นเพื่อให้แน่ใจว่าการตั้งค่าถูกต้องและสามารถนำไปใช้ได้จริง

พหุบัน ปณ จิต ชีเว



ภาพที่ 3.2 โครงสร้างสารสำคัญจากเหง้าโพล 12 ชนิด ในรูปแบบ a; 2D structures และ b; 3D structures (PubChem, 2024)

3.4.4 การดำเนินการ Molecular Docking

เริ่มต้นจากการนำโครงสร้างของไซโคลเด็กซ์ทรินและสารออกฤทธิ์ที่ผ่านการปรับแต่งเข้าสู่โปรแกรม AutoDockTools-1.5.7 เพื่อสร้างไฟล์ที่จำเป็นต่อการรัน Molecular Docking ได้แก่ ไฟล์โครงสร้างโมเลกุล (PDBQT) และไฟล์กำหนดค่า (Configuration File) ซึ่งระบุค่าพารามิเตอร์หลัก เช่น พิกัดของ Grid Box ที่ตั้งค่าไว้เพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่การจับตัวของไซโคลเด็กซ์ทรินอย่างเหมาะสม

จากนั้นทำการเรียกใช้ AutoDock Vina เพื่อดำเนินการคำนวณพลังงานการจับของไซโคลเด็กซ์ทรินแต่ละชนิดกับสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในแต่ละกลุ่ม กระบวนการนี้จะรันการคำนวณหลายรอบเพื่อหาท่าทางที่เหมาะสมที่สุดของโมเลกุล (Conformation with Lowest Energy) โดยพิจารณาจากค่าพลังงานต่ำที่สุดที่สามารถเกิดขึ้นได้ในสภาวะจำลอง

ผลลัพธ์จากการรัน Molecular Docking จะถูกบันทึกเป็น ไฟล์ Log และ PDBQT Output ซึ่งแสดงค่าพลังงานการจับของแต่ละคู่ของไซโคลเด็กซ์ทรินและสารสำคัญ จากนั้นนำผลลัพธ์ที่ได้เข้าสู่โปรแกรม Discovery Studio 2021 Client เพื่อวิเคราะห์รายละเอียดของการจับตัว ได้แก่ ตำแหน่งการจับตัว (Binding Site), การจัดวางโครงสร้างภายในโพรงของไซโคลเด็กซ์ทริน

เพื่อให้การวิเคราะห์มีความแม่นยำมากขึ้น มีการเปรียบเทียบผลลัพธ์จากการ Docking ในแต่ละคู่โมเลกุล โดยเฉพาะค่าพลังงานการจับ (Binding Affinity, kcal/mol) ข้อมูลเหล่านี้จะถูกนำมาพิจารณาเพื่อสรุปว่าไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดใดมีศักยภาพในการสร้าง Inclusion Complex ที่เสถียรที่สุดกับสารออกฤทธิ์ที่ศึกษา

หลังจากวิเคราะห์ผลเบื้องต้นแล้ว มีการตรวจสอบความถูกต้องของโครงสร้าง Docking ที่ได้ผ่านโปรแกรม Discovery Studio 2021 Client เพื่อประเมินการจัดวางของโมเลกุลในรูปแบบสามมิติ ผลลัพธ์ที่ได้จากการศึกษา Molecular Docking นี้จะเป็นข้อมูลสำคัญในการศึกษาศักยภาพของไซโคลเด็กซ์ทรินในกระบวนการสกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากเหง้าไพล และสามารถใช้เป็นแนวทางในการออกแบบกระบวนการสกัดที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในขั้นตอนถัดไป

3.5 การออกแบบการทดลอง (Experimental Design)

การออกแบบการทดลองในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อระบุปัจจัยที่มีผลต่อการสกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากเหง้าไพลโดยใช้ไซโคลเด็กซ์ทริน และเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกระบวนการสกัด การทดลองแบ่งออกเป็นสองขั้นตอนหลัก ได้แก่ การคัดกรองปัจจัย (Screening Study) และการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัด (Optimization Study) โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองทางสถิติที่เหมาะสม

3.5.1 การคัดกรองปัจจัย (Screening Study)

การคัดกรองปัจจัยเป็นกระบวนการสำคัญที่ช่วยจำแนกและเลือกปัจจัยที่มีผลกระทบสูงสุดต่อประสิทธิภาพของกระบวนการสกัด โดยใช้ D-optimal Design ซึ่งเป็นเทคนิคการออกแบบการทดลองที่สามารถลดจำนวนการทดลองที่ต้องทำลงได้ โดยยังคงความแม่นยำในการวิเคราะห์ผลลัพธ์ซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองในขั้นตอนนี้คือ MODDE 7.0 ซึ่งช่วยให้สามารถวิเคราะห์ผลเชิงสถิติได้อย่างแม่นยำ การศึกษานี้มุ่งเน้นไปที่ปัจจัยหลัก 8 ปัจจัยที่อาจส่งผลต่อกระบวนการสกัด

ปัจจัยที่ศึกษาในกระบวนการคัดกรอง ได้แก่

1. **ชนิดของ Cyclodextrin (X1)** เลือกใช้ประเภทต่าง ๆ ของไซโคลเด็กซ์ทรินเพื่อศึกษาความสามารถในการสร้าง Inclusion Complex กับสารออกฤทธิ์ ได้แก่ ACD, BCD, GCD, และอนุพันธ์ที่มีการดัดแปลงทางเคมี เช่น MBCD, SBEB CD, และ HPBCD
2. **ชนิดของสารเติมแต่ง (X2)** สารเติมแต่งต่าง ๆ เช่น PEG400, Glycerin, Propylene glycol, Sorbitol, Tween20 และ Tween80 ถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัด
3. **ความเข้มข้นของ Cyclodextrin (X3)** ศึกษาช่วงความเข้มข้นตั้งแต่ 10-30 mM เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในการเกิด Inclusion Complex
4. **น้ำหนักของเหง้าไพล (X4)** ศึกษาค่าตั้งแต่ 0.02-0.04 g/ml เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของปริมาณเหง้าไพลต่อกระบวนการสกัด
5. **เวลาในการสกัด (X5)** ตั้งแต่ 10-30 นาที เพื่อตรวจสอบว่าระยะเวลาที่ใช้มีผลต่อประสิทธิภาพของการสกัดสารออกฤทธิ์อย่างไร
6. **พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (X6)** ตั้งแต่ 140-280 W ศึกษาผลของพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ต่อการกระจายตัวของโมเลกุลในกระบวนการสกัด
7. **ความเข้มข้นของเอทานอล (X7)** ตั้งแต่ 20-30%w/w ถูกประเมินในฐานะตัวแปรที่อาจมีผลต่อพฤติกรรมของตัวทำละลายและประสิทธิภาพการสกัด โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ว่าเอทานอลในระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ส่งผลต่อปริมาณสารออกฤทธิ์ที่สกัดได้อย่างไร
8. **ความเข้มข้นของสารเติมแต่ง (X8)** ตั้งแต่ 5-15%w/w เพื่อศึกษาผลของปริมาณสารเติมแต่งที่ใช้

ตารางที่ 3.1 แสดงรายละเอียดของการทดลองที่ออกแบบในขั้นตอน Screening Study โดยใช้ D-optimal Design เพื่อระบุปัจจัยที่สำคัญในการสกัดสารออกฤทธิ์

Exp No	Run Order	X1	X2	X3 (mM)	X4 (g/ml)	X5 (min)	X6 (W)	X7 (%EtOH)	X8 (%Add)
1	27	ACD	PEG400	30 (1)	0.04 (1)	10 (-1)	140 (-1)	20 (-1)	5 (-1)
2	24	BCD	PEG400	10 (-1)	0.02 (-1)	10 (-1)	140 (-1)	30 (1)	15 (1)
3	8	GCD	PEG400	30 (1)	0.02 (-1)	30 (1)	280 (1)	30 (1)	15 (1)
4	6	MBCD	PEG400	30 (1)	0.04 (1)	10 (-1)	140 (-1)	20 (-1)	15 (1)
5	18	HPBCD	PEG400	10 (-1)	0.02 (-1)	30 (1)	280 (1)	30 (1)	5 (-1)
6	30	ACD	Glycerin	10 (-1)	0.02 (-1)	30 (1)	140 (-1)	30 (1)	15 (1)
7	32	BCD	Glycerin	30 (1)	0.04 (1)	30 (1)	140 (-1)	20 (-1)	15 (1)
8	5	GCD	Glycerin	10 (-1)	0.04 (1)	10 (-1)	280 (1)	20 (-1)	5 (-1)
9	33	MBCD	Glycerin	30 (1)	0.02 (-1)	10 (-1)	280 (1)	30 (1)	5 (-1)
10	28	SBEB CD	Glycerin	10 (-1)	0.02 (-1)	30 (1)	140 (-1)	30 (1)	15 (1)
11	19	ACD	Propylene glycol	10 (-1)	0.02 (-1)	10 (-1)	280 (1)	30 (1)	15 (1)
12	35	GCD	Propylene glycol	30 (1)	0.04 (1)	10 (-1)	140 (-1)	30 (1)	15 (1)
13	12	MBCD	Propylene glycol	10 (-1)	0.02 (-1)	30 (1)	280 (1)	20 (-1)	5 (-1)
14	10	SBEB CD	Propylene glycol	10 (-1)	0.04 (1)	30 (1)	140 (-1)	30 (1)	15 (1)
15	14	HPBCD	Propylene glycol	30 (1)	0.02 (-1)	30 (1)	140 (-1)	20 (-1)	5 (-1)
16	20	ACD	Sorbitol	30 (1)	0.02 (-1)	30 (1)	280 (1)	20 (-1)	15 (1)
17	29	BCD	Sorbitol	10 (-1)	0.04 (1)	10 (-1)	280 (1)	30 (1)	5 (-1)
18	16	GCD	Sorbitol	10 (-1)	0.02 (-1)	10 (-1)	140 (-1)	20 (-1)	15 (1)
19	15	MBCD	Sorbitol	10 (-1)	0.04 (1)	30 (1)	140 (-1)	30 (1)	5 (-1)
20	21	SBEB CD	Sorbitol	30 (1)	0.02 (-1)	30 (1)	140 (-1)	20 (-1)	5 (-1)
21	2	HPBCD	Sorbitol	30 (1)	0.04 (1)	10 (-1)	280 (1)	30 (1)	15 (1)
22	13	ACD	Tween20	10 (-1)	0.04 (1)	30 (1)	140 (-1)	30 (1)	5 (-1)
23	4	BCD	Tween20	30 (1)	0.02 (-1)	30 (1)	280 (1)	20 (-1)	15 (1)
24	34	GCD	Tween20	10 (-1)	0.04 (1)	30 (1)	280 (1)	20 (-1)	5 (-1)
25	1	MBCD	Tween20	10 (-1)	0.02 (-1)	10 (-1)	140 (-1)	20 (-1)	15 (1)
26	9	SBEB CD	Tween20	30 (1)	0.02 (-1)	10 (-1)	280 (1)	30 (1)	5 (-1)
27	22	HPBCD	Tween20	30 (1)	0.04 (1)	10 (-1)	140 (-1)	30 (1)	15 (1)
28	3	BCD	Tween80	30 (1)	0.02 (-1)	10 (-1)	140 (-1)	30 (1)	5 (-1)
29	23	GCD	Tween80	30 (1)	0.02 (-1)	30 (1)	140 (-1)	30 (1)	5 (-1)
30	7	MBCD	Tween80	30 (1)	0.04 (1)	30 (1)	280 (1)	30 (1)	15 (1)
31	25	SBEB CD	Tween80	10 (-1)	0.04 (1)	10 (-1)	280 (1)	20 (-1)	15 (1)
32	11	HPBCD	Tween80	10 (-1)	0.02 (-1)	10 (-1)	140 (-1)	20 (-1)	15 (1)
33	31	HPBCD	Tween80	20 (0)	0.03 (0)	20 (0)	210 (0)	25 (0)	10 (0)
34	17	HPBCD	Tween80	20 (0)	0.03 (0)	20 (0)	210 (0)	25 (0)	10 (0)
35	26	HPBCD	Tween80	20 (0)	0.03 (0)	20 (0)	210 (0)	25 (0)	10 (0)

จากตารางที่ 3.1 แสดงการออกแบบการทดลองในขั้นตอนนี้ใช้การสุ่มตัวอย่างเชิงสถิติ (Statistical Sampling) เพื่อให้ครอบคลุมทุกค่าของปัจจัยที่เลือก และกำหนดลำดับความสำคัญของแต่ละปัจจัยต่อกระบวนการสกัดโดยใช้ Analysis of Variance (ANOVA) ซึ่งช่วยวิเคราะห์ความแตกต่างของปัจจัย โดยพิจารณาค่า $p\text{-value} < 0.05$ เป็นเกณฑ์คัดเลือกปัจจัยที่มีนัยสำคัญทางสถิติ นอกจากนี้ การวิเคราะห์ผลยังใช้ Coefficient Chart เพื่อตรวจสอบความสำคัญของปัจจัยที่ส่งผลมากที่สุด และ Main Effect Plot เพื่อตรวจสอบแนวโน้มของปัจจัยแต่ละตัวต่อผลลัพธ์ของกระบวนการสกัด

การวัดผลการทดลอง (Experimental Response Variables)

1. ปริมาณ Compound D : วัดโดยใช้ HPLC เปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน Compound D รายงานเป็น $\mu\text{g/ml}$
2. ปริมาณ DMPBD : วัดโดยใช้ HPLC เปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน DMPBD รายงานเป็น $\mu\text{g/ml}$
3. ปริมาณ Curcuminoid content : วัดโดยใช้ HPLC เปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน Curcumin รายงานเป็น $\mu\text{g/ml}$
4. การต้านออกซิเดชัน: ประเมินด้วย DPPH assay รายงานเป็น μM Trolox equivalence ($\mu\text{M TE}$)
5. การต้านออกซิเดชัน: ประเมินด้วย ABTS assay รายงานเป็น μM Trolox equivalence ($\mu\text{M TE}$)
6. การต้านออกซิเดชัน : ประเมินด้วย FRAP assay รายงานเป็น μM Trolox equivalence ($\mu\text{M TE}$)

3.5.2 ขั้นตอนการเพิ่มประสิทธิภาพ (Optimization Study)

หลังจากคัดกรองปัจจัยสำคัญในขั้นตอน Screening Study พบว่าปัจจัยบางอย่างส่งผลต่อประสิทธิภาพการสกัดในระดับที่ต้องพิจารณาเพิ่มเติม ขั้นตอนนี้จึงมุ่งเน้นการปรับปรุงสภาวะการสกัดโดยใช้ Central Composite Face-Centered (CCF) Design ซึ่งเหมาะสมกับงานวิจัยที่มีการกำหนดช่วงค่าของปัจจัยไว้อย่างชัดเจน และต้องการศึกษาผลของปัจจัยหลายระดับพร้อมกัน เนื่องจากสามารถประเมินผลหลัก (main effects), ปฏิสัมพันธ์ (interactions) และความโค้ง (curvature) ของระบบได้อย่างครอบคลุม ทั้งยังใช้จำนวนการทดลองน้อยกว่า Full Factorial

Design ทำให้ประหยัดทรัพยากรแต่ยังคงความแม่นยำในการวิเคราะห์ ส่งผลให้การใช้ CCF Design เป็นทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับการพัฒนาสภาวะการสกัดที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในงานวิจัยนี้

แผนการทดลองสำหรับ Optimization Study เพื่อประเมินปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการสกัด การทดลองถูกออกแบบเป็น 5 แผนการศึกษา โดยมีรายละเอียดดังตารางที่ 3.2 ต่อไปนี้

ตารางที่ 3.2 แสดงรายละเอียดวัตถุประสงค์ในการศึกษา Optimization Study Plan 1-5

แผนการทดลอง	ส่วนประกอบที่ใช้	เป้าหมายของการศึกษา
Plan 1	HPBCD + เอทานอล + Tween80	ประเมินผลของการใช้ไซโคลเด็กซ์ทรีนร่วมกับเอทานอลและสารเติมแต่ง
Plan 2	HPBCD + เอทานอล	วิเคราะห์ผลของของไซโคลเด็กซ์ทรีนร่วมกับเอทานอลต่อกระบวนการสกัด
Plan 3	HPBCD + Tween80	วิเคราะห์ผลของของไซโคลเด็กซ์ทรีนร่วมกับสารเติมแต่งต่อกระบวนการสกัด
Plan 4	HPBCD เท่านั้น	ใช้เป็นแผนพื้นฐานเปรียบเทียบกับเงื่อนไขที่มีตัวทำละลายและสารเติมแต่งอื่น ๆ
Plan 5	HPBCD + เอทานอล + Tween80เปลี่ยนเป็น Shaking Extraction	เปรียบเทียบผลการสกัดเมื่อทำการเปลี่ยนเทคนิคที่ใช้ในการสกัด

การวิเคราะห์ผลการทดลอง

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองถูกวิเคราะห์โดยใช้ MODDE 7.0 ซึ่งช่วยให้สามารถประเมินปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อกระบวนการสกัดได้อย่างแม่นยำ โดยใช้เครื่องมือทางสถิติต่อไปนี้

Model Parameters Analysis วิเคราะห์ค่า R^2 , Q^2 และ Residual Standard Deviation (RSD) เพื่อตรวจสอบความแม่นยำของโมเดล และระบุระดับความสอดคล้องระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่พยากรณ์โดยแบบจำลองทางสถิติ

Effects Plot วิเคราะห์ผลกระทบของแต่ละปัจจัยต่อปริมาณ Compound D, DMPBD, Curcuminoid content และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในสารสกัด โดยการพิจารณาค่าทางสถิติที่ช่วยระบุปัจจัยที่มีผลต่อค่าการตอบสนอง

Response Surface Analysis วิเคราะห์พื้นผิวการตอบสนองเพื่อกำหนดสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการสกัด โดยสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยอิสระและค่าการตอบสนอง เพื่อช่วยให้สามารถระบุค่าที่เหมาะสมได้อย่างเป็นระบบ

ตารางที่ 3.3 - 3.7 แสดงรายละเอียดของการทดลองในแต่ละแผนการทดลอง ซึ่งช่วยให้สามารถเปรียบเทียบผลลัพธ์ของปัจจัยที่ใช้ได้อย่างชัดเจน และช่วยให้สามารถเลือกสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการสกัดได้

ขั้นตอนการเพิ่มประสิทธิภาพในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการกำหนดสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการสกัดสารออกฤทธิ์จากเหง้าไพลโดยใช้ไซโคลเด็กซ์ทริน การออกแบบการทดลองโดยใช้ Central Composite Face-Centered (CCF) Design และการวิเคราะห์ข้อมูลด้วย MODDE 7.0 ทำให้สามารถเข้าใจปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการสกัดได้อย่างลึกซึ้ง ส่งผลให้สามารถระบุปัจจัยที่มีความสำคัญและพัฒนาสภาวะการสกัดที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดได้อย่างเป็นระบบและแม่นยำ



ตารางที่ 3.3 แสดงรายละเอียดของการทดลองในขั้นตอน Optimization Study Plan 1

Exp No	Exp Name	Run Order	X3 (mM)	X5 (min)	X6 (W)	X7 (%EtOH)	X8 (%Add)
1	N1	2	10 (-1)	20 (-1)	140 (-1)	20 (-1)	15 (1)
2	N2	18	30 (1)	20 (-1)	140 (-1)	20 (-1)	5 (-1)
3	N3	26	10 (-1)	40 (1)	140 (-1)	20 (-1)	5 (-1)
4	N4	14	30 (1)	40 (1)	140 (-1)	20 (-1)	15 (1)
5	N5	9	10 (-1)	20 (-1)	280 (1)	20 (-1)	5 (-1)
6	N6	20	30 (1)	20 (-1)	280 (1)	20 (-1)	15 (1)
7	N7	7	10 (-1)	40 (1)	280 (1)	20 (-1)	15 (1)
8	N8	29	30 (1)	40 (1)	280 (1)	20 (-1)	5 (-1)
9	N9	13	10 (-1)	20 (-1)	140 (-1)	30 (1)	5 (-1)
10	N10	21	30 (1)	20 (-1)	140 (-1)	30 (1)	15 (1)
11	N11	17	10 (-1)	40 (1)	140 (-1)	30 (1)	15 (1)
12	N12	11	30 (1)	40 (1)	140 (-1)	30 (1)	5 (-1)
13	N13	6	10 (-1)	20 (-1)	280 (1)	30 (1)	15 (1)
14	N14	25	30 (1)	20 (-1)	280 (1)	30 (1)	5 (-1)
15	N15	23	10 (-1)	40 (1)	280 (1)	30 (1)	5 (-1)
16	N16	4	30 (1)	40 (1)	280 (1)	30 (1)	15 (1)
17	N17	22	10 (-1)	30 (0)	210 (0)	25 (0)	10 (0)
18	N18	12	30 (1)	30 (0)	210 (0)	25 (0)	10 (0)
19	N19	19	20 (0)	20 (-1)	210 (0)	25 (0)	10 (0)
20	N20	3	20 (0)	40 (1)	210 (0)	25 (0)	10 (0)
21	N21	5	20 (0)	30 (0)	140 (-1)	25 (0)	10 (0)
22	N22	27	20 (0)	30 (0)	280 (1)	25 (0)	10 (0)
23	N23	10	20 (0)	30 (0)	210 (0)	20 (-1)	10 (0)
24	N24	16	20 (0)	30 (0)	210 (0)	30 (1)	10 (0)
25	N25	15	20 (0)	30 (0)	210 (0)	25 (0)	5 (-1)
26	N26	24	20 (0)	30 (0)	210 (0)	25 (0)	15 (1)
27	N27	8	20 (0)	30 (0)	210 (0)	25 (0)	10 (0)
28	N28	28	20 (0)	30 (0)	210 (0)	25 (0)	10 (0)
29	N29	1	20 (0)	30 (0)	210 (0)	25 (0)	10 (0)

ตารางที่ 3.4 แสดงรายละเอียดของการทดลองในขั้นตอน Optimization Study Plan 2

Exp No	Exp Name	Run Order	X3 (mM)	X5 (min)	X6 (W)	X7 (%EtOH)
1	N1	12	10 (-1)	20 (-1)	140 (-1)	20 (-1)
2	N2	23	30 (1)	20 (-1)	140 (-1)	20 (-1)
3	N3	14	10 (-1)	40 (1)	140 (-1)	20 (-1)
4	N4	19	30 (1)	40 (1)	140 (-1)	20 (-1)
5	N5	17	10 (-1)	20 (-1)	280 (1)	20 (-1)
6	N6	25	30 (1)	20 (-1)	280 (1)	20 (-1)
7	N7	26	10 (-1)	40 (1)	280 (1)	20 (-1)
8	N8	20	30 (1)	40 (1)	280 (1)	20 (-1)
9	N9	18	10 (-1)	20 (-1)	140 (1)	30 (1)
10	N10	2	30 (1)	20 (-1)	140 (1)	30 (1)
11	N11	21	10 (-1)	40 (1)	140 (1)	30 (1)
12	N12	16	30 (1)	40 (1)	140 (1)	30 (1)
13	N13	7	10 (-1)	20 (-1)	280 (1)	30 (1)
14	N14	9	30 (1)	20 (-1)	280 (1)	30 (1)
15	N15	5	10 (-1)	40 (1)	280 (1)	30 (1)
16	N16	3	30 (1)	40 (1)	280 (1)	30 (1)
17	N17	24	10 (-1)	30 (0)	210 (0)	25 (0)
18	N18	27	30 (1)	30 (0)	210 (0)	25 (0)
19	N19	22	20 (0)	20 (-1)	210 (0)	25 (0)
20	N20	13	20 (0)	40 (1)	210 (0)	25 (0)
21	N21	15	20 (0)	30 (0)	140 (-1)	25 (0)
22	N22	1	20 (0)	30 (0)	280 (1)	25 (0)
23	N23	6	20 (0)	30 (0)	210 (0)	20 (-1)
24	N24	8	20 (0)	30 (0)	210 (0)	30 (1)
25	N25	11	20 (0)	30 (0)	210 (0)	25 (0)
26	N26	4	20 (0)	30 (0)	210 (0)	25 (0)
27	N27	10	20 (0)	30 (0)	210 (0)	25 (0)

พหุ ประสิทธิภาพ

ตารางที่ 3.5 แสดงรายละเอียดของการทดลองในขั้นตอน Optimization Study Plan 3

Exp No	Exp Name	Run Order	X3 (mM)	X5 (min)	X6 (W)	X8 (%Add)
1	N1	13	10 (-1)	20 (-1)	140 (-1)	5 (-1)
2	N2	3	30 (1)	20 (-1)	140 (-1)	5 (-1)
3	N3	16	10 (-1)	40 (1)	140 (-1)	5 (-1)
4	N4	14	30 (1)	40 (1)	140 (-1)	5 (-1)
5	N5	20	10 (-1)	20 (-1)	280 (1)	5 (-1)
6	N6	19	30 (1)	20 (-1)	280 (1)	5 (-1)
7	N7	23	10 (-1)	40 (1)	280 (1)	5 (-1)
8	N8	2	30 (1)	40 (1)	280 (1)	5 (-1)
9	N9	5	10 (-1)	20 (-1)	140 (-1)	15 (1)
10	N10	11	30 (1)	20 (-1)	140 (-1)	15 (1)
11	N11	6	10 (-1)	40 (1)	140 (-1)	15 (1)
12	N12	15	30 (1)	40 (1)	140 (-1)	15 (1)
13	N13	22	10 (-1)	20 (-1)	280 (1)	15 (1)
14	N14	26	30 (1)	20 (-1)	280 (1)	15 (1)
15	N15	8	10 (-1)	40 (1)	280 (1)	15 (1)
16	N16	4	30 (1)	40 (1)	280 (1)	15 (1)
17	N17	1	10 (-1)	30 (0)	210 (0)	10 (0)
18	N18	17	30 (1)	30 (0)	210 (0)	10 (0)
19	N19	24	20 (0)	20 (-1)	210 (0)	10 (0)
20	N20	10	20 (0)	40 (1)	210 (0)	10 (0)
21	N21	25	20 (0)	30 (0)	140 (-1)	10 (0)
22	N22	18	20 (0)	30 (0)	280 (1)	10 (0)
23	N23	12	20 (0)	30 (0)	210 (0)	5 (-1)
24	N24	27	20 (0)	30 (0)	210 (0)	15 (1)
25	N25	9	20 (0)	30 (0)	210 (0)	10 (0)
26	N26	7	20 (0)	30 (0)	210 (0)	10 (0)
27	N27	21	20 (0)	30 (0)	210 (0)	10 (0)

พหุ ประถมศึกษา

ตารางที่ 3.6 แสดงรายละเอียดของการทดลองในขั้นตอน Optimization Study Plan 4

Exp No	Exp Name	Run Order	X3 (mM)	X5 (min)	X6 (W)
1	N1	15	10 (-1)	20 (-1)	140 (-1)
2	N2	6	30 (1)	20 (-1)	140 (-1)
3	N3	14	10 (-1)	40 (1)	140 (-1)
4	N4	13	30 (1)	40 (1)	140 (-1)
5	N5	11	10 (-1)	20 (-1)	280 (1)
6	N6	16	30 (1)	20 (-1)	280 (1)
7	N7	4	10 (-1)	40 (1)	280 (1)
8	N8	10	30 (1)	40 (1)	280 (1)
9	N9	7	10 (-1)	30 (0)	210 (0)
10	N10	12	30 (1)	30 (0)	210 (0)
11	N11	2	20 (0)	20 (-1)	210 (0)
12	N12	17	20 (0)	40 (1)	210 (0)
13	N13	3	20 (0)	30 (0)	140 (-1)
14	N14	1	20 (0)	30 (0)	280 (1)
15	N15	5	20 (0)	30 (0)	210 (0)
16	N16	8	20 (0)	30 (0)	210 (0)
17	N17	9	20 (0)	30 (0)	210 (0)



ตารางที่ 3.7 แสดงรายละเอียดของการทดลองในขั้นตอน Optimization Study Plan 5

Exp No	Exp Name	Run Order	X3 (mM)	X5 (min)	X7 (%EtOH)	X8 (%Add)	X9 (°C)
1	N1	1	10 (-1)	60 (-1)	20 (-1)	15 (1)	40 (-1)
2	N2	9	30 (1)	60 (-1)	20 (-1)	5 (-1)	40 (-1)
3	N3	16	10 (-1)	180 (1)	20 (-1)	5 (-1)	40 (-1)
4	N4	18	30 (1)	180 (1)	20 (-1)	15 (1)	40 (-1)
5	N5	15	10 (-1)	60 (-1)	20 (-1)	5 (-1)	60 (1)
6	N6	26	30 (1)	60 (-1)	20 (-1)	15 (1)	60 (1)
7	N7	22	10 (-1)	180 (1)	20 (-1)	15 (1)	60 (1)
8	N8	4	30 (1)	180 (1)	20 (-1)	5 (-1)	60 (1)
9	N9	29	10 (-1)	60 (-1)	30 (1)	5 (-1)	40 (-1)
10	N10	12	30 (1)	60 (-1)	30 (1)	15 (1)	40 (-1)
11	N11	7	10 (-1)	180 (1)	30 (1)	15 (1)	40 (-1)
12	N12	23	30 (1)	180 (1)	30 (1)	5 (-1)	40 (-1)
13	N13	5	10 (-1)	60 (-1)	30 (1)	15 (1)	60 (1)
14	N14	20	30 (1)	60 (-1)	30 (1)	5 (-1)	60 (1)
15	N15	14	10 (-1)	180 (1)	30 (1)	5 (-1)	60 (1)
16	N16	28	30 (1)	180 (1)	30 (1)	15 (1)	60 (1)
17	N17	6	10 (-1)	120 (0)	25 (0)	10 (0)	50 (0)
18	N18	17	30 (1)	120 (0)	25 (0)	10 (0)	50 (0)
19	N19	27	20 (0)	60 (-1)	25 (0)	10 (0)	50 (0)
20	N20	11	20 (0)	180 (1)	25 (0)	10 (0)	50 (0)
21	N21	24	20 (0)	120 (0)	25 (0)	10 (0)	40 (-1)
22	N22	2	20 (0)	120 (0)	25 (0)	10 (0)	60 (1)
23	N23	19	20 (0)	120 (0)	20 (-1)	10 (0)	50 (0)
24	N24	3	20 (0)	120 (0)	30 (1)	10 (0)	50 (0)
25	N25	21	20 (0)	120 (0)	25 (0)	5 (-1)	50 (0)
26	N26	13	20 (0)	120 (0)	25 (0)	15 (1)	50 (0)
27	N27	10	20 (0)	120 (0)	25 (0)	10 (0)	50 (0)
28	N28	25	20 (0)	120 (0)	25 (0)	10 (0)	50 (0)
29	N29	8	20 (0)	120 (0)	25 (0)	10 (0)	50 (0)

3.5.3 ขั้นตอนการดำเนินการสกัด

ในงานวิจัยนี้ กระบวนการสกัดสารออกฤทธิ์จากเหง้าไพลได้รับการออกแบบให้เหมือนกันทั้งในขั้นตอน Screening Study และ Optimization Study เพื่อให้ได้สารสกัดที่มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยการสกัดสารออกฤทธิ์ด้วย Cyclodextrin-assisted extraction ประกอบไปด้วยขั้นตอนหลักดังนี้

1. การเตรียมสารละลายและตัวทำละลาย

1.1 การเตรียมตัวทำละลาย เลือกใช้ตัวทำละลายที่กำหนดไว้ในแต่ละแผนการทดลอง โดยเตรียมสารละลายผสมเอทานอล (ตามเปอร์เซ็นต์ที่ระบุ เช่น 20-30%) และน้ำในปริมาณที่กำหนดในแผนการทดลองแต่ละแบบ สำหรับตัวทำละลายที่มีสารเติมแต่ง เช่น Tween80 ให้ผสมสารเติมแต่งในปริมาณที่กำหนด (เช่น 5-15%) ร่วมกับตัวทำละลายจนละลายที่เป็นเนื้อเดียวกัน

1.2 การเตรียม Cyclodextrin เลือกชนิดตามที่กำหนดในแผนการทดลอง (เช่น HPBCD) ซึ่งในความเข้มข้นที่ระบุ (เช่น 10-30 mM) และเติมลงในสารละลายตัวทำละลายที่เตรียมไว้จากขั้นตอน 1.1 ผสมสารละลายให้เข้ากันจนละลายอย่างสมบูรณ์

2. การเตรียมเหง้าไพลสำหรับการสกัด

2.1 การชั่งน้ำหนักเหง้าไพล ชั่งน้ำหนักเหง้าไพลที่เตรียมไว้ตามปริมาณที่กำหนดในแผนการทดลองแต่ละแบบ (เช่น 0.02 g/ml)

2.2 การผสมเหง้าไพลกับสารละลายที่เตรียมไว้ นำเหง้าไพลที่ชั่งน้ำหนักแล้วใส่ลงในหลอดทดลองชนิด centrifuge tube 15 ml เติมสารละลาย Cyclodextrin ที่เตรียมไว้ในปริมาณที่กำหนด (เช่น 10 มิลลิลิตร) ลงไปในหลอดทดลอง เติมน้ำและ Methanol ในหลอดที่ใช้เป็น control เปรียบเทียบในการสกัด เขย่าส่วนผสมให้เข้ากันเพื่อให้เหง้าไพลสัมผัสกับตัวทำละลายอย่างทั่วถึง

3. ขั้นตอนการดำเนินการสกัด

3.1 Ultrasound-assisted extraction (UAE)

การตั้งค่าอุปกรณ์อ่างอัลตราโซนิก (Ultrasonic Bath) โดยเลือกกำลังไฟฟ้าตามที่กำหนดในแผนการทดลอง (เช่น 140-280 W) และตั้งค่าเวลาในการสกัดให้ตรงตามที่กำหนด (เช่น 20-40 นาที) นำ centrifuge tube ที่เตรียมไว้ใส่ลงไปที่มีอุณหภูมิห้อง เริ่มกระบวนการสกัดโดยการเปิดใช้งานเครื่องตามระยะเวลาที่กำหนด กระบวนการนี้จะช่วยเพิ่มการปลดปล่อยสารออกฤทธิ์จากเหง้าไพล โดยการทำให้เกิดการขยายตัวและหดตัวของคลื่นเสียงซึ่งจะช่วยแยกสารสำคัญออกจากเหง้าไพลได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้ ในระหว่างกระบวนการสกัดด้วยอัลตราโซนิก มีการควบคุมอุณหภูมิของอ่างอัลตราโซนิกให้อยู่ในช่วง ไม่เกิน 35-40°C โดยใช้น้ำในอ่างเปลี่ยนเป็นระยะ และมีการตรวจวัดอุณหภูมิเป็นระยะทุก 10 นาที เพื่อป้องกันไม่ให้อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อความเสถียรของสารออกฤทธิ์ในเหง้าไพล โดยเฉพาะกลุ่มฟีนอลบิวทานอยด์และเคอร์คูมินอยด์ที่อาจไวต่อความร้อน

3.2 Shaking extraction (SE)

การตั้งค่าเครื่อง Shaking Incubator โดยกำหนดปัจจัยในแผนการทดลอง เช่น อุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด (40-60 องศาเซลเซียส) และระยะเวลาที่ใช้ในการสกัด (60-180 นาที) และกำหนดการเขย่า (Shaking) ที่ความเร็ว 200 rpm คงที่ตลอดการสกัดในทุกการศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุด ในการสกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากเหง้าไพล เมื่อทำการตั้งค่าเครื่องเป็นที่เรียบร้อยแล้ว นำ centrifuge tube ที่เตรียมไว้มานผสมให้เข้ากันโดยใช้ Vortex Mixer จากนั้นนำไปใส่ลงในเครื่อง Shaking Incubator เริ่มกระบวนการสกัดโดยการเปิดใช้งานตามระยะเวลาที่กำหนด

3.3 การทอดน้ำมัน (Hot oil extract; HOE)

ในงานวิจัยนี้ การสกัดน้ำมันจากเหง้าไพล (*Zingiber montanum* (J.König) Link ex Dietr.) ถูกดำเนินการโดยใช้วิธี Hot Oil Extraction (HOE) โดยดัดแปลงวิธีการสกัดงานวิจัยของ Singharach และคณะ (2020) น้ำมันมะพร้าวถูกเลือกใช้เป็นตัวทำละลายในการสกัดเนื่องจากมีคุณสมบัติเสริมฤทธิ์ทางชีวภาพและเป็นวัตถุดิบที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในตำรายาไทยดั้งเดิม สำหรับวิธีการที่ทำการประยุกต์โดย นำผงเหง้าไพลขนาด 0.2 กรัม ซึ่งเตรียมจากการอบแห้งและบดละเอียด ถูกนำมาผสมกับน้ำมันมะพร้าวปริมาณ 10 มิลลิลิตรในบีกเกอร์ น้ำมันมะพร้าวถูกตั้งในภาชนะควบคุมอุณหภูมิ และความร้อนถูกปรับให้คงที่ที่ 160°C ตลอดกระบวนการ ผงไพลถูกทอดในน้ำมันเป็นเวลา 15 นาที โดยมีการกวนเป็นระยะเพื่อให้ไพลสัมผัสกับน้ำมันอย่างทั่วถึง หลังจากครบเวลาที่กำหนด น้ำมันที่ได้ถูกกรองผ่านกระดาษกรองเพื่อนำกากออก และสารสกัดที่ได้ถูกเก็บในภาชนะปิดสนิทเพื่อนำไปเก็บรักษาในตู้เย็นที่อุณหภูมิ ต่ำกว่า 4°C

3.4 การสกัดโดยใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ (Organic solvent maceration; OS)

ดำเนินการด้วยวิธี Organic Solvent Maceration (Han et al., 2021, Suksaeree et al., 2013) โดยเริ่มจากการชั่งผงเหง้าไพลปริมาณ 0.2 กรัม และนำไปใส่ในหลอดขนาด 15 ml ตัวทำละลายที่เลือกใช้ในการสกัด ได้แก่ เฮกเซน (Hexane) และ เมทานอล (Methanol) ซึ่งเป็นตัวทำละลายอินทรีย์ที่มีสมบัติแตกต่างกัน โดยเฮกเซนใช้สำหรับการดึงสารสำคัญกลุ่ม phenylbutenoids ที่ละลายในตัวทำละลายไม่ขั้ว ขณะที่เมทานอลเหมาะสำหรับการดึงสารกลุ่ม curcuminoids ที่ละลายในตัวทำละลายขั้ว โดยเติมตัวทำละลายในปริมาตร 10 ml ในการสกัด กระบวนการแช่ดำเนินการในอุณหภูมิห้อง (25–30°C) เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ซึ่งเป็นระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการสกัดสารสำคัญในตัวทำละลายอินทรีย์) ในระหว่างการแช่ ได้ทำการเขย่าหรือคนตัวอย่างเบา ๆ ทุก 12 ชั่วโมง เพื่อเพิ่มการกระจายตัวของตัวทำละลายและประสิทธิภาพการสกัดทำจนครบเวลา 48 ชั่วโมง

4. การแยกสารสกัด

การหมุนเหวี่ยงเพื่อแยกสารสกัด เมื่อกระบวนการสกัดเสร็จสิ้นให้นำหลอดทดลองไปหมุนเหวี่ยงที่ความเร็ว 6000 รอบต่อนาที (rpm) เป็นเวลา 15 นาที การหมุนเหวี่ยงจะช่วยแยกส่วนของแข็งที่เหลืออยู่จากเหง้าไพลออกจากสารสกัดที่เป็นของเหลว กรองสารสกัดที่ได้เพื่อแยกส่วนที่เป็นของแข็งออกด้วย Syringe Filters เพื่อให้ได้สารสกัดที่ใสและปราศจากสิ่งเจือปน เก็บสารสกัดได้ในขวดเก็บตัวอย่างที่สะอาดและปิดฝาให้สนิท สารสกัดนี้จะถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณสารสำคัญในสารสกัดไพลโดยการวิธี HPLC และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในขั้นตอนถัดไป

3.5.4 การตรวจสอบความถูกต้องของผลการทดลอง (Verification of Experimental Results)

การตรวจสอบความถูกต้องของผลการทดลองเป็นกระบวนการสำคัญในการยืนยันว่าสภาวะที่ได้รับการปรับปรุงประสิทธิภาพ (Optimized Conditions) สามารถนำไปใช้งานได้จริงและให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องเมื่อทำซ้ำ โดยการตรวจสอบนี้เน้นการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองจริงกับค่าที่คาดการณ์โดยแบบจำลองทางสถิติ เพื่อประเมินความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของกระบวนการสกัดที่ได้รับการปรับปรุง

กระบวนการตรวจสอบผลการทดลอง

เพื่อให้มั่นใจในความถูกต้องของผลลัพธ์ สารสกัดจากเหง้าไพลถูกเตรียมขึ้นภายใต้สภาวะที่เหมาะสมที่สุดจากการศึกษาในขั้นตอน Optimization Study จากนั้นนำสารสกัดที่ได้ไปวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระโดยใช้ DPPH Assay, ABTS Assay และ FRAP Assay รวมถึงการวิเคราะห์ปริมาณสารสำคัญด้วย High Performance Liquid Chromatography (HPLC) ในการตรวจสอบ มีการทำซ้ำ (Replication) อย่างน้อย 3 ครั้ง เพื่อประเมินความสม่ำเสมอของผลลัพธ์และลดความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการทดลอง ข้อมูลที่ได้รับจากการทดลองจริงจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่คาดการณ์โดยใช้แบบจำลองทางสถิติที่พัฒนาขึ้นจากกระบวนการ Optimization การตรวจสอบความถูกต้องของผลการทดลองดำเนินการโดยคำนวณ ค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (Relative Error, %RE) ซึ่งใช้ในการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าที่คาดการณ์จากแบบจำลองกับค่าที่ได้จากการทดลองจริง โดยค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\%RE = \left(\frac{\text{ค่าที่คาดการณ์} - \text{ค่าที่ทดลองได้}}{\text{ค่าที่คาดการณ์}} \right) \times 100$$

หากค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ แสดงว่าสถานะที่ได้รับการปรับปรุงมีความน่าเชื่อถือและสามารถนำไปใช้ได้จริง อย่างไรก็ตาม หากพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนสูงหรือต่ำกว่าข้อกำหนดที่ยอมรับได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้กำหนดไว้ที่ ร้อยละ 5 จำเป็นต้องตรวจสอบปัจจัยที่อาจส่งผลต่อความแม่นยำของผลลัพธ์ เช่น ความเสถียรของสารสกัด ความแม่นยำของเครื่องมือ หรือความผิดพลาดในขั้นตอนการวิเคราะห์ ผลการตรวจสอบความถูกต้องของกระบวนการนี้ช่วยยืนยันว่าผลลัพธ์จากเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดมีความสอดคล้องและสามารถทำซ้ำได้ โดยข้อมูลที่ได้รับจากการทดลองจะถูกนำไปใช้เป็นหลักฐานสนับสนุนว่าสถานะที่ได้จากการศึกษา Optimization Study สามารถนำไปใช้ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์และการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่อไป กระบวนการตรวจสอบความถูกต้องของผลการทดลองจึงเป็นขั้นตอนสำคัญที่ช่วยเสริมสร้างความมั่นใจในความแม่นยำและเสถียรภาพของกระบวนการที่ได้รับการพัฒนา

3.6 การวิเคราะห์ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากเหง้าไพลด้วยวิธีเทคนิคโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (High Performance Liquid Chromatography, HPLC)

การวิเคราะห์ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากเหง้าไพลดำเนินการโดยใช้เทคนิคโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (HPLC) ซึ่งเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงในการแยกและวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสารสกัด กระบวนการนี้ได้รับการปรับปรุงจากงานวิจัยก่อนหน้านี้เพื่อเพิ่มความแม่นยำและความสามารถในการตรวจวัดสารสำคัญที่เกี่ยวข้อง

3.6.1 วิเคราะห์ปริมาณสารกลุ่ม Phenylbutanoids และ Curcuminoids

ในการศึกษาครั้งนี้ได้เลือกใช้ Compound D และ DMPBD จากกลุ่ม Phenylbutanoids รวมถึง Curcumin จากกลุ่ม Curcuminoids เป็นสารเป้าหมายในการตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิค High Performance Liquid Chromatography (HPLC) เนื่องจากสารเหล่านี้เป็นองค์ประกอบหลักที่พบในเหง้าไพล และมีรายงานว่าสัมพันธ์โดยตรงกับฤทธิ์ทางเภสัชวิทยาที่สำคัญ เช่น ฤทธิ์ต้านการอักเสบ ต้านอนุมูลอิสระ และฤทธิ์บรรเทาอาการปวด [Panthong et al., 1997; Choudhury et al., 2018]

โดยเฉพาะ Compound D ซึ่งมีโครงสร้างเฉพาะที่พบในไพลเท่านั้น และได้รับการยอมรับว่าเป็น marker ที่ใช้ควบคุมคุณภาพของสารสกัดไพลอย่างมีประสิทธิภาพ ขณะที่ DMPBD เป็นสารในกลุ่มเดียวกันที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพเสริมกัน และ Curcumin ได้รับการเลือกใช้เป็นตัวแทนหลักของกลุ่ม Curcuminoids ในการวัด “Curcuminoid content” เนื่องจากเป็นสารที่มีปริมาณมากที่สุดในกลุ่มนี้ มีโครงสร้างเสถียร และให้ผลการวิเคราะห์ที่ชัดเจนแม่นยำเมื่อใช้เทคนิค HPLC

เงื่อนไขและพารามิเตอร์ของ HPLC

- คอลัมน์ที่ใช้ C18 (ขนาด 250 mm × 4.6 mm) ซึ่งเป็นคอลัมน์ที่เหมาะสมสำหรับการแยกสารออกฤทธิ์ของเหง้าไพล
- อุณหภูมิของคอลัมน์ ควบคุมที่ 25°C เพื่อให้การแยกสารเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ
- ปริมาตรของสารตัวอย่างที่ฉีดเข้าเครื่อง HPLC 10 ไมโครลิตร
- เฟสเคลื่อนที่ (Mobile Phase)
 - o เฟส A: Absolute Acetonitrile
 - o เฟส B: สารละลาย Trifluoroacetic Acid (TFA) 0.1%
 - o อัตราส่วนเฟสเคลื่อนที่ที่กำหนดให้เหมาะสมเพื่อให้เกิดการแยกสารได้อย่างมีประสิทธิภาพ (ตารางที่ 3.8)

- อัตราการไหล (Flow Rate) 0.8 มิลลิลิตรต่อวินาที

การตรวจวัดปริมาณสารสำคัญ

การติดตามปริมาณสารออกฤทธิ์ที่สำคัญในสารสกัดดำเนินการโดยวัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นเฉพาะของแต่ละสารดังนี้

- Compound D (กลุ่ม Phenylbutanoids) ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร
- DMPBD (กลุ่ม Phenylbutanoids) ความยาวคลื่น 284 นาโนเมตร
- Curcuminoid content ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร

การใช้ HPLC ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดช่วยให้สามารถแยกและตรวจวัดปริมาณสารออกฤทธิ์ได้อย่างแม่นยำและเชื่อถือได้ ซึ่งเป็นขั้นตอนสำคัญในการประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดและตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของสารสกัดจากเหง้าไพล

พญ. ปณ. จิตโต ชีวะ

ตารางที่ 3.8 แสดงการเปลี่ยนแปลงสถานะของเฟสเคลื่อนที่โดยใช้วิธี HPLC

Time (min)	Percentage of solvent (%)	
	Mobile phase A	Mobile phase B
	(Acetonitrile)	(Trifluoroacetic Acid 0.1%)
0	10	90
5	20	80
10	40	60
15	50	50
25	60	40
25	90	10
30	100	0
40	10	90
45	10	90

3.6.2 การเตรียมสารมาตรฐาน Compound D เพื่อสร้างกราฟมาตรฐาน

การเตรียมสารมาตรฐาน Compound D (Y1) มีความสำคัญในการสร้างกราฟมาตรฐานสำหรับการคำนวณปริมาณของสารในตัวอย่างทดลอง อ้างอิงวิธีการเตรียมสารตามแนวทางของ Janpim et al. (2012) เพื่อให้ได้ความเข้มข้นที่แม่นยำและสอดคล้องกับมาตรฐานการวิเคราะห์ด้วย High Performance Liquid Chromatography (HPLC)

การเตรียมสารละลายมาตรฐาน Compound D

1. เตรียมสารละลายมาตรฐาน Compound D ใน เมทานอลบริสุทธิ์ ให้มีความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 200 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร
2. ทำการเจือจางสารละลายมาตรฐานให้มีช่วงความเข้มข้นของสารมาตรฐาน Compound D ที่เลือกใช้ (6.25, 12.5, 25, 50 และ 100 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร) ได้รับการกำหนดโดยอ้างอิงจากการศึกษาที่ผ่านมา (Janpim et al., 2012) และผลการทดลองเบื้องต้นของงานวิจัยนี้ โดยครอบคลุมช่วงความเข้มข้นที่พบได้จริงในสารสกัดจากเหง้าไพล และอยู่ในช่วงที่ให้ความสัมพันธ์เชิงเส้น (linear relationship) ระหว่างความเข้มข้นกับพื้นที่ใต้พีคของกราฟมาตรฐาน ซึ่งมีความแม่นยำและความน่าเชื่อถือสูงในการคำนวณปริมาณสารในตัวอย่าง

3. สารละลายมาตรฐานแต่ละระดับความเข้มข้นถูกฉีดเข้าเครื่อง HPLC เพื่อวิเคราะห์พื้นที่ใต้พีคของสารมาตรฐานที่แต่ละความเข้มข้น

4. ข้อมูลพื้นที่ใต้พีคที่ได้รับถูกนำมาใช้สร้าง กราฟมาตรฐาน (Calibration Curve) โดยพล็อตความสัมพันธ์ระหว่าง พื้นที่ใต้พีค (Peak Area) กับ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน Compound D (ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร)

5. สมการที่ได้จากกราฟมาตรฐานถูกนำไปใช้คำนวณปริมาณ Compound D ในสารสกัดจากเหง้าไพล โดยแทนค่าพื้นที่ใต้พีคของตัวอย่างลงในสมการ

3.6.3 การเตรียมสารมาตรฐาน DMPBD เพื่อสร้างกราฟมาตรฐาน

การเตรียมสารมาตรฐาน DMPBD (Y2) มีความสำคัญต่อการสร้างกราฟมาตรฐานเพื่อใช้คำนวณปริมาณของสารในตัวอย่างทดลอง อ้างอิงแนวทางการเตรียมสารตามงานวิจัยของ Janpim et al. (2012) เพื่อให้การวิเคราะห์ด้วย High Performance Liquid Chromatography (HPLC) มีความแม่นยำและน่าเชื่อถือ

การเตรียมสารละลายมาตรฐาน DMPBD

1. เตรียมสารละลายมาตรฐาน DMPBD ใน เมทานอลบริสุทธิ์ โดยให้มีความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 1,000 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร

2. ทำการเจือจางสารละลายมาตรฐานโดยเลือกช่วงความเข้มข้นที่ 50, 100, 200, 400 และ 1,000 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร สำหรับ DMPBD อ้างอิงจากแนวทางของ Janpim et al. (2012) ซึ่งครอบคลุมค่าที่เหมาะสมกับปริมาณสารที่คาดว่าจะพบในสารสกัด รวมถึงอยู่ในช่วง linear range ของเครื่อง HPLC ที่สามารถตรวจวัดปริมาณสารได้อย่างแม่นยำและมีค่าความสัมพันธ์ (correlation coefficient) อยู่ในระดับที่น่าเชื่อถือ

3. นำสารละลายมาตรฐานแต่ละระดับความเข้มข้นฉีดเข้าเครื่อง HPLC เพื่อวิเคราะห์พื้นที่ใต้พีคของสารละลายมาตรฐานที่แต่ละความเข้มข้น

4. ข้อมูลพื้นที่ใต้พีคที่ได้รับถูกนำมาสร้าง กราฟมาตรฐาน (Calibration Curve) โดยพล็อตความสัมพันธ์ระหว่าง พื้นที่ใต้พีค (Peak Area) กับ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน DMPBD (ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร)

5. สมการที่ได้จากกราฟมาตรฐานถูกนำไปใช้คำนวณปริมาณ DMPBD ในสารสกัดจากเหง้าไพล โดยแทนค่าพื้นที่ใต้พีคของตัวอย่างลงในสมการ

3.6.4 การเตรียมสารมาตรฐาน Curcuminoids เพื่อสร้างกราฟสารมาตรฐาน

การเตรียมสารมาตรฐาน Curcuminoids มีความสำคัญต่อการสร้างกราฟมาตรฐานที่ใช้ในการคำนวณปริมาณของสารออกฤทธิ์ในตัวอย่างทดลอง อ้างอิงแนวทางการเตรียมสารตามงานวิจัยของ Janpim et al. (2012) เพื่อให้การวิเคราะห์ด้วย High Performance Liquid Chromatography (HPLC) มีความแม่นยำและความน่าเชื่อถือสูงสุด

การเตรียมสารละลายมาตรฐาน Curcuminoids

1. เตรียมสารละลายมาตรฐาน Curcuminoids ใน เมทานอลบริสุทธิ์ โดยให้ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 1,000 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร
2. ทำการเจือจางสารละลายมาตรฐานช่วงความเข้มข้นของสารมาตรฐาน Curcuminoids ที่ใช้ (1, 5, 10, 50 และ 100 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร) ได้รับการออกแบบให้ครอบคลุมช่วงความเข้มข้นที่คาดว่าจะพบในตัวอย่างจริง และเป็นช่วงที่ให้ความแม่นยำสูงในการตรวจวัดด้วยเทคนิค HPLC โดยพิจารณาจากการทดลองเบื้องต้นและข้อมูลอ้างอิงจากงานวิจัยก่อนหน้า ซึ่งช่วยให้ได้กราฟมาตรฐานที่มีความแม่นยำและสามารถใช้คำนวณปริมาณสารออกฤทธิ์ในสารสกัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ
3. นำสารละลายมาตรฐานแต่ละระดับความเข้มข้นฉีดเข้าเครื่อง HPLC เพื่อวิเคราะห์พื้นที่ใต้พีคของสารละลายมาตรฐานที่แต่ละความเข้มข้น
4. ข้อมูลพื้นที่ใต้พีคที่ได้รับถูกนำมาสร้าง กราฟมาตรฐาน (Calibration Curve) โดยพล็อตความสัมพันธ์ระหว่าง พื้นที่ใต้พีค (Peak Area) กับ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน Curcuminoids (ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร)
5. สมการที่ได้จากกราฟมาตรฐานถูกนำไปใช้คำนวณปริมาณ Curcuminoids ในสารสกัดจากเหง้าไพล โดยแทนค่าพื้นที่ใต้พีคของตัวอย่างลงในสมการ

การสร้างกราฟมาตรฐานที่แม่นยำและเป็นไปตามหลักการวิเคราะห์ด้วย HPLC ช่วยให้สามารถตรวจวัดและกำหนดปริมาณของสารสำคัญในตัวอย่างได้อย่างถูกต้องและความน่าเชื่อถือสูง ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญสำหรับการควบคุมคุณภาพของสารสกัดและการประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการสกัด

3.7 การวิเคราะห์ฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดจากเหง้าไพล

แม้ว่าการวิเคราะห์ฤทธิ์ด้านการอักเสบ (anti-inflammatory activity) จะเป็นอีกแนวทางที่สามารถใช้ประเมินประสิทธิภาพของสารสกัดได้ แต่จากการทดลองเบื้องต้นโดยใช้วิธี nitric oxide assay ในเซลล์ RAW 264.7 พบว่า สารสกัดจากไพลที่มีส่วนผสมของโซโคเลเด็กซ์ทรินและสารเติมแต่งบางชนิด เช่น Tween 80 และ Glycerin มีลักษณะขุ่นและเกิดตะกอนในอาหารเลี้ยงเซลล์ ส่งผลให้

การวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตรไม่สามารถทำได้อย่างแม่นยำ เนื่องจากมีสัญญาณรบกวนจากการกระเจิงแสงของตะกอน

ด้วยเหตุนี้ จึงเลือกใช้การวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant activity) แทน โดยอาศัยวิธีที่มีความเหมาะสมกับสารสกัดที่อยู่ในระบบน้ำและมีความชุ่ม เช่น DPPH, ABTS และ FRAP ซึ่งสามารถให้ข้อมูลที่แม่นยำเกี่ยวกับความสามารถในการต้านออกซิเดชันของสารสกัดได้อย่างน่าเชื่อถือ ทั้งยังเป็นวิธีที่ใช้เวลาสั้น ไม่ต้องใช้เซลล์หรือสัตว์ทดลอง จึงเหมาะสมกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้

3.7.1 การวิเคราะห์การต้านอนุมูลอิสระด้วย DPPH Assay

การศึกษาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดจากเหง้าโพลในงานวิจัยนี้ใช้วิธี DPPH Assay (Y2) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมในการประเมินความสามารถของสารต้านอนุมูลอิสระ โดยอาศัยหลักการที่สารต้านอนุมูลอิสระจะทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระ DPPH (2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl) ซึ่งมีสีม่วงเข้ม และเมื่อถูกรีดิวซ์โดยสารที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ สีของสารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองซีด การเปลี่ยนแปลงของสีสามารถตรวจวัดได้โดยใช้เครื่อง Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตร (Xiao, F et al., 2020)

การทดลองดำเนินการโดยใช้ ไมโครเพลทขนาด 96 หลุม ซึ่งช่วยให้สามารถทดสอบตัวอย่างได้พร้อมกันหลายชุด ลดการใช้สารเคมีและเพิ่มความแม่นยำของผลลัพธ์ สารละลาย DPPH ถูกเตรียมให้มีความเข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์ในเอทานอล และเก็บรักษาไว้ในที่มืดเพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพ สำหรับการทดสอบ สารละลาย DPPH ปริมาตร 100 ไมโครลิตร ถูกเติมลงในแต่ละหลุมของไมโครเพลท ตามด้วยสารละลายสารสกัด 100 ไมโครลิตร จากนั้นทิ้งไว้ให้ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้องในที่มืดเป็นเวลา 30 นาที ก่อนทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตร การวิเคราะห์ผลใช้หลักการเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย DPPH ก่อนและหลังทำปฏิกิริยากับสารสกัด โดยคำนวณเป็นค่าร้อยละของการยับยั้งอนุมูลอิสระ ตามสมการ

$$\% \text{ Inhibition} = \left(\frac{A_{\text{control}} - A_{\text{sample}}}{A_{\text{control}}} \right) \times 100$$

โดยที่ A control หมายถึงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย DPPH โดยไม่มีสารสกัด และ A sample คือค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายที่ทำปฏิกิริยากับสารสกัดแล้ว

ผลลัพธ์ที่ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน Trolox ซึ่งถูกเตรียมในช่วงความเข้มข้น 15.625-500 ไมโครโมลาร์ เพื่อสร้างเส้นมาตรฐานที่ใช้คำนวณค่าความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระในหน่วย μM Trolox Equivalent ($\mu\text{M TE}$)

3.7.2 การวิเคราะห์การต้านอนุมูลอิสระด้วย ABTS Assay

การศึกษากิจกรรมต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดจากเหง้าไพลยังดำเนินการโดยใช้ ABTS Assay (Y3) ซึ่งเป็นอีกหนึ่งเทคนิคที่ได้รับความนิยมในการประเมินศักยภาพของสารต้านอนุมูลอิสระ ABTS (2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid)) เป็นอนุมูลอิสระสังเคราะห์ที่มีสีฟ้าอมเขียวเข้ม เมื่อเกิดปฏิกิริยากับสารต้านอนุมูลอิสระ สีของสารละลายจะจางลงตามความสามารถของสารต้านอนุมูลอิสระที่อยู่ในสารสกัด การเปลี่ยนแปลงของสีสามารถตรวจวัดได้โดยใช้เครื่อง Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 734 นาโนเมตร (Xiao, F et al., 2020)

การเตรียมสารละลาย ABTS ดำเนินการโดยผสมสารละลาย ABTS ความเข้มข้น 7 มิลลิโมลาร์ กับสารละลายโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต ($\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$) ความเข้มข้น 2.45 มิลลิโมลาร์ แล้วปล่อยให้เกิดปฏิกิริยาในที่มืดเป็นเวลา 12-16 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง จนได้สารละลายอนุมูล ABTS $^{\bullet+}$ ที่มีความเสถียร ก่อนนำไปใช้ สารละลาย ABTS $^{\bullet+}$ ถูกเจือจางด้วยน้ำ เพื่อให้ค่าการดูดกลืนแสงที่ 734 นาโนเมตร อยู่ในช่วง 0.70 ± 0.02 สำหรับการวิเคราะห์ สารสกัดจากเหง้าไพลถูกเตรียมให้มีความเข้มข้นที่เหมาะสม และใช้สารมาตรฐาน Trolox ในช่วงความเข้มข้น 15.625-500 ไมโครโมลาร์ เป็นสารอ้างอิงเพื่อสร้างเส้นมาตรฐานในการทดลอง สารละลาย ABTS $^{\bullet+}$ ปริมาตร 150 ไมโครลิตร ถูกเติมลงในแต่ละหลุมของไมโครเพลท ตามด้วยสารละลายสารสกัด 50 ไมโครลิตร จากนั้นทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 6 นาที ก่อนทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 734 นาโนเมตร การวิเคราะห์ผลคำนวณเป็นค่าร้อยละของการยับยั้งอนุมูลอิสระ โดยใช้สมการ

$$\% \text{ Inhibition} = \left(\frac{\text{A control} - \text{A sample}}{\text{A control}} \right) \times 100$$

โดยที่ A control คือค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย ABTS $^{\bullet+}$ โดยไม่มีสารสกัด และ A sample คือค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายที่เกิดปฏิกิริยากับสารสกัดแล้ว

ค่าการต้านอนุมูลอิสระที่ได้จากสารสกัดถูกนำไปเปรียบเทียบกับเส้นมาตรฐานของ Trolox เพื่อคำนวณเป็นค่า μM Trolox Equivalent ($\mu\text{M TE}$) ซึ่งช่วยให้สามารถประเมินประสิทธิภาพของสารสกัดในเชิงปริมาณได้อย่างชัดเจน

3.7.3 การวิเคราะห์การต้านอนุมูลอิสระด้วย FRAP Assay

การประเมินฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดจากเหง้าไพลดำเนินการโดยใช้ FRAP Assay (Ferric Reducing Antioxidant Power Assay) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้วัดความสามารถของสารต้านอนุมูลอิสระในการรีดิวซ์ไอออนของเหล็ก (Fe^{3+}) ให้กลายเป็นไอออนของเหล็กที่มีสถานะออกซิเดชันต่ำกว่า (Fe^{2+}) ปฏิกิริยานี้ทำให้เกิดสารเชิงซ้อนระหว่าง Fe^{2+} และ TPTZ (2,4,6-tripyridyl-s-triazine) ซึ่งให้สีฟ้าเข้มและสามารถตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงได้ที่ 593 นาโนเมตร โดยใช้เครื่อง Spectrophotometer (Xiao, F et al., 2020)

กระบวนการทดลองเริ่มต้นจากการเตรียมสารละลาย FRAP รีเอเจนต์ โดยการผสมสารละลาย TPTZ ความเข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์ ในน้ำยากรดไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้น 40 มิลลิโมลาร์ ร่วมกับสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ (FeCl_3) ความเข้มข้น 20 มิลลิโมลาร์ และสารละลายบัฟเฟอร์อะซิเตด pH 3.6 ในอัตราส่วน 1:1:10 โดยต้องเตรียมสารละลายใหม่ก่อนใช้งานทุกครั้งเพื่อให้แน่ใจว่าปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

สารสกัดจากเหง้าไพลที่เตรียมในความเข้มข้นที่เหมาะสม ปริมาตร 50 ไมโครลิตร ถูกนำมาวิเคราะห์โดยเติมสารละลาย FRAP รีเอเจนต์ลงไป ปริมาตร 150 ไมโครลิตร และปล่อยให้ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 593 นาโนเมตรโดยใช้เครื่อง Spectrophotometer

ค่าการต้านอนุมูลอิสระที่ได้จากการทดลองถูกเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน Trolox ซึ่งถูกเตรียมในช่วงความเข้มข้น 50-600 ไมโครโมลาร์ และใช้เป็นค่ามาตรฐานในการประเมินประสิทธิภาพของสารสกัด โดยผลลัพธ์ที่ได้จะถูกคำนวณเป็น μM Trolox Equivalent ($\mu\text{M TE}$) ซึ่งช่วยให้สามารถแสดงศักยภาพของสารสกัดในเชิงปริมาณได้อย่างแม่นยำ

3.8 การวิเคราะห์ข้อมูล (Data Analysis)

การวิเคราะห์ข้อมูลในงานวิจัยนี้ดำเนินการเพื่อประเมินผลของกระบวนการสกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากเหง้าไพลโดยใช้ไซโคลเด็กซ์ทรินเป็นตัวช่วยสกัด ข้อมูลที่ได้จากการทดลองถูกนำมาประมวลผลโดยใช้ซอฟต์แวร์ MODDE 7.0 สำหรับการออกแบบและวิเคราะห์การทดลองเชิงสถิติ และ AutoDock Vina สำหรับการศึกษาทาง Molecular Docking กระบวนการวิเคราะห์ข้อมูลแบ่งออกเป็น การวิเคราะห์ผล Molecular Docking, การตรวจสอบคุณภาพข้อมูล, การวิเคราะห์ในขั้นตอน Screening Study, การวิเคราะห์ในขั้นตอน Optimization Study, การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการสกัดแบบดั้งเดิม ซึ่งแต่ละขั้นตอนใช้แนวทางการวิเคราะห์ที่แตกต่างกันเพื่อให้มั่นใจว่าผลลัพธ์ที่ได้มีความถูกต้องและสามารถนำไปใช้อ้างอิงได้อย่างแม่นยำ

3.8.1 การวิเคราะห์ Molecular Docking

เพื่อศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างสารสำคัญและไซโคลเด็กซ์ทริน ได้มีการใช้ AutoDock Vina ทำการ Molecular Docking เพื่อวิเคราะห์ค่าพลังงานอิสระของการจับตัว (Binding Energy) และการจัดเรียงตัวของโมเลกุลใน Inclusion Complex

- **การคำนวณ Binding Affinity** ใช้เพื่อวิเคราะห์ค่าพลังงานอิสระของการจับตัวระหว่างสารสำคัญกับไซโคลเด็กซ์ทริน รายงานผลในหน่วย kcal/mol โดยค่าพลังงานที่ต่ำกว่าบ่งชี้ว่าการจับตัวมีเสถียรภาพมากขึ้น
- **การวิเคราะห์โครงสร้าง 3D ของ Inclusion Complex** ใช้โปรแกรม Discovery Studio เพื่อแสดงโครงสร้างและการจัดเรียงตัวของโมเลกุล แสดงผลในรูปแบบ 3D Molecular Docking Visualization
- **การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของ Molecular Docking กับผลการทดลอง** ใช้วิเคราะห์ว่าความสามารถในการกักเก็บสารของไซโคลเด็กซ์ทรินที่พบจากการทดลองทางเคมีสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการคำนวณ Molecular Docking หรือไม่

3.8.2 การตรวจสอบคุณภาพข้อมูล

ก่อนทำการวิเคราะห์ข้อมูล ได้มีการตรวจสอบคุณภาพของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง เพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีค่าผิดปกติ (outliers) และข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์มีการกระจายตัวที่เหมาะสมกับแบบจำลองที่เลือกใช้ การตรวจสอบนี้ประกอบด้วย

- **Normal Probability Plot และ Residual Plot** ใช้เพื่อตรวจสอบว่าค่าคลาดเคลื่อน (residuals) มีการกระจายตัวแบบปกติหรือไม่ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยยืนยันว่าแบบจำลองที่ใช้สามารถทำนายค่าการตอบสนองได้อย่างถูกต้อง แสดงผลในรูปแบบ Normal Probability Plot และ Residual compared to Predicted Plot ซึ่งช่วยให้เห็นว่าค่าผิดปกติ (outliers) มีอยู่หรือไม่ และ residuals มีการกระจายตัวอย่างเหมาะสมหรือไม่
- **Outlier Analysis** ใช้เพื่อตรวจสอบค่าผิดปกติที่อาจส่งผลกระทบต่อความแม่นยำของแบบจำลอง โดยค่าที่มีระยะห่างจากค่ากลางมากเกินไปอาจต้องถูกพิจารณาเพื่อตัดออกจากการวิเคราะห์ แสดงผลในรูปแบบ Box Plot และ Histogram ซึ่งช่วยระบุค่าผิดปกติและการกระจายตัวของข้อมูล

3.8.3 การวิเคราะห์ในขั้นตอน Screening Study

เพื่อระบุปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการสกัด ได้มีการใช้ D-optimal Design ในการออกแบบการทดลอง ซึ่งเป็นเทคนิคที่ช่วยลดจำนวนการทดลองที่จำเป็น โดยยังคงสามารถประเมินผลกระทบของปัจจัยแต่ละตัวได้อย่างครบถ้วน ซอฟต์แวร์ MODDE 7.0 ถูกใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง ซึ่งมีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังนี้

- **ANOVA (Analysis of Variance)** ใช้เพื่อตรวจสอบว่าปัจจัยที่ศึกษาแต่ละตัวมีผลกระทบต่อค่าการตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ โดยพิจารณาจากค่า p-value หากค่าที่ได้ต่ำกว่า 0.05 หมายความว่าปัจจัยนั้นมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ แสดงผลในรูปแบบ ANOVA Table ซึ่งช่วยให้เห็นว่าปัจจัยใดมีอิทธิพลสูงต่อกระบวนการสกัด
- **Coefficient Plot** ใช้เพื่อตรวจสอบขนาดของผลกระทบของแต่ละปัจจัยต่อค่าการตอบสนอง โดยพิจารณาจากค่า Regression Coefficients ของตัวแปรอิสระ แสดงผลในรูปแบบ Coefficient Plot ซึ่งช่วยให้สามารถมองเห็นว่าปัจจัยใดมีอิทธิพลในเชิงบวกหรือลบต่อค่าการตอบสนอง
- **Effect Plot และ Interaction Plot** ใช้เพื่อตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่อาจมีผลร่วมกันในการสกัด แสดงผลในรูปแบบ Effect Plot และ Interaction Plot ซึ่งช่วยให้เข้าใจถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆ

3.8.4 การวิเคราะห์ในขั้นตอน Optimization Study

หลังจากระบุปัจจัยที่มีอิทธิพลจาก Screening Study แล้ว ได้มีการใช้ Central Composite Design (CCD) ภายใต้แนวคิด Response Surface Methodology (RSM) เพื่อตรวจสอบแนวโน้มของค่าการตอบสนองและกำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกระบวนการสกัด ซอฟต์แวร์ MODDE 7.0 ถูกใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลโดยมีขั้นตอนดังนี้

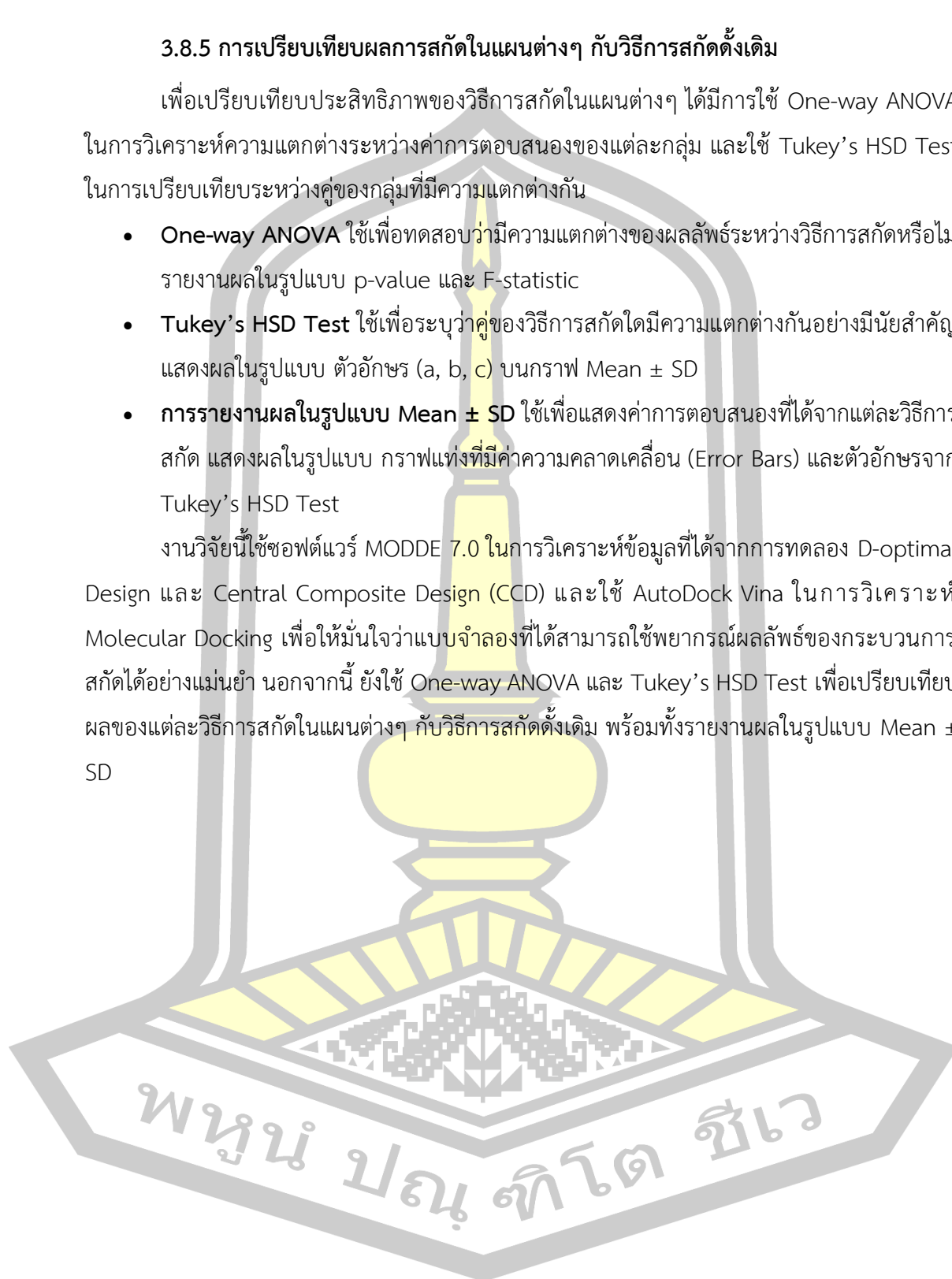
- **Regression Analysis (Polynomial Model Fitting)** ใช้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถพยากรณ์ค่าการตอบสนอง แสดงผลในรูปแบบ Regression Equation
- **ANOVA for Model Validation** ใช้ตรวจสอบว่าความแปรปรวนของข้อมูลสามารถอธิบายได้โดยแบบจำลองหรือไม่ แสดงผลในรูปแบบ ANOVA Table และ Lack-of-Fit Test
- **Response Surface Plot และ Contour Plot** ใช้แสดงแนวโน้มของค่าการตอบสนองเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าปัจจัย แสดงผลในรูปแบบ 3D Surface Plot และ Contour Plot

3.8.5 การเปรียบเทียบผลการสกัดในแผนต่างๆ กับวิธีการสกัดดั้งเดิม

เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการสกัดในแผนต่างๆ ได้มีการใช้ One-way ANOVA ในการวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างค่าการตอบสนองของแต่ละกลุ่ม และใช้ Tukey's HSD Test ในการเปรียบเทียบระหว่างคู่ของกลุ่มที่มีความแตกต่างกัน

- **One-way ANOVA** ใช้เพื่อทดสอบว่ามีความแตกต่างของผลลัพธ์ระหว่างวิธีการสกัดหรือไม่ รายงานผลในรูปแบบ p-value และ F-statistic
- **Tukey's HSD Test** ใช้เพื่อระบุว่าคู่ของวิธีการสกัดใดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แสดงผลในรูปแบบ ตัวอักษร (a, b, c) บนกราฟ Mean $\pm$ SD
- **การรายงานผลในรูปแบบ Mean $\pm$ SD** ใช้เพื่อแสดงค่าการตอบสนองที่ได้จากแต่ละวิธีการสกัด แสดงผลในรูปแบบ กราฟแท่งที่มีค่าความคลาดเคลื่อน (Error Bars) และตัวอักษรจาก Tukey's HSD Test

งานวิจัยนี้ใช้ซอฟต์แวร์ MODDE 7.0 ในการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง D-optimal Design และ Central Composite Design (CCD) และใช้ AutoDock Vina ในการวิเคราะห์ Molecular Docking เพื่อให้มั่นใจว่าแบบจำลองที่ได้สามารถใช้พยากรณ์ผลลัพธ์ของกระบวนการสกัดได้อย่างแม่นยำ นอกจากนี้ ยังใช้ One-way ANOVA และ Tukey's HSD Test เพื่อเปรียบเทียบผลของแต่ละวิธีการสกัดในแผนต่างๆ กับวิธีการสกัดดั้งเดิม พร้อมทั้งรายงานผลในรูปแบบ Mean $\pm$ SD



บทที่ 4

ผลการดำเนินงาน

4.1 ผลการศึกษา Molecular docking

การศึกษานี้คือทำการ Molecular Docking ระหว่าง Cyclodextrins และสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากเหง้าไพลโดยโปรแกรม AutoDock Vina ผลการศึกษาก่อสรุปเป็นค่า Binding Affinity ในตารางและวิเคราะห์ผลในเชิงลึก (ตารางที่ 4.1) ดังนี้

4.1.1 ผลการศึกษา Molecular Docking ระหว่างโครงสร้างของไซโคลเด็กซ์กับสารสำคัญจากเหง้าไพล

การศึกษาใช้ Cyclodextrins ทั้งหมดชนิด ได้แก่ ACD, BCD, GCD, MBGD, SBEGCD และ HPBGD ในการจับกับสารสำคัญในเหง้าไพล ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มสาร ดังนี้

1. **กลุ่ม Phenylbutanoids** ประกอบด้วยสาร 4 ชนิด ได้แก่ Compound D, D-acetate, DMPBD และ DMPBDMS
2. **กลุ่ม Curcuminoids** ประกอบด้วยสาร 4 ชนิด ได้แก่ Curcumin, Cassumunin A, Cassumunin B และ Cassumunin C
3. **กลุ่ม Terpenoids** ประกอบด้วยสาร 4 ชนิด ได้แก่ Terpinen-4-ol, Sabinene, γ -terpinene และ Zerumbone

พหุ ประสิทธิภาพ

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการศึกษา Molecular Docking ระหว่างโครงสร้างของไซโคลเด็กซ์กับสารสำคัญจากเหง้าไพล

No	Type of CDs	Compound groups	Bioactive compounds	Affinity (kcal/mol)	No	Type of CDs	Compound groups	Bioactive compounds	Affinity (kcal/mol)
1	ACD	Phenylbutanoids	Compound D	-4.1	37	MBCD	Phenylbutanoids	Compound D	-4.4
2			D- acetate	-4.0	38			D- acetate	-4.5
3			DMPBD	-3.7	39			DMPBD	-4.1
4			DMPBDMS	-3.9	40			DMPBDMS	-5.6
5		Curcuminoids	Curcumin	-4.2	41		Curcuminoids	Curcumin	-5.6
6			Cassumunin A	-3.3	42			Cassumunin A	-4.7
7			Cassumunin B	-4.1	43			Cassumunin B	-5.2
8			Cassumunin C	-3.7	44			Cassumunin C	-5.0
9		terpenoids	terpinen-4-ol	-3.2	45		terpenoids	terpinen-4-ol	-4.1
10			Sabinene	-3.0	46			Sabinene	-3.8
11			γ -terpinene	-2.9	47			γ -terpinene	-3.6
12			Zerumbone	-3.8	48			zerumbone	-4.9
13	BCD	Phenylbutanoids	Compound D	-4.1	49	SBEB CD	Phenylbutanoids	Compound D	-4.1
14			D- acetate	-4.0	50			D- acetate	-4.0
15			DMPBD	-3.8	51			DMPBD	-3.8
16			DMPBDMS	-4.8	52			DMPBDMS	-5.3
17		Curcuminoids	Curcumin	-5.6	53		Curcuminoids	Curcumin	-5.5
18			Cassumunin A	-5.4	54			Cassumunin A	-5.2
19			Cassumunin B	-5.1	55			Cassumunin B	-5.7
20			Cassumunin C	-4.9	56			Cassumunin C	-5.6
21		terpenoids	terpinen-4-ol	-3.9	57		terpenoids	terpinen-4-ol	-3.7
22			Sabinene	-3.5	58			Sabinene	-3.4
23			γ -terpinene	-3.3	59			γ -terpinene	-3.5
24			Zerumbone	-4.6	60			zerumbone	-4.8
25	GCD	Phenylbutanoids	Compound D	-4.2		HPBCD	Phenylbutanoids	Compound D	-4.3
26			D- acetate	-4.3	62			D- acetate	-4.4
27			DMPBD	-4.0	63			DMPBD	-4.1
28			DMPBDMS	-5.4	64			DMPBDMS	-5.8
29		Curcuminoids	Curcumin	-5.2	65		Curcuminoids	Curcumin	-5.8
30			Cassumunin A	-5.6	66			Cassumunin A	-5.7
31			Cassumunin B	-5.7	67			Cassumunin B	-5.7
32			Cassumunin C	-5.5	68			Cassumunin C	-5.8
33		terpenoids	terpinen-4-ol	-3.4	69		terpenoids	terpinen-4-ol	-3.9
34			Sabinene	-3.2	70			Sabinene	-3.6
35			γ -terpinene	-3.2	71			γ -terpinene	-3.5
36			Zerumbone	-5.0	72			Zerumbone	-5.1

4.1.2 ค่าพลังงานการจับตัว (Binding Affinity) ของ Cyclodextrins กับสารสำคัญจากเหง้าไพล

การศึกษา Molecular Docking ในครั้งนี้มุ่งเน้นการประเมินประสิทธิภาพของ Cyclodextrins ทั้ง 6 ชนิดในการสร้างโครงสร้าง Inclusion Complex กับสารออกฤทธิ์จากเหง้าไพล ดังแสดงในตารางที่ 4.1 โดยที่ค่าพลังงานการจับตัว (Binding Affinity) ที่ต่ำหมายถึงการสร้างโครงสร้างร่วมที่มีเสถียรภาพสูง ซึ่งการจับตัวนี้มีความสำคัญในการเลือกชนิดของ Cyclodextrins ที่เหมาะสมสำหรับการนำไปพัฒนาต่อไป

- **Alpha-Cyclodextrin (ACD)**

ACD มีช่องขนาดเล็ก ทำให้เหมาะกับสารโมเลกุลเล็ก ในกลุ่ม Phenylbutanoids พบว่า Compound D มีค่า Binding Affinity ต่ำสุดที่ -4.1 kcal/mol แสดงถึงการจับตัวได้ดี ในขณะที่ D-acetate และ DMPBDMS มีค่าที่สูงขึ้นเล็กน้อย สะท้อนถึงข้อจำกัดของ ACD ในการรองรับโครงสร้างที่ซับซ้อนขึ้น

ในกลุ่ม Curcuminoids นั้น Curcumin มีค่า Binding Affinity ต่ำสุดที่ -4.2 kcal/mol ซึ่งแสดงถึงการจับตัวที่เสถียรพอสมควร อย่างไรก็ตาม Cassumunin A, B และ C มีค่า Binding Affinity สูงกว่า ซึ่งอาจเป็นผลมาจากโครงสร้างที่ใหญ่และซับซ้อนของสารเหล่านี้

สำหรับ Terpenoids, Zerumbone มีค่า Binding Affinity ต่ำสุดที่ -3.8 kcal/mol แสดงถึงความเหมาะสมของ ACD ในการจับกับโมเลกุลขนาดเล็ก แต่สารอื่น ๆ เช่น γ -Terpinene แสดงค่าที่สูงขึ้น ซึ่งอาจบ่งบอกถึงข้อจำกัดของ ACD ในการจับกับสารโครงสร้างที่มีขนาดซับซ้อนน้อยกว่า

- **Beta-Cyclodextrin (BCD)**

BCD มีช่องขนาดกลาง ทำให้สามารถจับกับสารออกฤทธิ์ได้หลากหลาย ในกลุ่ม Phenylbutanoids, DMPBDMS มีค่า Binding Affinity ต่ำสุดที่ -4.8 kcal/mol บ่งบอกถึงการจับตัวที่เสถียร ขณะที่ Compound D และ D-acetate มีค่าที่ -4.1 และ -4.0 kcal/mol ตามลำดับซึ่งแสดงถึงศักยภาพของ BCD ในการสร้าง Inclusion Complex ได้ดี

สำหรับ Curcuminoids นั้น Curcumin มีค่า Binding Affinity ต่ำสุดที่ -5.6 kcal/mol ซึ่งสะท้อนถึงการจับตัวที่มั่นคง นอกจากนี้ Cassumunin A และ C มีค่าต่ำเช่นกัน (-5.4 และ -4.9 kcal/mol) ยืนยันว่า BCD มีศักยภาพสูงในการจับกับสารในกลุ่มนี้

ในกลุ่ม Terpenoids, Zerumbone มีค่า Affinity -4.6 kcal/mol บ่งบอกถึงความสามารถของ BCD ในการจับกับสารกลุ่มนี้ได้ดี แม้ว่าจะมีขนาดโครงสร้างที่แตกต่างจากกลุ่ม Phenylbutanoids และ Curcuminoids

- **Gamma-Cyclodextrin (GCD)**

GCD มีช่องขนาดใหญ่ จึงสามารถรองรับสารโมเลกุลขนาดใหญ่และซับซ้อนกว่าได้ดี ในกลุ่ม Phenylbutanoids, DMPBDMS มีค่า Binding Affinity ต่ำสุดที่ -5.4 kcal/mol สะท้อนถึงการจับตัวที่มั่นคง นอกจากนี้ Compound D และ DMPBD มีค่าตั้งแต่ -4.2 ถึง -4.0 kcal/mol แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของ GCD ในการสร้าง Inclusion Complex

สำหรับ Curcuminoids นั้น Cassumunin B มีค่า Binding Affinity ต่ำสุดที่ -5.7 kcal/mol ซึ่งแสดงถึงความสามารถของ GCD ในการรองรับโครงสร้างที่ซับซ้อน เช่นเดียวกับ Curcumin (-5.2 kcal/mol) และ Cassumunin C (-5.5 kcal/mol)

ในกลุ่ม Terpenoids, Zerumbone มีค่า Binding Affinity -5.0 kcal/mol บ่งบอกถึงการจับตัวที่เสถียรของ GCD กับสารโครงสร้างขนาดใหญ่

- **Methyl-Beta-Cyclodextrin (MBCD)**

MBCD ได้รับการปรับปรุงโดยเติมหมู่ methyl เพื่อเพิ่มความสามารถในการจับกับสารไฮโดรโฟบิก ในกลุ่ม Phenylbutanoids, DMPBDMS มีค่า Binding Affinity ต่ำสุดที่ -5.6 kcal/mol สะท้อนถึงความสามารถของ MBCD ในการสร้าง Inclusion Complex อย่างมีประสิทธิภาพ

สำหรับ Curcuminoids, Curcumin และ Cassumunin B มีค่า Binding Affinity ต่ำสุดที่ -5.6 kcal/mol ซึ่งบ่งบอกถึงการจับตัวที่แข็งแรง

ในกลุ่ม Terpenoids, Zerumbone มีค่า Binding Affinity -4.9 kcal/mol บ่งบอกถึงการจับตัวที่ดี แม้ว่าจะต่ำกว่ากลุ่ม Phenylbutanoids และ Curcuminoids

- **Sulfobutylether-Beta-Cyclodextrin (SBEB CD)**

SBEB CD ได้รับการดัดแปลงด้วยหมู่ sulfobutyl เพื่อเพิ่มความสามารถในการจับกับสารที่มีขั้วและไม่ชอบน้ำ ในกลุ่ม Phenylbutanoids, DMPBDMS มีค่า Binding Affinity ต่ำสุดที่ -5.3 kcal/mol ซึ่งสะท้อนถึงความสามารถของ SBEB CD ในการสร้างโครงสร้าง Inclusion Complex ที่มั่นคง

ในกลุ่ม Curcuminoids, Cassumunin B มีค่า Binding Affinity ต่ำสุดที่ -5.7 kcal/mol และ Curcumin อยู่ที่ -5.5 kcal/mol บ่งบอกถึงความสามารถของ SBEB CD ในการจับกับสารกลุ่มนี้ได้ดี

สำหรับ Terpenoids, Zerumbone มีค่า Binding Affinity -4.8 kcal/mol ซึ่งแสดงถึงความสามารถของ SBEB CD ในการจับกับสารไฮโดรโฟบิกที่มีโครงสร้างซับซ้อน

- **Hydroxypropyl-Beta-Cyclodextrin (HPBCD)**

HPBCD ได้รับการปรับปรุงด้วยหมู่ hydroxypropyl เพื่อเพิ่มความสามารถในการละลายในน้ำ ในกลุ่ม Phenylbutanoids, DMPBDMS มีค่า Binding Affinity ต่ำสุดที่ -5.8 kcal/mol ซึ่งแสดงถึงการจับตัวที่แข็งแรง

สำหรับ Curcuminoids, Curcumin มีค่า Affinity ต่ำสุดที่ -5.8 kcal/mol และ Cassumunin B และ C มีค่าที่ใกล้เคียงกัน แสดงถึงศักยภาพสูงของ HPBCD ในการสร้าง Inclusion Complex

ในกลุ่ม Terpenoids, Zerumbone มีค่า Affinity -5.1 kcal/mol ซึ่งต่ำที่สุดในกลุ่มนี้สะท้อนถึงการจับตัวที่แข็งแรงของ HPBCD

เปรียบเทียบประสิทธิภาพของ Cyclodextrins

จากการศึกษา Molecular Docking ของ Cyclodextrins ทั้ง 6 พบว่าการสร้างโครงสร้าง Inclusion Complex กับสารออกฤทธิ์จากเหง้าไพลีมีความแตกต่างกันไปตามขนาดของช่องและหมู่ฟังก์ชันที่ปรับปรุงเพิ่มเข้ามาใน Cyclodextrins แต่ละชนิด

- **Alpha-Cyclodextrin (ACD)** เหมาะสำหรับการจับกับสารที่มีขนาดโมเลกุลเล็กและไม่ซับซ้อน เนื่องจากช่องขนาดเล็กจำกัดการจับตัวของสารโมเลกุลใหญ่ แต่ยังสามารถสร้างโครงสร้างร่วมที่เสถียรในระดับปานกลางได้กับสารกลุ่ม Phenylbutanoids และ Curcuminoids ขนาดเล็ก
- **Beta-Cyclodextrin (BCD)** แสดงประสิทธิภาพการจับตัวที่ดีเยี่ยมโดยเฉพาะกับสารกลุ่ม Curcuminoids และ Phenylbutanoids ช่องขนาดกลางช่วยให้ BCD สามารถจับกับสารขนาดหลากหลายได้ ทำให้สามารถสร้างโครงสร้าง Inclusion Complex ที่มีความเสถียรสูง
- **Gamma-Cyclodextrin (GCD)** แสดงค่าพลังงานการจับตัวที่ไม่ดีนักกับสารโมเลกุลขนาดเล็กและไม่ซับซ้อน เช่น สารกลุ่ม Terpenoids ตรงกันข้ามกับกลุ่ม Curcuminoids เช่น Cassumunin B ซึ่งบ่งบอกถึงความสามารถในการรองรับและโอบล้อมสารที่มีลักษณะโครงสร้างใหญ่และซับซ้อนมากๆ ได้ดีกว่า
- **Methyl-Beta-Cyclodextrin (MBCD)** ที่เพิ่มหมู่ methyl แสดงให้เห็นถึงการปรับปรุงความสามารถในการจับกับสารไฮโดรโฟบิกให้ดีขึ้น โดยเมื่อพิจารณาจากค่า Binding

Affinity ต่ำสุดในกลุ่ม (-5.6 ถึง -4.9 kcal/mol) ของสารสำคัญทั้ง 3 กลุ่ม โดยเฉพาะกับ Phenylbutanoids และ Curcuminoids

- **Sulfobutylether-Beta-Cyclodextrin (SBEB CD)** แสดงประสิทธิภาพในการจับกับสารที่มีโครงสร้างซับซ้อนและมีขั้ว โดยมีค่า Binding Affinity ต่ำกับสารกลุ่ม Curcuminoids เช่น Cassumunin B ซึ่งแสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการใช้งานในระบบที่ต้องการความเสถียรในการจับกันของโครงสร้างที่มีความซับซ้อนค่อนข้างสูง
- **Hydroxypropyl-Beta-Cyclodextrin (HPBCD)** แสดงค่าพลังงานการจับตัวที่ต่ำที่สุดในกลุ่มสาร Curcuminoids เช่น Curcumin และ Cassumunin C ซึ่งบ่งบอกถึงศักยภาพสูงสุดในการสร้างโครงสร้าง Inclusion Complex ที่เสถียร ทั้งยังสามารถจับกับสารในกลุ่ม Terpenoids ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

โดยรวมแล้วพบว่า HPBCD แสดงศักยภาพสูงสุดในการสร้างโครงสร้าง Inclusion Complex ที่มีเสถียรภาพมากที่สุด เนื่องจากการปรับแต่งโครงสร้างทำให้สามารถโอบล้อมและเพิ่มความสามารถในการละลายของสารออกฤทธิ์ได้ดีเยี่ยม ข้อมูลเหล่านี้สามารถนำไปพัฒนาต่อในเชิงพาณิชย์สำหรับผลิตภัณฑ์เสริมอาหารหรือยาสมุนไพรได้ต่อไป

4.1.3 การวิเคราะห์ภาพสามมิติของโครงสร้างการจับตัว

การวิเคราะห์โครงสร้างสามมิติของ Inclusion Complex ที่เกิดจากการจับตัวของ Cyclodextrins หกชนิดกับสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากเหง้าไพล ถูกดำเนินการโดยใช้โปรแกรม Discovery Studio 2021 Client เพื่อตรวจสอบรูปแบบและปฏิสัมพันธ์ของโมเลกุลที่ละเอียดมากขึ้น ผลการวิเคราะห์ช่วยให้เข้าใจถึงความเหมาะสมของการจับกันของโครงสร้างในแต่ละชนิดของ Cyclodextrin และการสร้างโครงสร้างร่วมที่มีความเสถียร โดยมีรายละเอียดดังนี้

- **Alpha-Cyclodextrin (ACD)**

จากการสร้างภาพสามมิติของโครงสร้าง Inclusion Complex ระหว่าง ACD และสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากกลุ่ม Phenylbutanoids, Curcuminoids, และ Terpenoids เพื่อทำความเข้าใจเชิงลึกเกี่ยวกับลักษณะการจับตัว (Binding interactions) และการจัดเรียงตัวของโมเลกุลภายในโพรงของ ACD

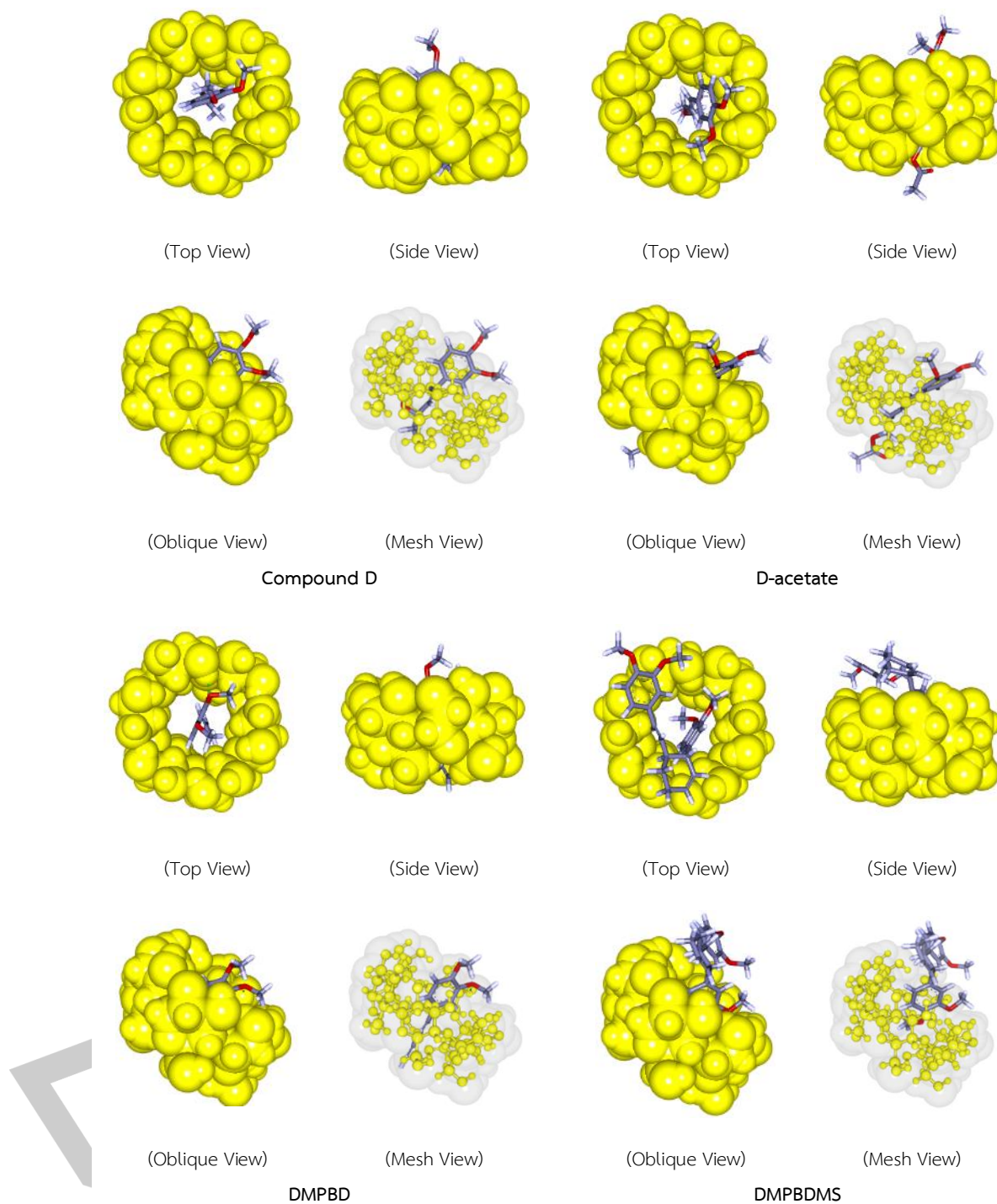
ในกลุ่ม **Phenylbutanoids** พบว่า Compound D มีค่าพลังงานยึดเหนี่ยว (Binding Affinity) ต่ำที่สุดที่ -4.1 kcal/mol แสดงถึงปฏิสัมพันธ์ที่มีเสถียรภาพสูงระหว่างโมเลกุล ACD และ Compound D โครงสร้างสามมิติของ Inclusion Complex ระบุได้ว่าโมเลกุลของ Compound D สามารถแทรกตัวเข้าสู่ cavity ของ ACD ได้อย่างเหมาะสม สำหรับ D-acetate และ DMPBDMS ค่า

พลังงานยึดเหนี่ยวอยู่ในช่วงและ -3.9 kcal/mol ตามลำดับ แม้ว่าจะมีปฏิสัมพันธ์ที่อ่อนลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับ Compound D แต่ยังคงแสดงถึงความสามารถในการจับตัวที่ดี ภาพโครงสร้างสามมิติชี้ให้เห็นว่าโมเลกุลของ D-acetate มีตำแหน่งการจับตัวที่มั่นคงภายใน cavity (ดูภาพที่ 4.1)

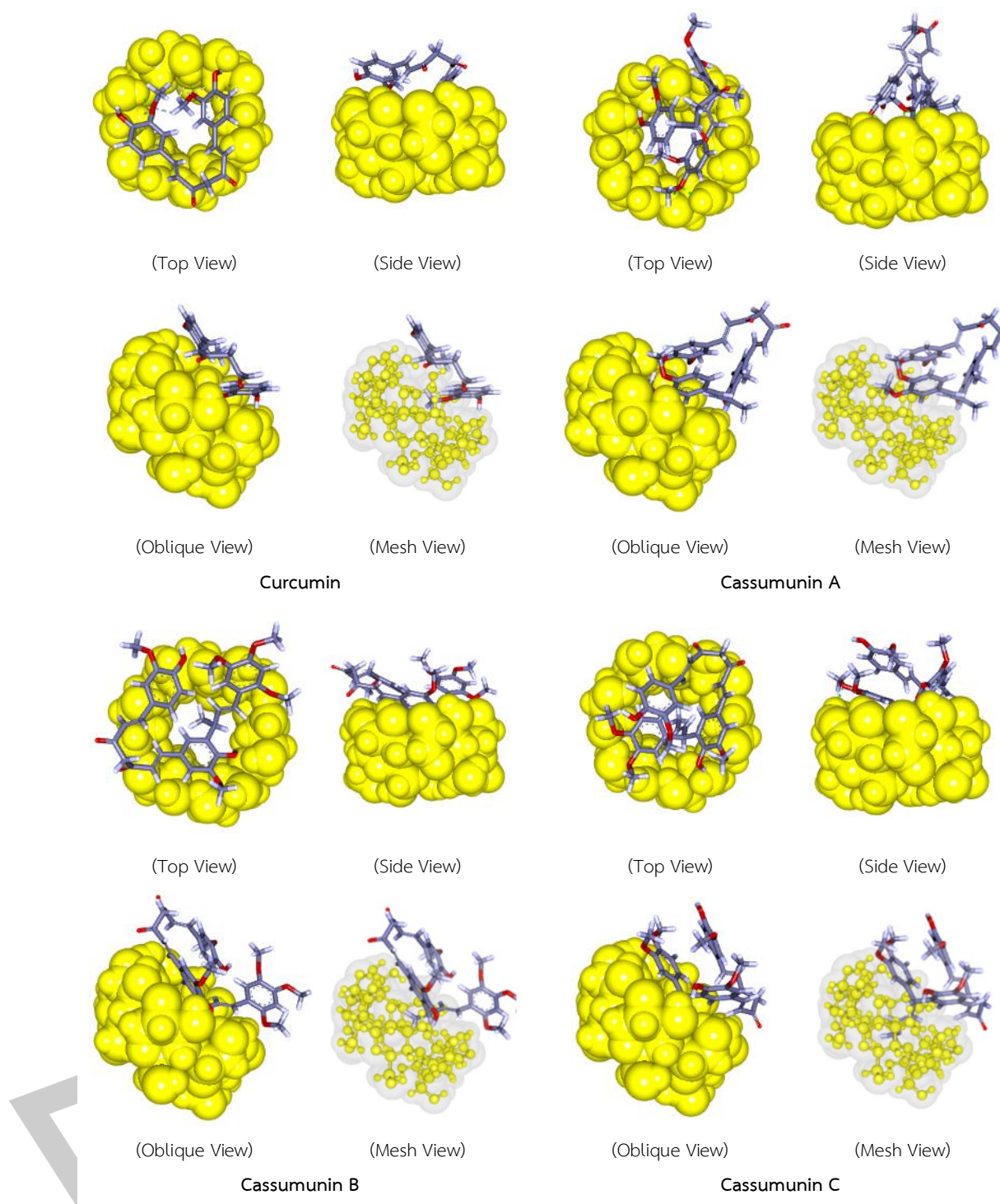
กลุ่ม Curcuminoids มีปฏิสัมพันธ์ที่น่าสนใจโดยเฉพาะ Curcumin ซึ่งมีค่าพลังงานยึดเหนี่ยวต่ำที่สุดในกลุ่ม (-4.2 kcal/mol) แสดงถึงโครงสร้างที่มีความเสถียรสูง ภาพสามมิติแสดงว่าโมเลกุลของ Curcumin มีการจัดเรียงตัวภายใน cavity ของ ACD ได้อย่างเหมาะสมที่สุด นอกจากนี้ Cassumunin B ซึ่งมี Affinity ใกล้เคียงกัน (-4.1 kcal/mol) มีการจัดเรียงตัวที่คล้ายกับ Curcumin แต่มีเสถียรภาพลดลงเล็กน้อย เนื่องจากมีบางส่วนของโครงสร้างยื่นออกจาก cavity ส่วน (ดูภาพที่ 4.2) Cassumunin A (-3.3 kcal/mol) และ Cassumunin C (-3.7 kcal/mol) พบว่ามีการจับตัวที่อ่อนลง โดยภาพแสดงให้เห็นว่าทั้งสองสารมีโครงสร้างที่เบี่ยงออกจาก cavity ทำให้ปฏิสัมพันธ์กับ ACD ลดลง

กลุ่ม Terpenoids ในกลุ่ม Terpenoids พบว่าค่าสูงสุดของ Affinity อยู่ที่ -3.8 kcal/mol สำหรับ Zerumbone โดยมีการจัดเรียงตัวอยู่ภายใน cavity ของ ACD อย่างเหมาะสม พบว่า Zerumbone มีการจัดตัวที่เบี่ยงออกเล็กน้อยจากศูนย์กลางของ cavity ซึ่งอาจส่งผลต่อการจับตัวเมื่อเทียบกับโมเลกุลอื่นในกลุ่มเดียวกัน ขณะที่ Terpinen-4-ol (-3.2 kcal/mol) และ Sabinene (-3.0 kcal/mol) แสดงให้เห็นว่ามีบางส่วนของโครงสร้างยื่นออกจาก cavity ซึ่งอาจเป็นปัจจัยที่ทำให้เสถียรภาพลดลง ส่วน γ -terpinene (-2.9 kcal/mol) พบว่ามีโครงสร้างที่ไม่ได้ถูกโอบล้อมอย่างสมบูรณ์ภายใน cavity ทำให้เกิดปฏิสัมพันธ์ที่อ่อนลงและค่าพลังงานยึดเหนี่ยวสูงขึ้น (ดูภาพที่ 4.3)

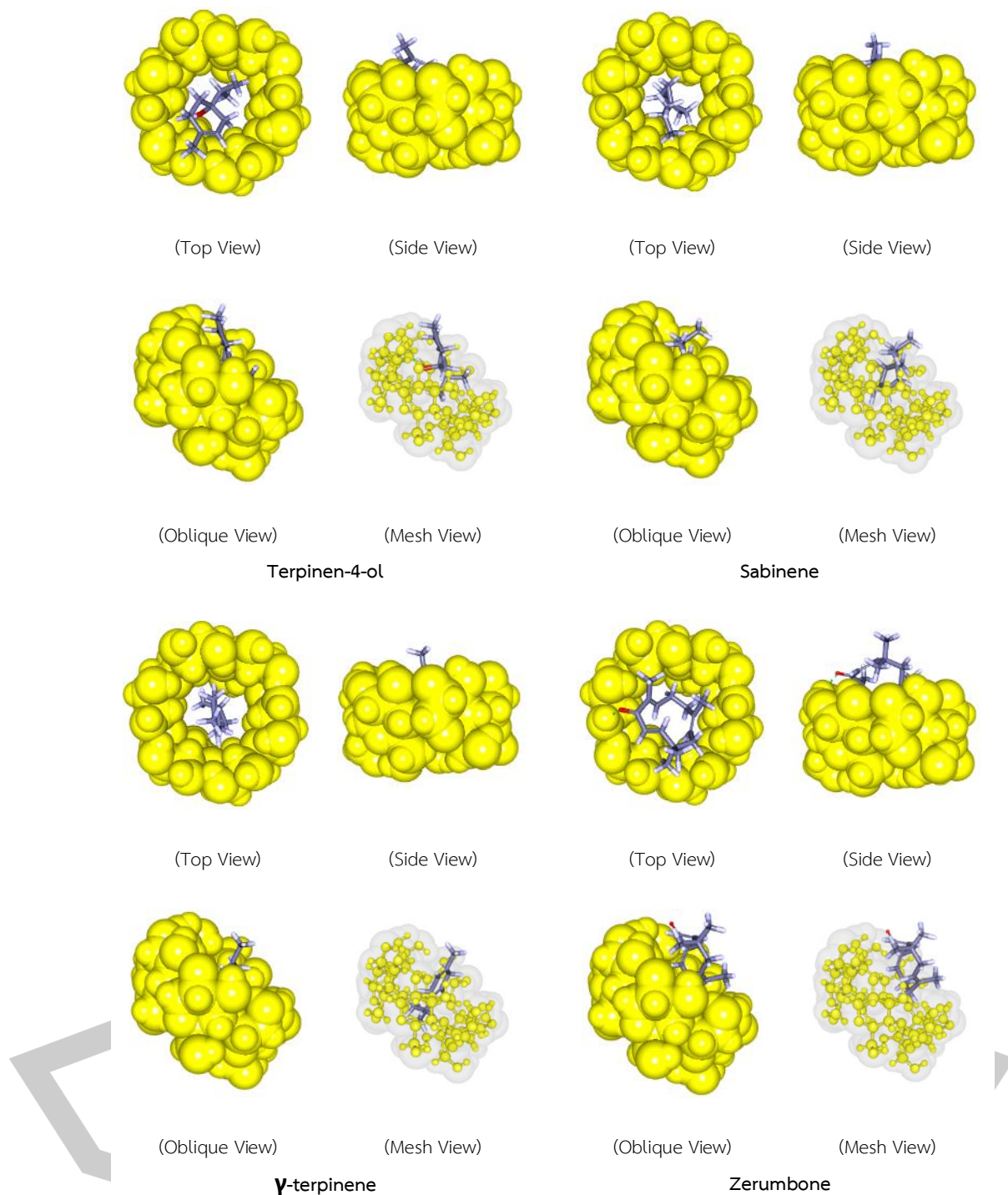




ภาพที่ 4.1 ผลการศึกษา Molecular docking ของ Alpha-Cyclodextrins ร่วมกับสารกลุ่ม Phenylbutanoids



ภาพที่ 4.2 ผลการศึกษา Molecular docking ของ Alpha-Cyclodextrins ร่วมกับสารกลุ่ม Curcuminoids



ภาพที่ 4.3 ผลการศึกษา Molecular docking ของ Alpha-Cyclodextrins ร่วมกับสารกลุ่มTerpenoids

- **Beta-Cyclodextrin (BCD)**

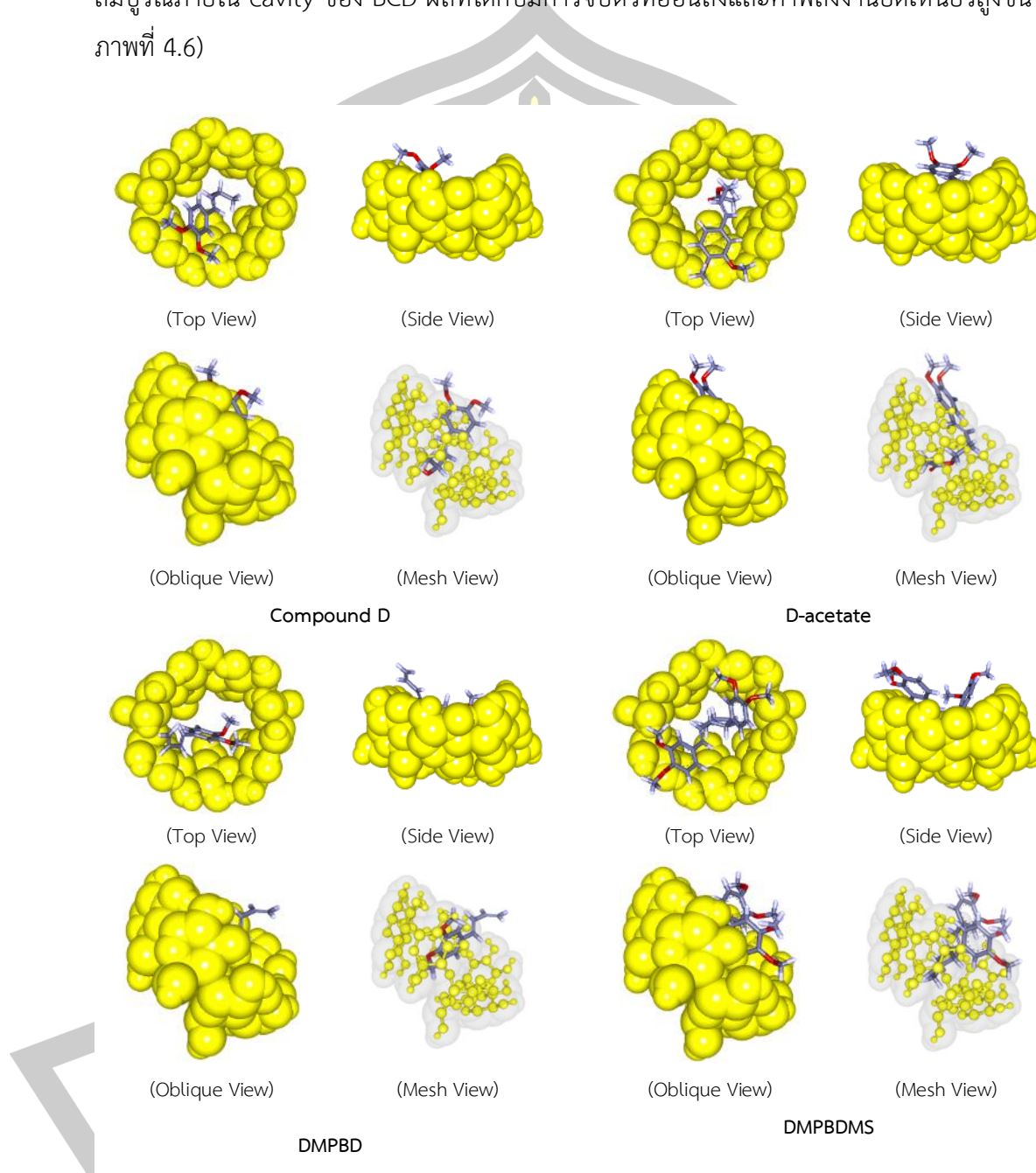
การศึกษานี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์โครงสร้างสามมิติของ Inclusion Complex ที่เกิดจากการจับตัวของ BCD กับสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในสามกลุ่มหลัก ได้แก่ Phenylbutanoids, Curcuminoids และ Terpenoids โดยใช้โปรแกรม Discovery Studio 2021 Client ผลการศึกษาช่วยให้เข้าใจถึงรูปแบบการจัดเรียงตัวของโมเลกุล และปฏิสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นภายใน cavity ของ BCD เพื่อประเมินความเสถียรของ Inclusion Complex ที่เกิดขึ้น

กลุ่ม Phenylbutanoids พบว่า DMPBDMS มีค่าพลังงานยึดเหนี่ยวต่ำที่สุดในกลุ่ม (-4.8 kcal/mol) ซึ่งสะท้อนถึงปฏิสัมพันธ์ที่เสถียร โครงสร้างสามมิติแสดงให้เห็นว่า DMPBDMS สามารถแทรกตัวเข้าสู่ cavity ของ BCD ได้อย่างเหมาะสม โดยมีวงแหวนเบนซีนจัดเรียงตัวแนบกับพื้นผิวด้านในของ BCD และสร้างแรง Van der Waals ที่ช่วยเสริมความมั่นคงของ Inclusion Complex สำหรับ Compound D (-4.1 kcal/mol) และ D-acetate (-4.0 kcal/mol) ภาพสามมิติแสดงให้เห็นว่าสารทั้งสองยังสามารถเข้าไปอยู่ภายใน cavity ของ BCD ได้ แต่มีปฏิสัมพันธ์ที่อ่อนลงเมื่อเทียบกับ DMPBDMS โดยเฉพาะ D-acetate ซึ่งมีขนาดโมเลกุลเล็กกว่า ทำให้พื้นที่สัมผัสกับ cavity ลดลง ส่งผลให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวที่อ่อนกว่า (ดูภาพที่ 4.4)

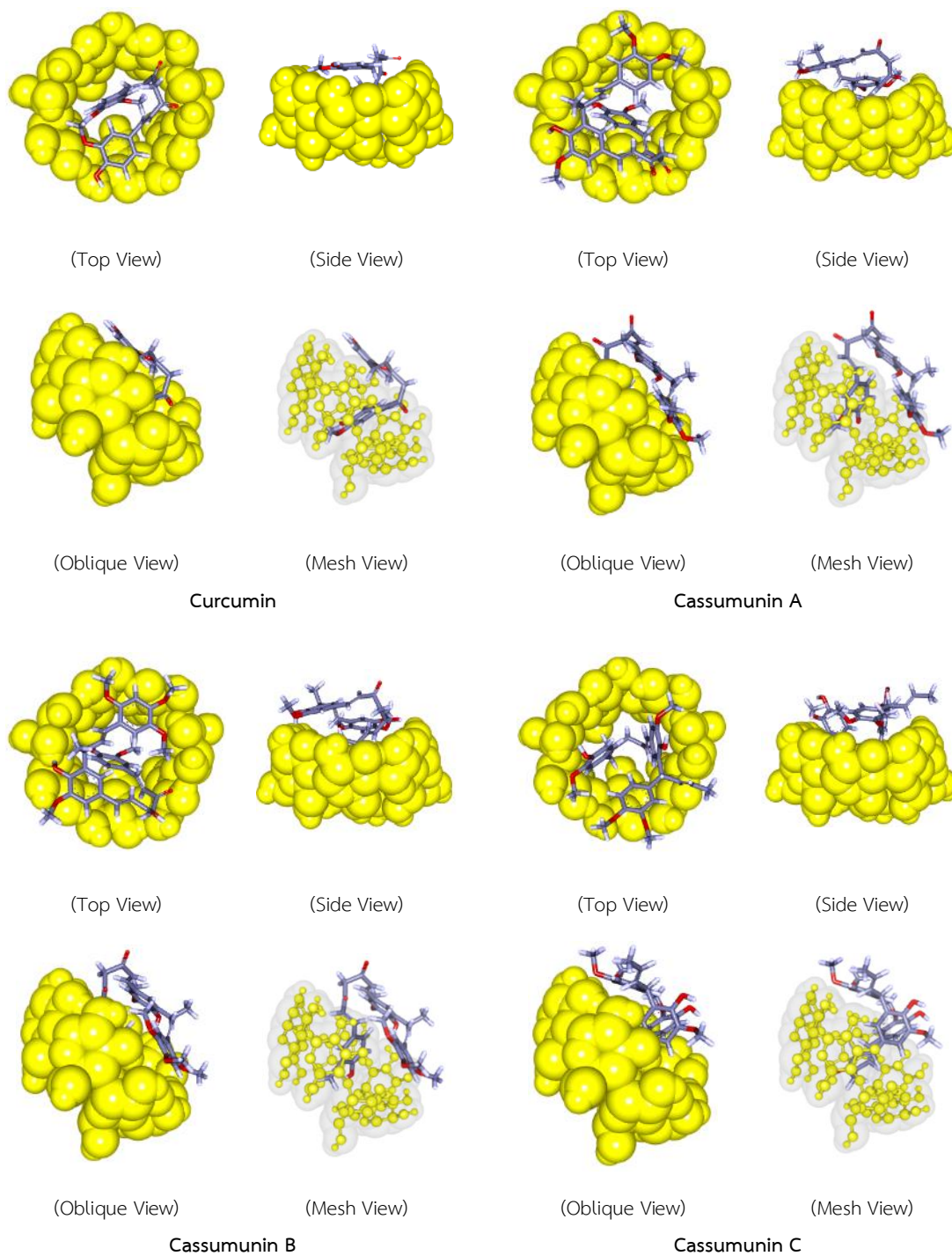
กลุ่ม Curcuminoids พบว่า Curcumin มีค่าพลังงานต่ำที่สุดในกลุ่ม (-5.6 kcal/mol) แสดงให้เห็นว่ามีการจับตัวที่มั่นคง โครงสร้างสามมิติแสดงให้เห็นว่า Curcumin มีสายโซ่ conjugated system ที่สามารถปรับตัวให้พอดีกับ cavity ของ BCD ได้เป็นอย่างดี ส่งผลให้เกิด Inclusion Complex ที่เสถียร Cassumunin A (-5.4 kcal/mol) และ Cassumunin B (-5.1 kcal/mol) มีปฏิสัมพันธ์ที่แข็งแกร่งกับ BCD เช่นกัน โดยภาพสามมิติแสดงให้เห็นว่ากลุ่มฟังก์ชันของ Cassumunin A และ B สามารถสร้างปฏิสัมพันธ์ที่ความเสถียรของ Inclusion Complex ขณะที่ Cassumunin C (-4.9 kcal/mol) มีการจับตัวที่อ่อนลงเล็กน้อย เนื่องจากความแตกต่างของโครงสร้างและการจัดเรียงตัวภายใน cavity ของ BCD (ดูภาพที่ 4.5)

กลุ่ม Terpenoids พบว่า Zerumbone (-4.6 kcal/mol) มีการจัดเรียงตัวภายใน cavity ของ BCD ได้อย่างเหมาะสม โดยโครงสร้างสามมิติแสดงให้เห็นว่าวงแหวนไฮโดรคาร์บอนของ Zerumbone มีปฏิสัมพันธ์ทาง Van der Waals กับผนังด้านในของ BCD ได้เป็นอย่างดี ทำให้เกิดโครงสร้าง Inclusion Complex ที่มีเสถียรภาพ สำหรับ Terpinen-4-ol (-3.9 kcal/mol) และ Sabinene (-3.5 kcal/mol) โครงสร้างสามมิติแสดงให้เห็นว่ามีการจัดเรียงตัวภายใน cavity ได้ดีพอสมควร แต่มีบางส่วนของโครงสร้างที่ยื่นออกมาเล็กน้อย ส่งผลให้ค่าพลังงานสูงขึ้นเมื่อเทียบกับ

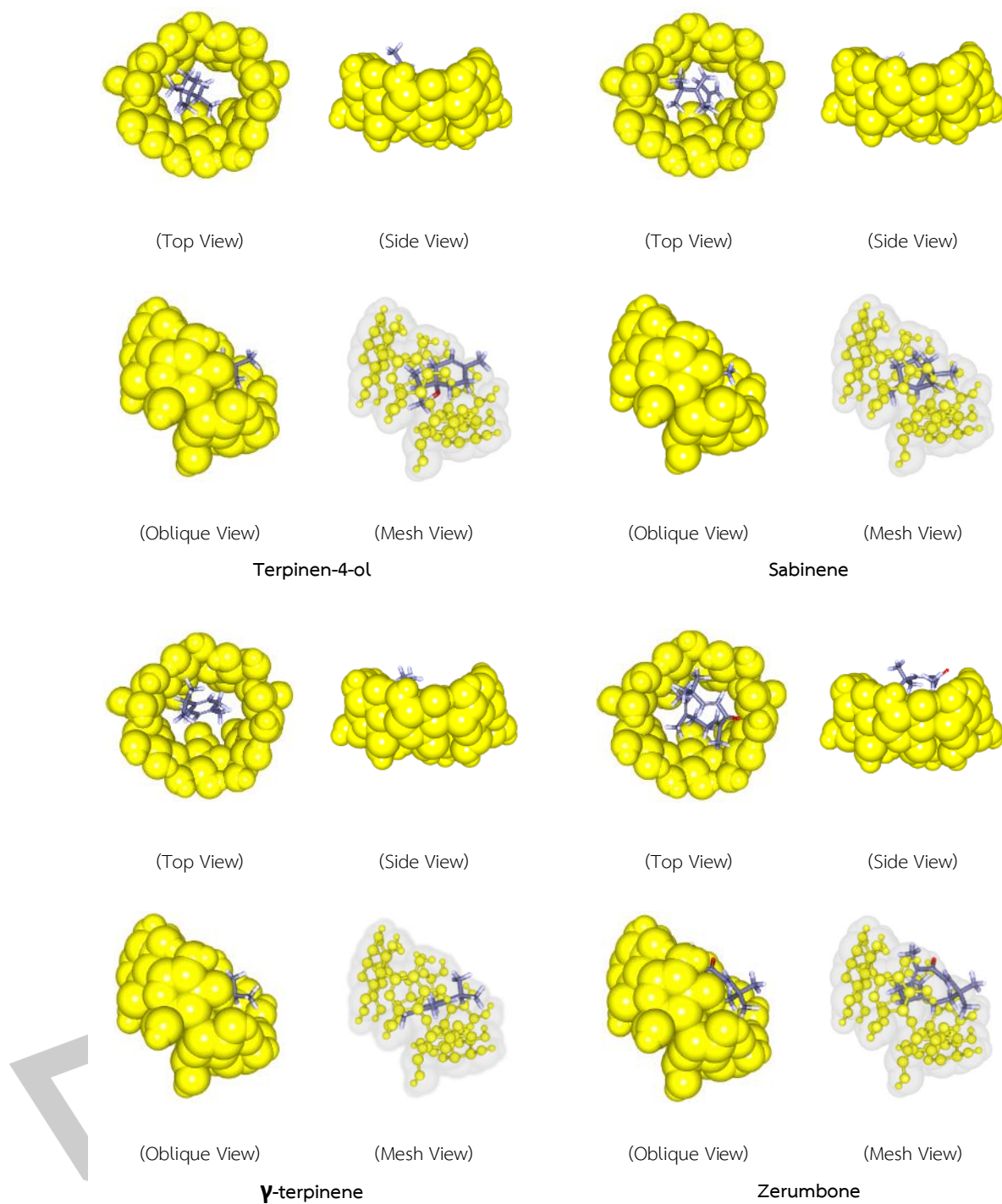
Zerumbone ขณะที่ γ -Terpinene (-3.3 kcal/mol) พบว่าโมเลกุลแม้ว่าจะถูกโอบล้อมอย่างสมบูรณ์ภายใน cavity ของ BCD ผลที่ได้กับการจับตัวที่อ่อนลงและค่าพลังงานยึดเหนี่ยวสูงขึ้น (ดูภาพที่ 4.6)



ภาพที่ 4.4 ผลการศึกษา Molecular docking ของ Beta-Cyclodextrins ร่วมกับสารกลุ่ม Phenylbutanoids



ภาพที่ 4.5 ผลการศึกษา Molecular docking ของ Beta-Cyclodextrins ร่วมกับสารกลุ่ม Curcuminoids



ภาพที่ 4.6 ผลการศึกษา Molecular docking ของ Beta-Cyclodextrins ร่วมกับสารกลุ่ม Terpenoids

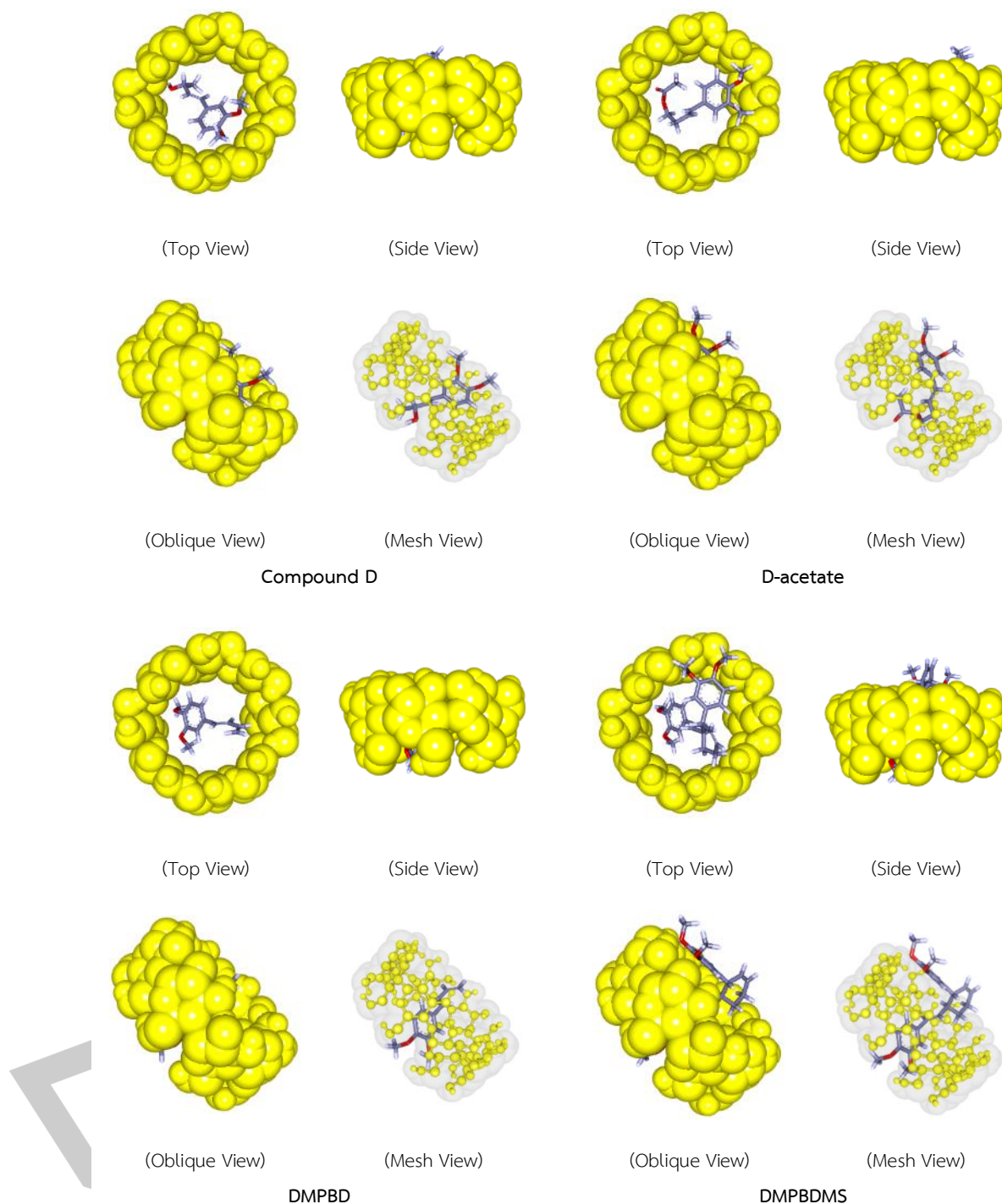
● Gamma-Cyclodextrin (GCD)

การศึกษานี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์โครงสร้างสามมิติของ Inclusion Complex ที่เกิดจากการจับตัวของ GCD กับสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากเหง้าโพลีในสามกลุ่มหลัก ได้แก่ Phenylbutanoids, Curcuminoids และ Terpenoids โดยใช้โปรแกรม Discovery Studio 2021 Client การแสดงผลภาพสามมิตินี้ช่วยให้เข้าใจลักษณะการจัดเรียงตัวของโมเลกุล และปฏิสัมพันธ์ทางโครงสร้างที่สำคัญซึ่งช่วยให้สามารถประเมินความเสถียรของ Inclusion Complex ได้อย่างแม่นยำ ดังนี้

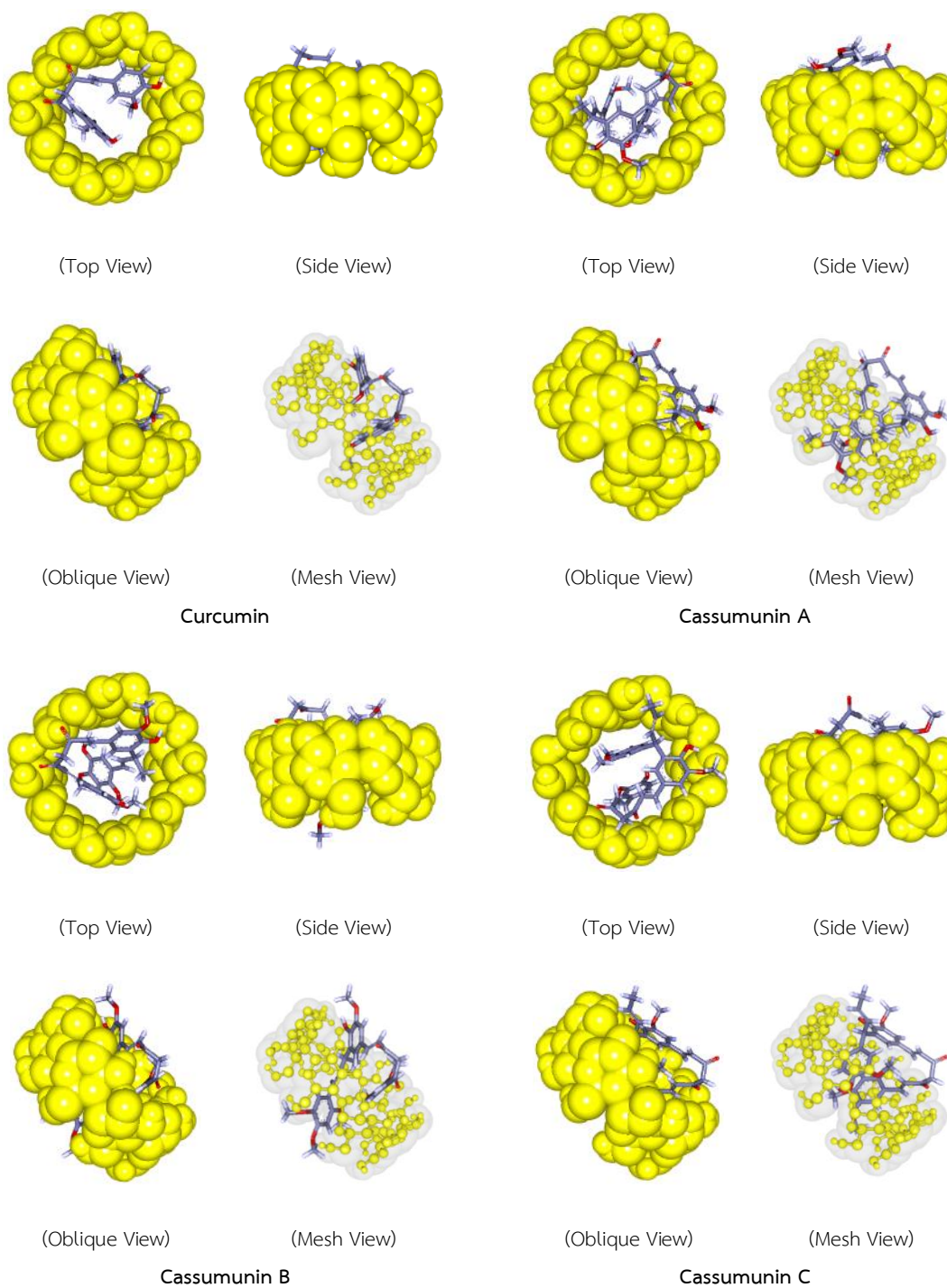
กลุ่ม Phenylbutanoids พบว่า DMPBDMS มีค่าพลังงานยึดเหนี่ยวต่ำที่สุดในกลุ่ม (-5.4 kcal/mol) แสดงถึงปฏิสัมพันธ์ที่แข็งแกร่งกับ GCD ภาพสามมิติแสดงให้เห็นว่าโมเลกุลของ DMPBDMS มีขนาดเหมาะสมกับ cavity ของ GCD โดยสามารถสร้างแรง Van der Waals ได้อย่างครอบคลุมระหว่างวงแหวนเบนซีนและผนังด้านในของ cavity สำหรับ DMPBD (-4.0 kcal/mol) พบว่ามีการจับตัวที่มั่นคงภายใน cavity ของ GCD ในขณะที่ D-acetate (-4.3 kcal/mol) และ Compound D (-4.2 kcal/mol) มีพลังงานยึดเหนี่ยวสูงขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากมีขนาดเล็กกว่า ทำให้พื้นที่สัมผัสกับ cavity ลดลง ส่งผลให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวที่อ่อนกว่า (ดูภาพที่ 4.7)

สารในกลุ่ม Curcuminoids พบว่า Cassumunin B มีค่าพลังงานต่ำที่สุดในกลุ่ม (-5.7 kcal/mol) รองลงมาคือ Cassumunin A (-5.6 kcal/mol) และ Cassumunin C (-5.5 kcal/mol) ภาพสามมิติแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างของ Cassumunin A และ B มีตำแหน่งกลุ่มฟังก์ชัน hydroxyl (-OH) และ keto (-C=O) ที่สามารถสร้างปฏิสัมพันธ์กับ cavity ทำให้เกิด Inclusion Complex ที่เสถียร สำหรับ Curcumin (-5.2 kcal/mol) พบว่ามีการจับตัวที่มั่นคงภายใน cavity ของ GCD โดย cavity สามารถรองรับโครงสร้างที่ยาวของ Curcumin ได้อย่างดี ส่งผลให้เกิดแรง Van der Waals ที่ช่วยเพิ่มความเสถียรของ Inclusion Complex (ดูภาพที่ 4.5)

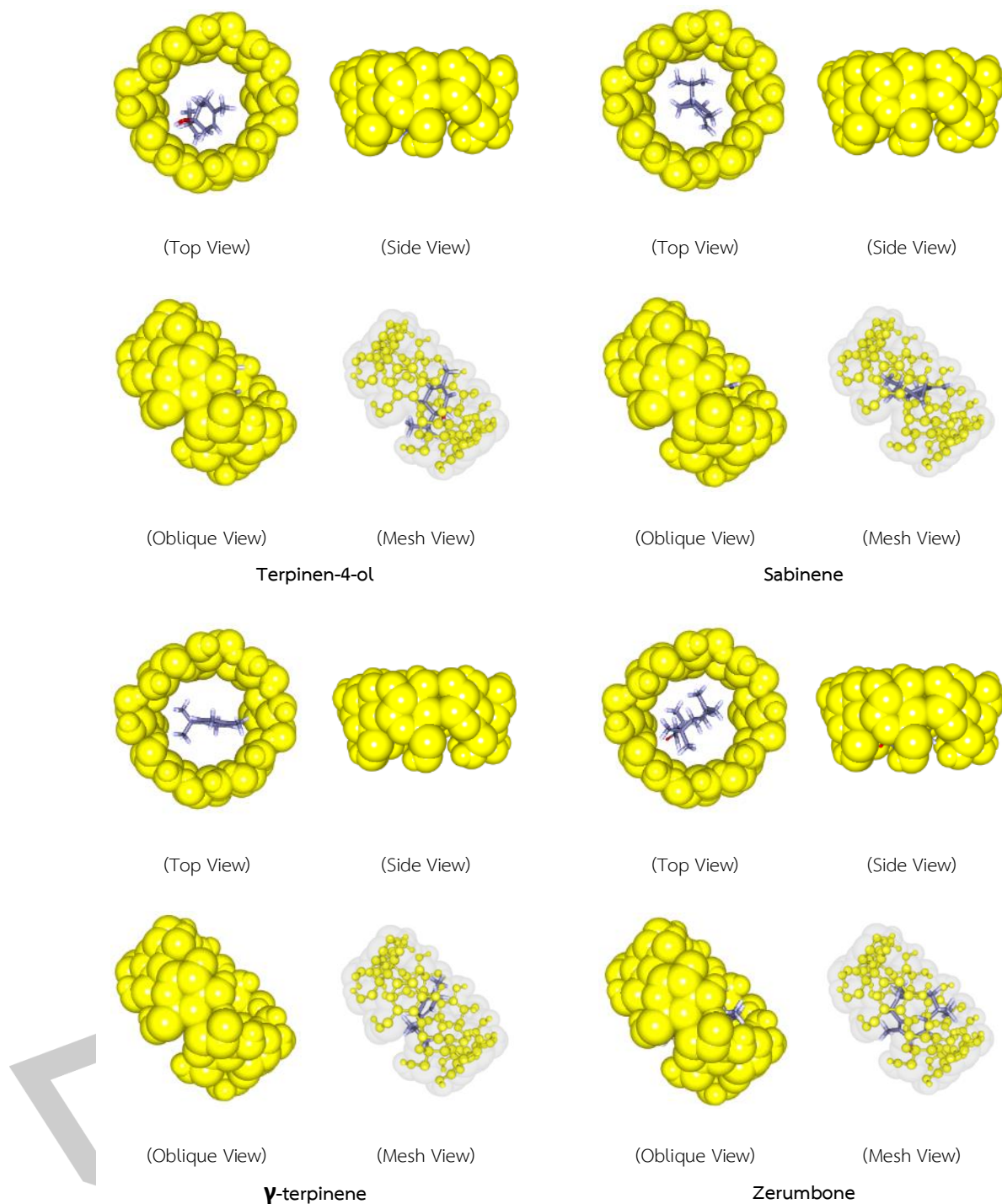
กลุ่ม Terpenoids พบว่า Zerumbone (-5.0 kcal/mol) แสดงค่าพลังงานต่ำที่สุดในกลุ่ม Terpenoids ภาพสามมิติแสดงให้เห็นว่า Zerumbone สามารถแทรกตัวเข้าไปใน cavity ของ GCD ได้อย่างเหมาะสม และสร้างปฏิสัมพันธ์ Van der Waals อย่างแข็งแรงระหว่างวงแหวนไฮโดรคาร์บอนกับพื้นผิวด้านในของ GCD ทำให้โครงสร้าง Inclusion Complex มีความเสถียรสูง สำหรับ Terpinen-4-ol (-3.4 kcal/mol) และ Sabinene (-3.2 kcal/mol) โครงสร้างสามมิติแสดงให้เห็นว่ามีปฏิสัมพันธ์กับ cavity ได้ดีแต่เนื่องจากโมเลกุลมีขนาดเล็กและความซับซ้อนค่อนข้างน้อย ส่งผลให้ค่าพลังงานสูงกว่า Zerumbone ขณะที่ γ -Terpinene (-3.2 kcal/mol) แสดงการจับตัวที่ไม่แนบสนิทภายใน cavity ส่งผลให้แรงปฏิสัมพันธ์ลดลง และค่าพลังงานยึดเหนี่ยวสูงขึ้น (ดูภาพที่ 4.6)



ภาพที่ 4.7 ผลการศึกษา Molecular docking ของ Gamma-Cyclodextrins ร่วมกับสารกลุ่ม Phenylbutanoids



ภาพที่ 4.8 ผลการศึกษา Molecular docking ของ Gamma-Cyclodextrins ร่วมกับสารกลุ่ม Curcuminoids



ภาพที่ 4.9 ผลการศึกษา Molecular docking ของ Gamma-Cyclodextrins ร่วมกับสารกลุ่ม Terpenoids

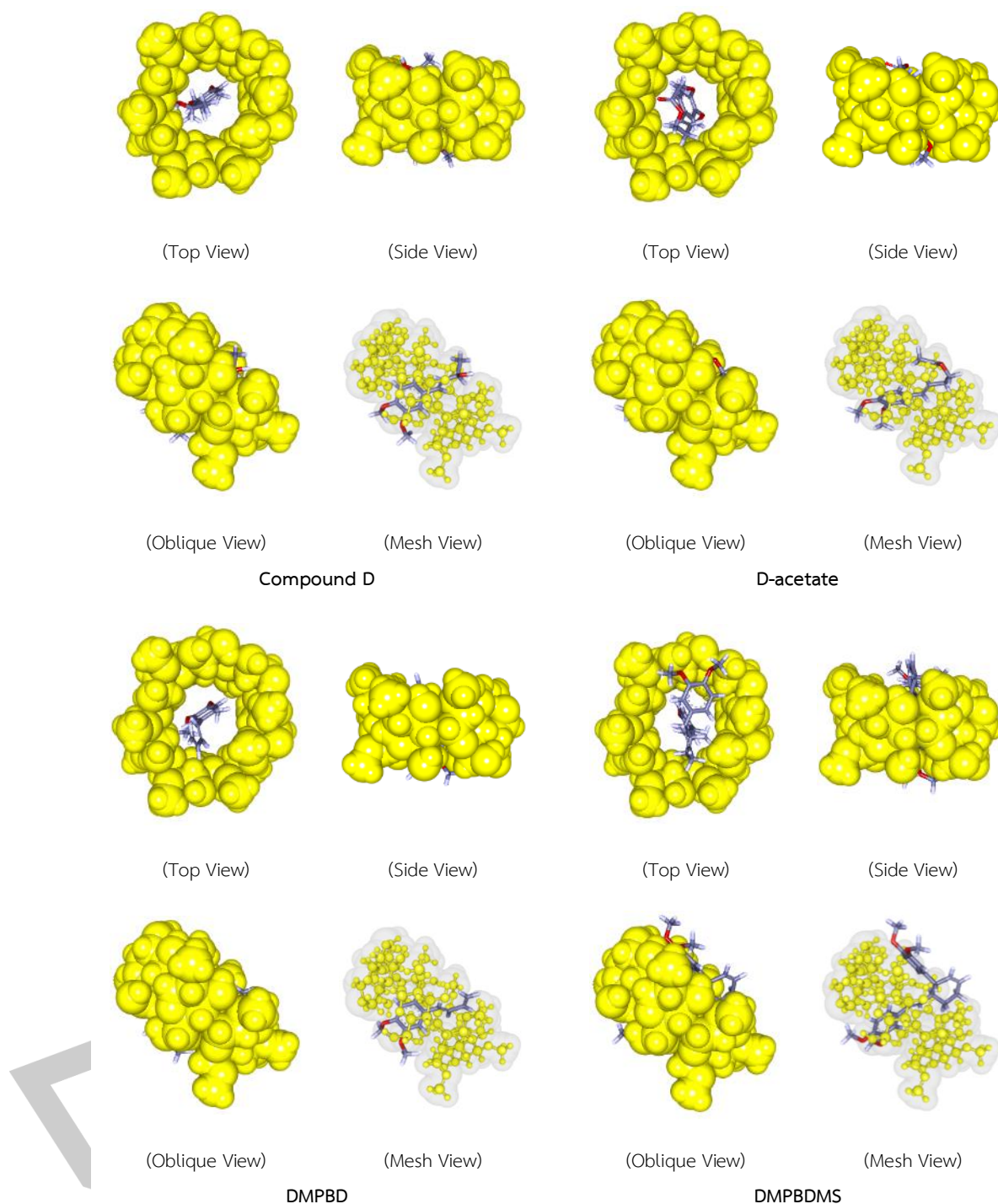
● Methyl-Beta-Cyclodextrin (MBCD)

การศึกษานี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์โครงสร้างสามมิติของ Inclusion Complex ที่เกิดจากการจับตัวของ MBCD กับสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากเหง้าไพลในสามกลุ่มหลัก ได้แก่ Phenylbutanoids, Curcuminoids และ Terpenoids โดยใช้โปรแกรม Discovery Studio 2021 Client การแสดงผลภาพสามมิตินี้ช่วยให้เข้าใจลักษณะการจัดเรียงตัวของโมเลกุล และปฏิสัมพันธ์ทางโครงสร้างที่สำคัญ ซึ่งช่วยให้สามารถประเมินความเสถียรของ Inclusion Complex ได้อย่างแม่นยำ ดังนี้

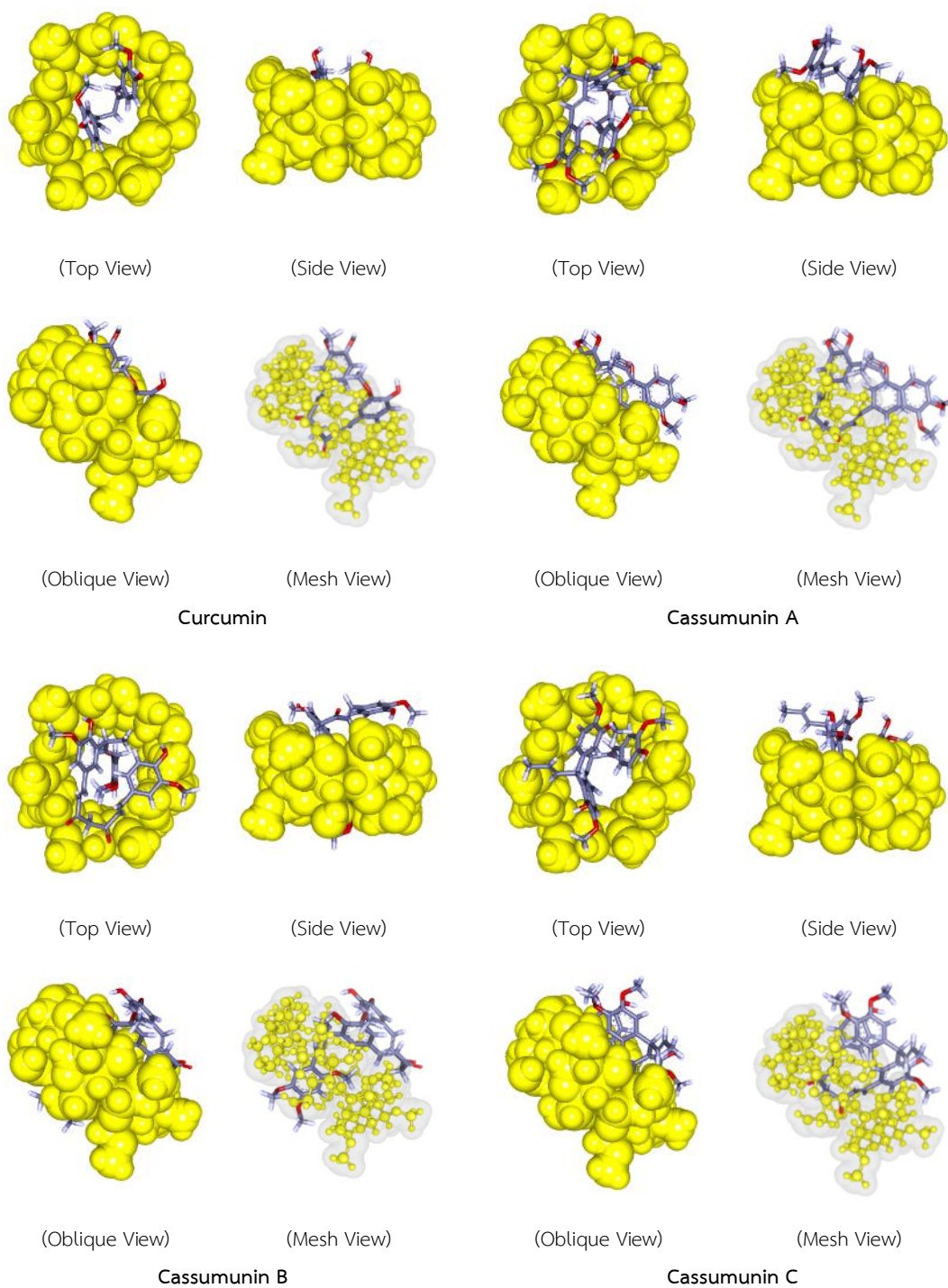
กลุ่ม Phenylbutanoids พบว่า DMPBDMS มีค่าพลังงานยึดเหนี่ยวต่ำที่สุดในกลุ่ม (-5.6 kcal/mol) แสดงถึงปฏิสัมพันธ์ที่แข็งแกร่งกับ MBCD ภาพสามมิติแสดงให้เห็นว่าโมเลกุลของ DMPBDMS มีขนาดเหมาะสมกับ cavity ของ MBCD โดยสามารถสร้างแรง Van der Waals ได้อย่างครอบคลุมระหว่างวงแหวนเบนซีนและผนังด้านในของ cavity สำหรับ DMPBD มีค่ามากที่สุดในกลุ่มนี้ (-4.1 kcal/mol) พบว่าการจับตัวที่มั่นคงภายใน cavity ของ MBCD โดยมีปฏิสัมพันธ์ที่แข็งแรงพอสมควร ในขณะที่ D-acetate (-4.5 kcal/mol) และ Compound D (-4.4 kcal/mol) มีพลังงานยึดเหนี่ยวสูงขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากมีขนาดเล็กกว่า ทำให้พื้นที่สัมผัสกับ cavity ลดลง ส่งผลให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวที่อ่อนกว่า (ดูภาพที่ 4.10)

กลุ่ม Curcuminoids พบว่า Curcumin มีค่าพลังงานต่ำที่สุดในกลุ่ม (-5.6 kcal/mol) รองลงมาคือ Cassumunin C (-5.0 kcal/mol) และ Cassumunin A (-4.7 kcal/mol) ภาพสามมิติแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างของ Curcumin และ Cassumunin B มีตำแหน่งกลุ่มฟังก์ชัน hydroxyl (-OH) และ keto (-C=O) ที่สามารถสร้างปฏิสัมพันธ์ที่แข็งแกร่งกับขอบของ cavity ทำให้เกิด Inclusion Complex ที่เสถียร สำหรับ Cassumunin A และ C พบว่าการจับตัวที่มั่นคงภายใน cavity ของ MBCD โดย cavity สามารถรองรับโครงสร้างที่ยาวของ Curcuminoids ได้อย่างดี ส่งผลให้เกิดแรง Van der Waals ที่ช่วยเพิ่มความเสถียรของ Inclusion Complex (ดูภาพที่ 4.11)

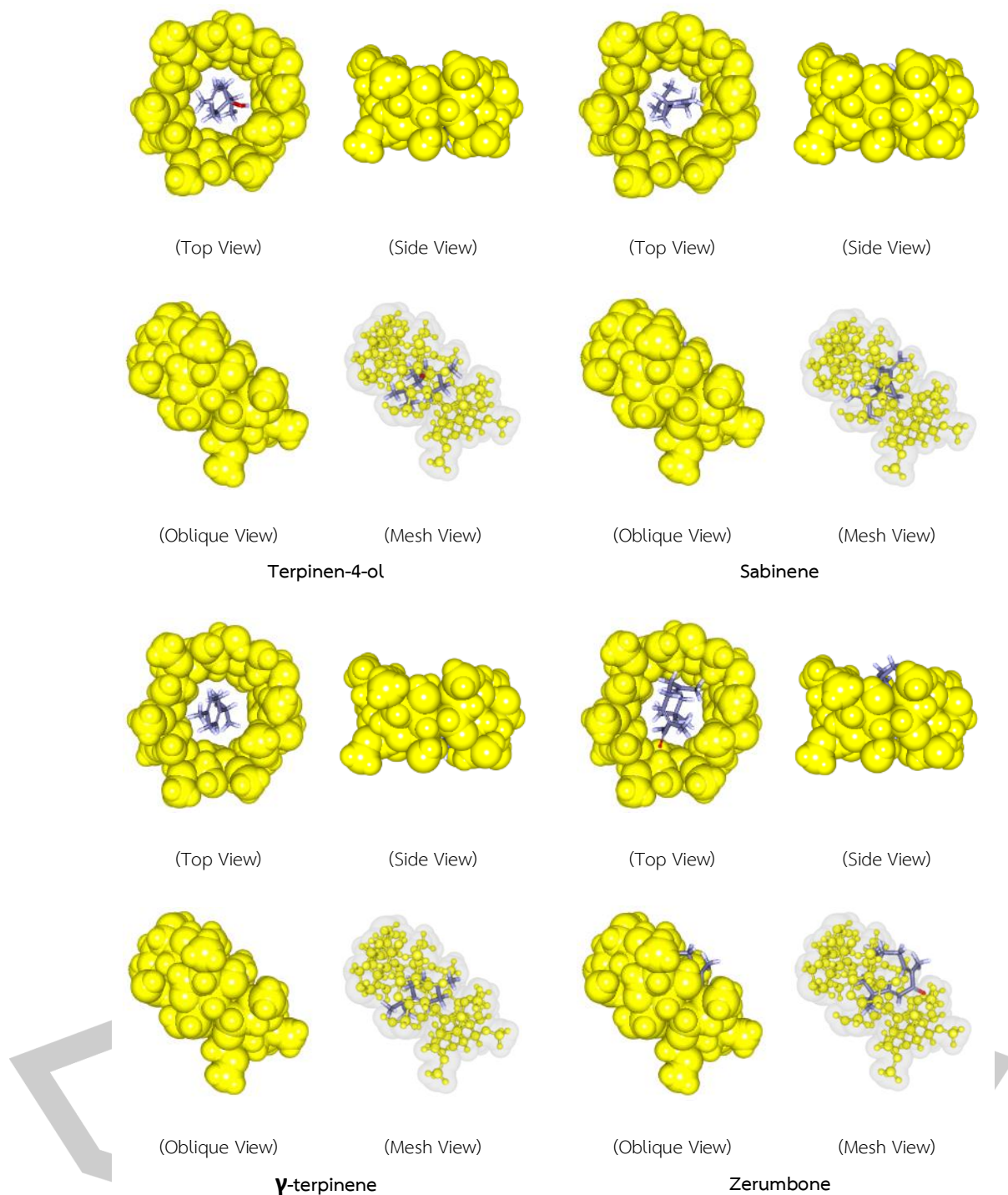
กลุ่ม Terpenoids พบว่า Zerumbone (-4.9 kcal/mol) แสดงค่าพลังงานต่ำที่สุดในกลุ่ม Terpenoids ภาพสามมิติแสดงให้เห็นว่า Zerumbone สามารถแทรกตัวเข้าไปใน cavity ของ MBCD ได้อย่างเหมาะสม และสร้างปฏิสัมพันธ์ Van der Waals อย่างแข็งแรงระหว่างวงแหวนไฮโดรคาร์บอนกับพื้นผิวด้านในของ MBCD ทำให้โครงสร้าง Inclusion Complex มีความเสถียรสูง สำหรับ Terpinen-4-ol (-4.1 kcal/mol) และ Sabinene (-3.8 kcal/mol) โครงสร้างสามมิติแสดงให้เห็นว่ามีปฏิสัมพันธ์กับ cavity ได้ดีแต่ยังมีส่วนของโมเลกุลไม่เกิดแรงปฏิสัมพันธ์ ส่งผลให้ค่าพลังงานสูงกว่า Zerumbone ขณะที่ γ -Terpinene (-3.6 kcal/mol) แสดงการจับตัวที่ไม่ดีนักภายใน cavity ส่งผลให้แรงปฏิสัมพันธ์ลดลง และค่าพลังงานยึดเหนี่ยวสูงขึ้น (ดูภาพที่ 4.12)



ภาพที่ 4.10 ผลการศึกษา Molecular docking ของ Methyl-Beta-Cyclodextrins ร่วมกับสารกลุ่ม Phenylbutanoids



ภาพที่ 4.11 ผลการศึกษา Molecular docking ของ Methyl-Beta-Cyclodextrins ร่วมกับสารกลุ่ม Curcuminoids



ภาพที่ 4.12 ผลการศึกษา Molecular docking ของ Methyl-beta-Cyclodextrins ร่วมกับสารกลุ่ม Terpenoids

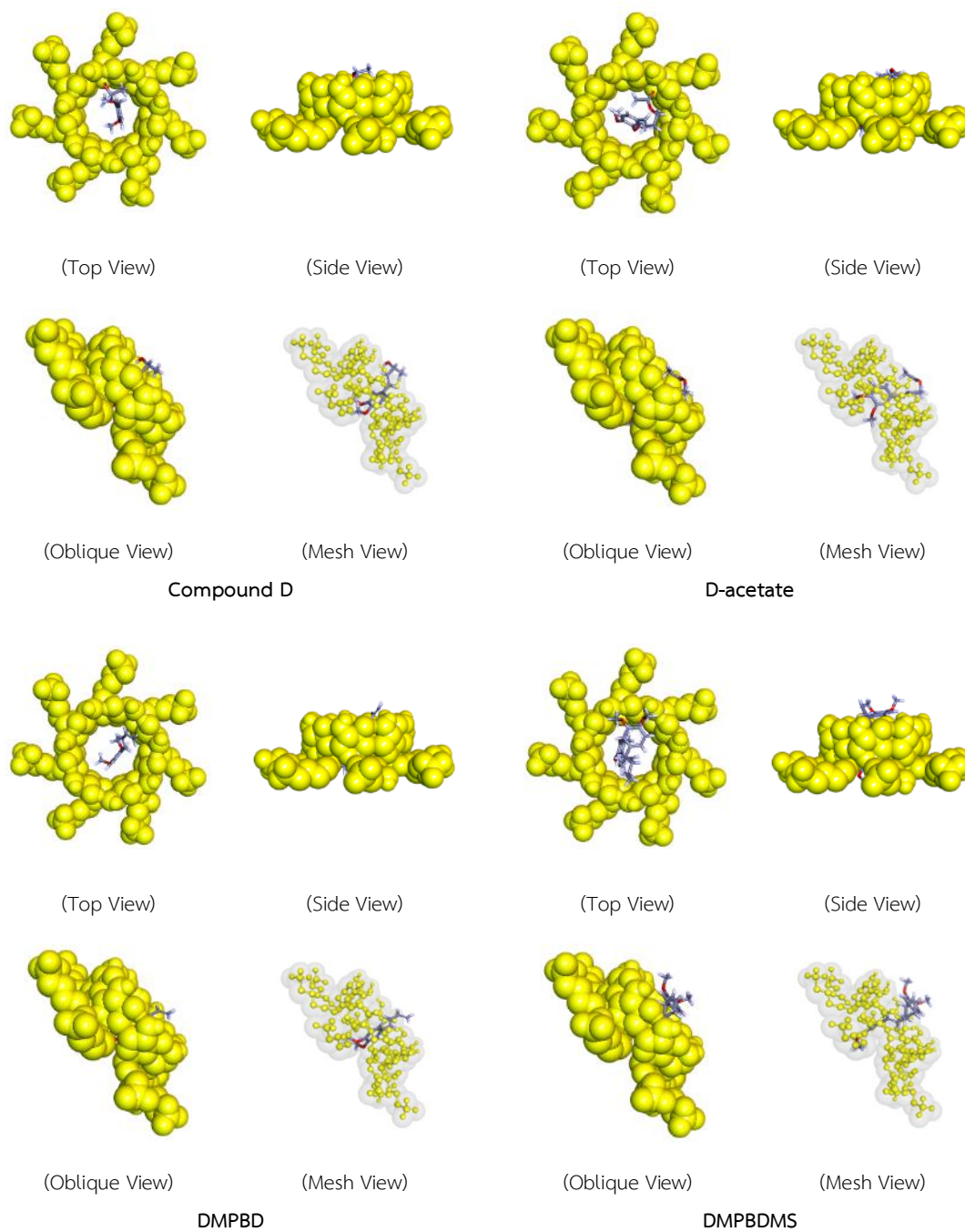
● Sulfobutylether-Beta-Cyclodextrin (SBEB CD)

การศึกษานี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์โครงสร้างสามมิติของ Inclusion Complex ที่เกิดจากการจับตัวของ SBEB CD กับสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากเหง้าไพลในสามกลุ่มหลัก ได้แก่ Phenylbutanoids, Curcuminoids และ Terpenoids โดยใช้โปรแกรม Discovery Studio 2021 Client การแสดงผลภาพสามมิตินี้ช่วยให้เข้าใจลักษณะการจัดเรียงตัวของโมเลกุล และปฏิสัมพันธ์ทางโครงสร้างที่สำคัญ ซึ่งช่วยให้สามารถประเมินความเสถียรของ Inclusion Complex ดังนี้

ในกลุ่ม Phenylbutanoids พบว่า DMPBDMS มีค่าพลังงานยึดเหนี่ยวต่ำที่สุดในกลุ่ม (-5.3 kcal/mol) แสดงถึงปฏิสัมพันธ์ที่แข็งแกร่งกับ SBEB CD ภาพสามมิติแสดงให้เห็นว่าโมเลกุลของ DMPBDMS มีขนาดเหมาะสมกับ cavity ของ SBEB CD โดยสามารถสร้างแรง Van der Waals ได้อย่างครอบคลุมระหว่างวงแหวนเบนซีนและผนังด้านในของ cavity สำหรับ DMPBD (-3.8 kcal/mol) พบว่าการจับตัวที่มั่นคงภายใน cavity ของ SBEB CD โดยมีปฏิสัมพันธ์แม้ค่าจะน้อยที่สุดในกลุ่มแต่แข็งแกร่งพอสมควร ในขณะที่ D-acetate (-4.0 kcal/mol) และ Compound D (-4.1 kcal/mol) มีพลังงานยึดเหนี่ยวสูงขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากมีขนาดเล็กกว่า ทำให้พื้นที่สัมผัสกับ cavity ลดลง ส่งผลให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวที่อ่อนกว่า (ดูภาพที่ 4.13)

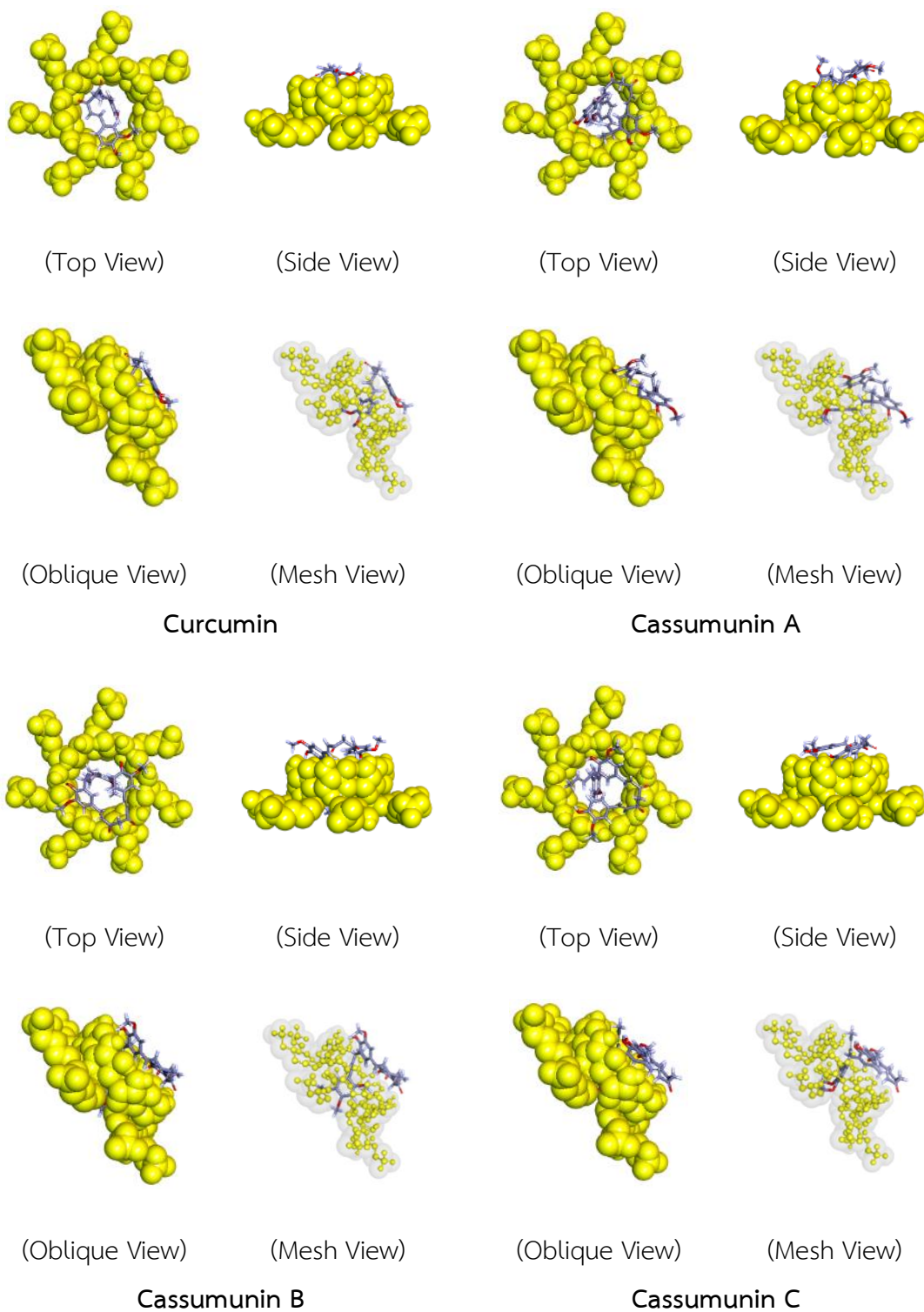
กลุ่ม Curcuminoids พบว่า Cassumunin B มีค่าพลังงานต่ำที่สุดในกลุ่ม (-5.7 kcal/mol) รองลงมาคือ Cassumunin C (-5.6 kcal/mol) และ Cassumunin A (-5.2 kcal/mol) ภาพสามมิติแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างของ Cassumunin B และ C มีตำแหน่งกลุ่มฟังก์ชัน hydroxyl (-OH) และ keto (-C=O) ที่สามารถสร้างปฏิสัมพันธ์ที่แข็งแกร่งกับขอบของ cavity ทำให้เกิด Inclusion Complex ที่เสถียร สำหรับ Curcumin (-5.5 kcal/mol) พบว่าการจับตัวที่มั่นคงภายใน cavity ของ SBEB CD โดย cavity สามารถรองรับโครงสร้างที่ยาวของ Curcumin ได้อย่างดี ส่งผลให้เกิดแรง Van der Waals ที่ช่วยเพิ่มความเสถียรของ Inclusion Complex (ดูภาพที่ 4.14)

ในกลุ่ม Terpenoids พบว่า Zerumbone (-4.8 kcal/mol) แสดงค่าพลังงานต่ำที่สุดในกลุ่ม Terpenoids ภาพสามมิติแสดงให้เห็นว่า Zerumbone สามารถแทรกตัวเข้าไปใน cavity ของ SBEB CD ได้อย่างเหมาะสม และสร้างปฏิสัมพันธ์ Van der Waals อย่างแข็งแกร่งระหว่างวงแหวนไฮโดรคาร์บอนกับพื้นผิวด้านในของ SBEB CD ทำให้โครงสร้าง Inclusion Complex มีความเสถียรสูง สำหรับ Terpinen-4-ol (-3.7 kcal/mol) และ Sabinene (-3.4 kcal/mol) โครงสร้างสามมิติแสดงให้เห็นว่ามีปฏิสัมพันธ์กับ cavity ได้ดีแต่ยังมีบางส่วนของโมเลกุลที่ไม่ได้ถูกโอบล้อมอย่างสมบูรณ์ ส่งผลให้ค่าพลังงานสูงกว่า Zerumbone ขณะที่ γ -Terpinene (-3.5 kcal/mol) แสดงการจับตัวที่ไม่แนบสนิทภายใน cavity ส่งผลให้แรงปฏิสัมพันธ์ลดลง และค่าพลังงานยึดเหนี่ยวสูงขึ้น (ดูภาพที่ 4.15)

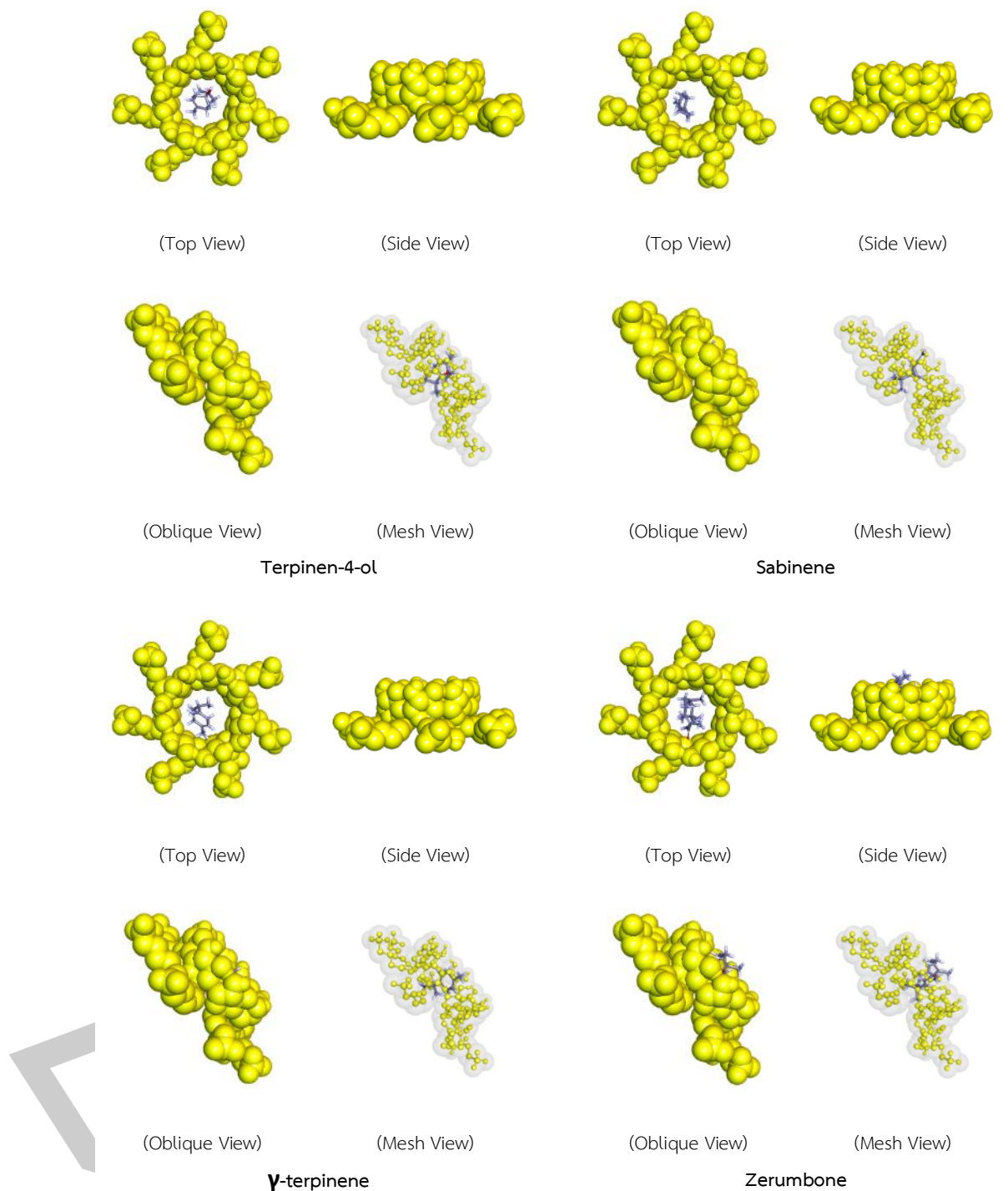


ภาพที่ 4.13 ผลการศึกษา Molecular docking ของ Sufobutylether-Beta-Cyclodextrin ร่วมกับสารกลุ่ม

Phenylbutanoids



ภาพที่ 4.14 ผลการศึกษา Molecular docking Sufobutylether-Beta-Cyclodextrinร่วมกับสารกลุ่ม Curcuminoids



ภาพที่ 4.15 ผลการศึกษา Molecular docking ของ Sufobutylether-Beta-Cyclodextrin ร่วมกับสารกลุ่ม

Terpenoids

● Hydroxypropyl-Beta-Cyclodextrin (HPBCD)

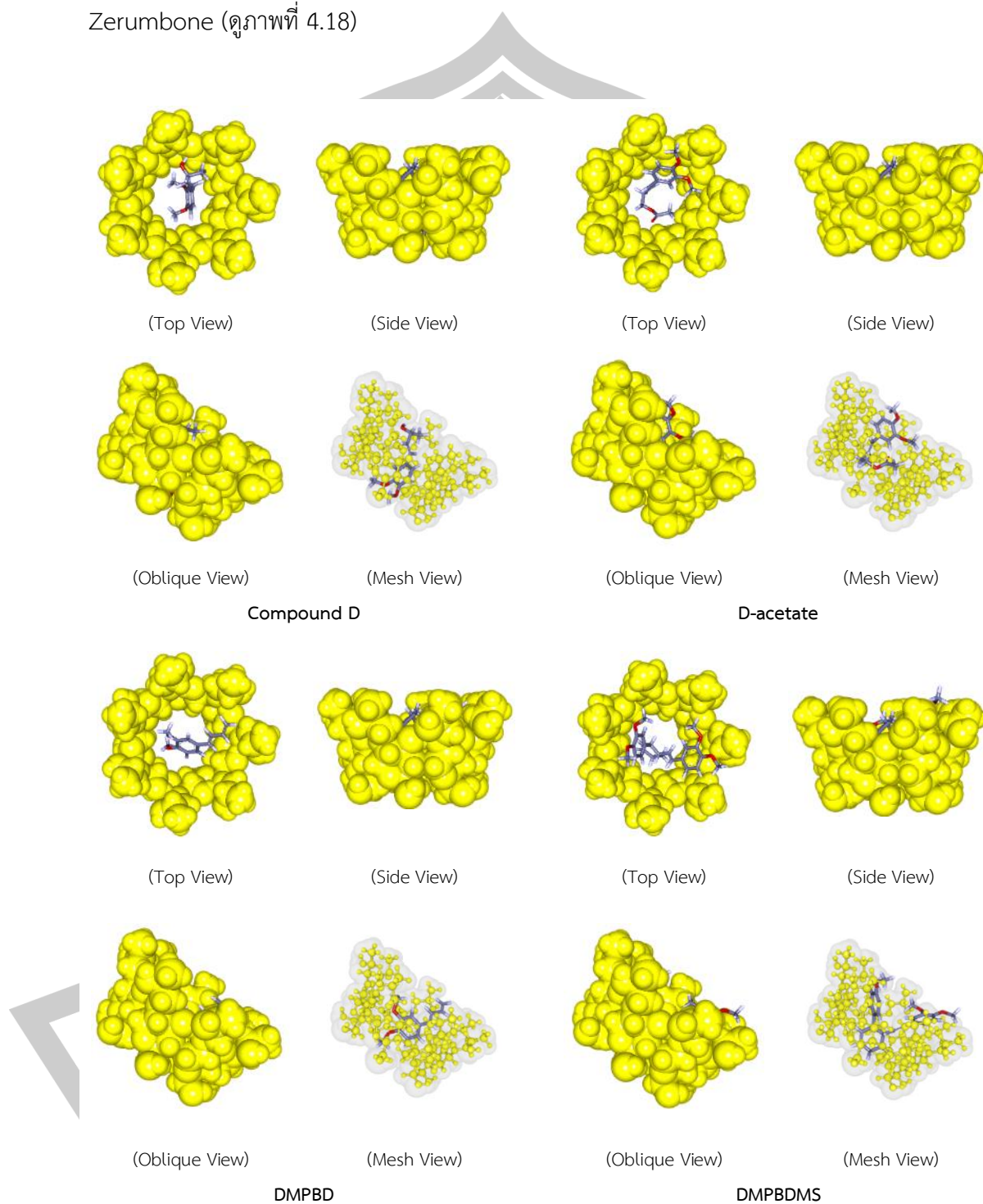
การศึกษานี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์โครงสร้างสามมิติของ Inclusion Complex ที่เกิดจากการจับตัวของ HPBCD กับสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากเหง้าโพลในสามกลุ่มหลัก ได้แก่ Phenylbutanoids, Curcuminoids และ Terpenoids โดยใช้โปรแกรม Discovery Studio 2021 Client การแสดงผลภาพสามมิตินี้ช่วยให้เข้าใจลักษณะการจัดเรียงตัวของโมเลกุล และปฏิสัมพันธ์ทางโครงสร้างที่สำคัญ ซึ่งช่วยให้สามารถประเมินความเสถียรของ Inclusion Complex ได้อย่างแม่นยำ ซึ่งแตกต่างกันตามกลุ่มสารดังนี้

กลุ่ม Phenylbutanoids พบว่า DMPBDMS มีค่าพลังงานยึดเหนี่ยวต่ำที่สุดในกลุ่ม (-5.8 kcal/mol) แสดงถึงความเสถียรของการจับตัวที่สูง ภาพสามมิติแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างของ DMPBDMS สามารถปรับตัวเข้าสู่ cavity ของ HPBCD ได้อย่างเหมาะสม โดยวงแหวนเบนซีนของสารสร้างแรง Van der Waals ที่แข็งแกร่งกับผนังด้านในของ cavity สำหรับ DMPBD (-4.1 kcal/mol) พบว่ามีการจับตัวที่มั่นคงภายใน cavity ของ HPBCD แต่มีปฏิสัมพันธ์ที่อ่อนลงเมื่อเทียบกับ DMPBDMS เนื่องจากพื้นที่สัมผัสกับ cavity มีขนาดเล็กกว่า ทำให้แรง Van der Waals ลดลงเล็กน้อย ในขณะที่ D-acetate (-4.4 kcal/mol) และ Compound D (-4.3 kcal/mol) แสดงให้เห็นว่ามีการจับตัวที่เกิดขึ้นอย่างมั่นคง แต่พื้นที่สัมผัสระหว่างโมเลกุลกับ cavity น้อยกว่า ส่งผลให้เสถียรภาพโดยรวมลดลง (ดูภาพที่ 4.16)

กลุ่ม Curcuminoids พบว่า Curcumin และ Cassumunin C แสดงค่าพลังงานยึดเหนี่ยวต่ำที่สุดที่ (-5.8 kcal/mol) แสดงถึงการจับตัวที่แข็งแกร่งและเสถียร รองลงมาคือ Cassumunin A และ Cassumunin B ซึ่งมีค่าพลังงานเท่ากันที่ (-5.7 kcal/mol) ภาพสามมิติแสดงให้เห็นว่า Curcumin และ Cassumunin C สามารถปรับตัวให้เหมาะสมกับ cavity ของ HPBCD ได้อย่างสมบูรณ์ โดยกลุ่ม hydroxyl (-OH) และ keto (-C=O) ของสารเหล่านี้สร้างปฏิสัมพันธ์กับผนังด้านในของ HPBCD ทำให้ Inclusion Complex มีความเสถียรสูงที่สุดในบรรดากลุ่มสารทั้งหมด (ดูภาพที่ 4.17)

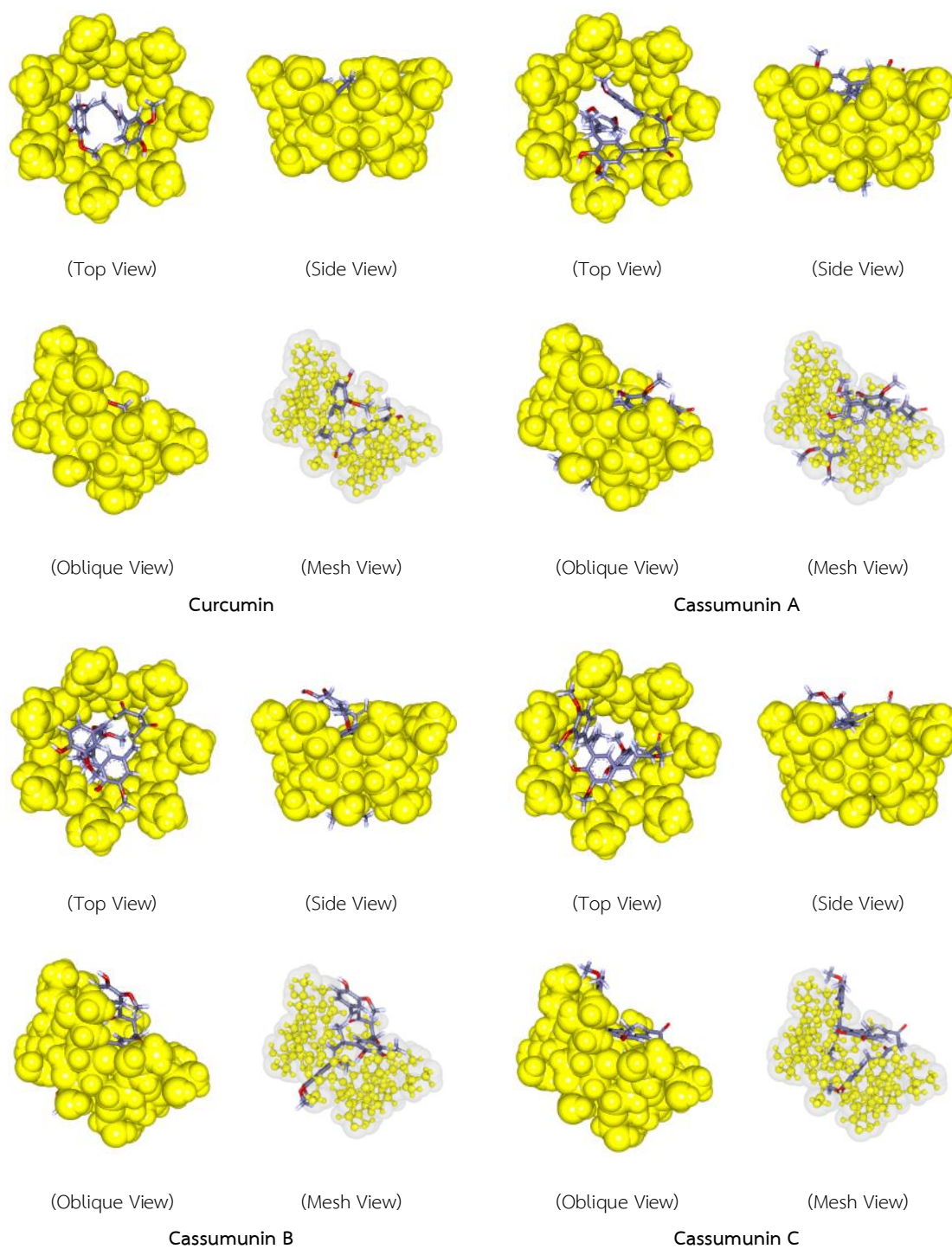
กลุ่ม Terpenoids พบว่า Zerumbone (-5.1 kcal/mol) มีค่าพลังงานยึดเหนี่ยวต่ำที่สุดในกลุ่ม Terpenoids ภาพสามมิติแสดงให้เห็นว่า Zerumbone สามารถเข้ากับ cavity ได้อย่างเหมาะสม โดยวงแหวนไฮโดรคาร์บอนของ Zerumbone กับพื้นผิวด้านในของ cavity และสร้างแรง Van der Waals ได้ดี สำหรับ Terpinen-4-ol (-3.9 kcal/mol), Sabinene (-3.6 kcal/mol), และ γ -Terpinene (-3.5 kcal/mol) การจับตัวมีความเสถียรในระดับปานกลาง เนื่องจากขนาดโมเลกุลที่

เล็กกว่าทำให้พื้นที่สัมผัสกับ cavity ลดลง ส่งผลให้ปฏิสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นไม่เด่นชัดเท่ากับ Zerumbone (ดูภาพที่ 4.18)

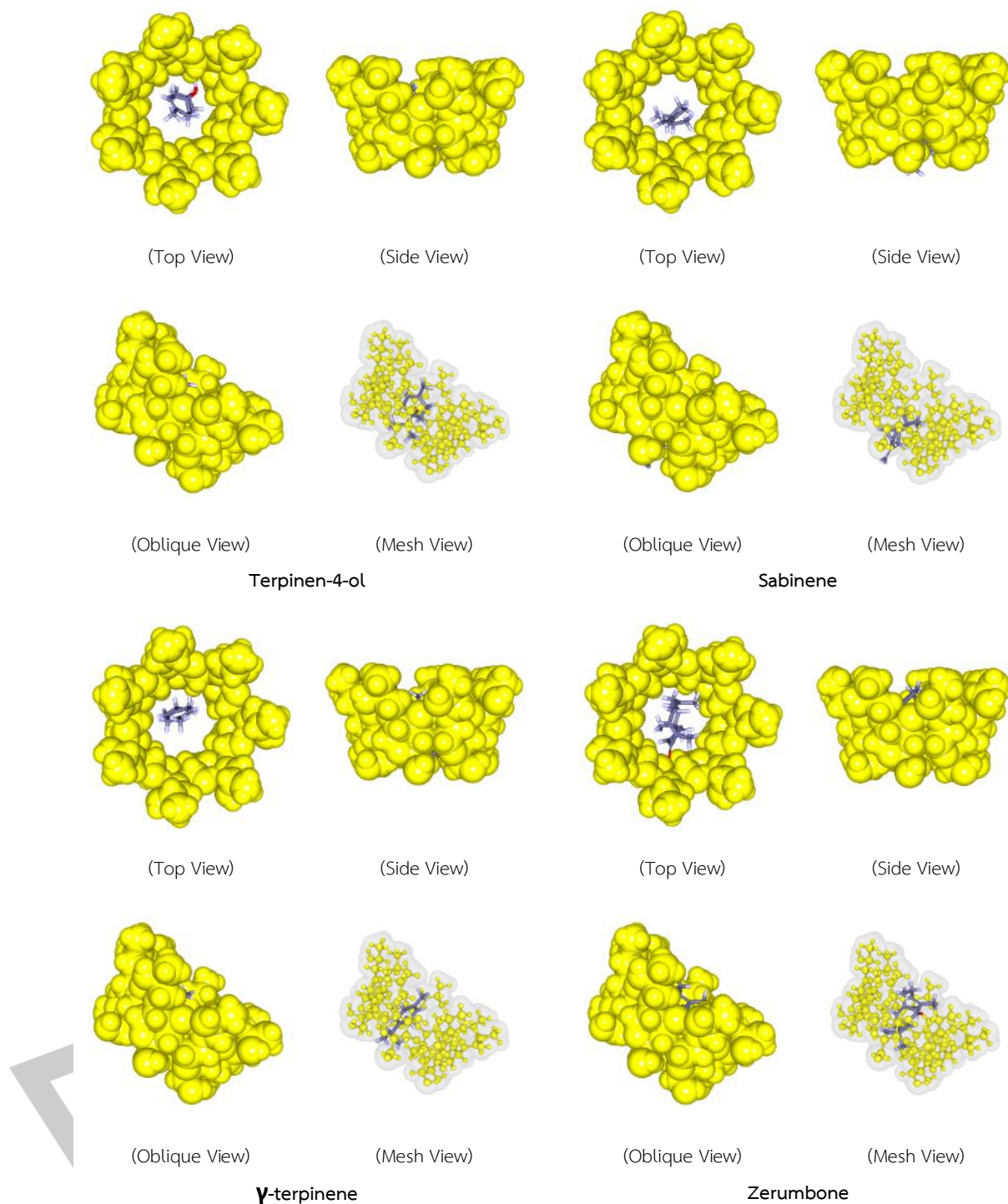


ภาพที่ 4.16 ผลการศึกษา Molecular docking ของ Hydroxypropyl-Beta-Cyclodextrins ร่วมกับสารกลุ่ม

Phenylbutanoids



ภาพที่ 4.17 ผลการศึกษา Molecular docking ของ Hydroxypropyl- Beta-Cyclodextrins ร่วมกับสารกลุ่ม
Curcuminoids



ภาพที่ 4.18 ผลการศึกษา Molecular docking ของ Hydroxypropyl-Beta -beta-Cyclodextrins ร่วมกับสารกลุ่ม

Terpenoids

4.1.4 สรุปผลการวิเคราะห์ Molecular docking

การศึกษาค้นคว้ามุ่งเน้นการประเมินปฏิสัมพันธ์ระหว่าง Cyclodextrins ทดแทน ได้แก่ ACD, BCD, GCD, MBCD, SBEB CD และ HPBCD กับสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากเหง้าโพลในกลุ่ม Phenylbutanoids, Curcuminoids และ Terpenoids โดยใช้โปรแกรม AutoDock Vina วิเคราะห์ค่าพลังงานการจับตัว (Binding Affinity) และตรวจสอบโครงสร้างสามมิติของ Inclusion Complex ที่เกิดขึ้นด้วย Discovery Studio 2021 Client

ประสิทธิภาพของ Cyclodextrins ในการจับกับสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ

● Phenylbutanoids

HPBCD แสดงประสิทธิภาพสูงสุดในกลุ่มนี้ โดยมีค่า Binding Affinity ต่ำสุดที่ -5.8 kcal/mol สำหรับ DMPBDMS ซึ่งสะท้อนถึงการจับตัวที่เสถียรที่สุด โครงสร้างสามมิติแสดงให้เห็นว่า สารสามารถแทรกเข้าสู่ cavity ได้อย่างเหมาะสมและสร้างแรง Van der Waals ที่แข็งแรง

GCD และ SBEB CD แสดงผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกัน โดยมีค่าการจับตัวของ DMPBDMS ที่ -5.4 และ -5.3 kcal/mol ตามลำดับ แสดงถึงการรองรับโครงสร้างของสารกลุ่มนี้ได้ดี

ACD และ BCD มีค่าพลังงานยึดเหนี่ยวสูงขึ้นไปเล็กน้อย แสดงให้เห็นถึงข้อจำกัดในการจับตัวกับสารที่มีโครงสร้างซับซ้อน

● Curcuminoids

HPBCD ให้ค่าการจับตัวต่ำสุดที่ -5.8 kcal/mol สำหรับ Curcumin และ Cassumunin C บ่งชี้ว่าเกิดโครงสร้าง Inclusion Complex ที่มีเสถียรภาพสูงสุด กลุ่มฟังก์ชัน hydroxyl และ keto ของสารเหล่านี้สามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนหลายจุดกับหมู่ hydroxypropyl ของ HPBCD ทำให้การจับตัวยึดแน่นขึ้น

GCD และ MBCD แสดงประสิทธิภาพรองลงมา โดยมีค่าพลังงานใกล้เคียงกัน (-5.7 ถึง -5.6 kcal/mol) สะท้อนถึงศักยภาพในการรองรับโครงสร้าง Curcuminoids ที่มีความซับซ้อน

ACD มีข้อจำกัดมากที่สุดในกลุ่มนี้ เนื่องจาก cavity มีขนาดเล็ก ทำให้ค่า Binding Affinity ของ Cassumunin A และ C สูงขึ้นอย่างชัดเจน

● Terpenoids

HPBCD และ GCD แสดงค่าการจับตัวต่ำสุดในกลุ่มนี้ โดย Zerumbone มีค่าพลังงาน -5.1 และ -5.0 kcal/mol ตามลำดับ ซึ่งบ่งบอกถึงความสามารถในการสร้างโครงสร้าง Inclusion Complex ที่เสถียรที่สุดใน Terpenoids อื่น ๆ เช่น Terpinen-4-ol, Sabinene และ γ -

terpinene มีค่าพลังงานสูงขึ้นเล็กน้อย (-3.9 ถึง -3.5 kcal/mol) เนื่องจากโครงสร้างที่เล็กลงและการสร้างปฏิสัมพันธ์ที่จำกัดภายใน cavity

จากผลการศึกษาพบว่า HPBCD มีประสิทธิภาพดีที่สุดในการบรรจุ Cyclodextrins ทั้งหกชนิด โดยสามารถสร้าง Inclusion Complex ที่มีเสถียรภาพสูงสุดกับสารออกฤทธิ์ทั้งสามกลุ่ม โดยเฉพาะ Curcuminoids และ Phenylbutanoids ซึ่งแสดงค่าพลังงานการจับตัวต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับ Cyclodextrins อื่น ๆ GCD และ MBCD แสดงศักยภาพที่ด้อยลงมา โดยสามารถจับกับสารออกฤทธิ์ได้อย่างเสถียรในหลายกลุ่มสาร โดยเฉพาะใน Curcuminoids อย่างไรก็ตาม BCD และ SBEB CD ยังมีข้อได้เปรียบในบางกรณี เช่น การจับกับ Cassumunin B และ C แต่ในขณะที่ ACD มีข้อจำกัดสูงสุด เนื่องจากขนาดของ cavity ไม่สามารถรองรับสารที่มีโครงสร้างซับซ้อนหรือขนาดใหญ่ได้ดี ส่งผลให้ค่าพลังงานการจับตัวสูงขึ้นในทุกกลุ่มสาร

ข้อมูลที่ได้รับจากการศึกษานี้สามารถนำไปใช้เป็นพื้นฐานในการเลือกชนิดของ Cyclodextrins ที่เหมาะสมสำหรับการพัฒนาสูตรอาหารหรือยาต่อไป โดย HPBCD เป็นตัวเลือกที่โดดเด่นที่สุดเนื่องจากสามารถสร้าง Inclusion Complex ที่มีความเสถียรสูง ส่งเสริมการละลายของสารออกฤทธิ์ และเพิ่มศักยภาพทางชีวภาพของสารเป้าหมายได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลลัพธ์เหล่านี้ยังสามารถนำไปใช้ในการออกแบบการทดลองเพิ่มเติมเพื่อประเมินคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของ Inclusion Complex ที่เกิดขึ้น และศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสารสำคัญในสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ เพื่อการพัฒนาต่อไปในอนาคต



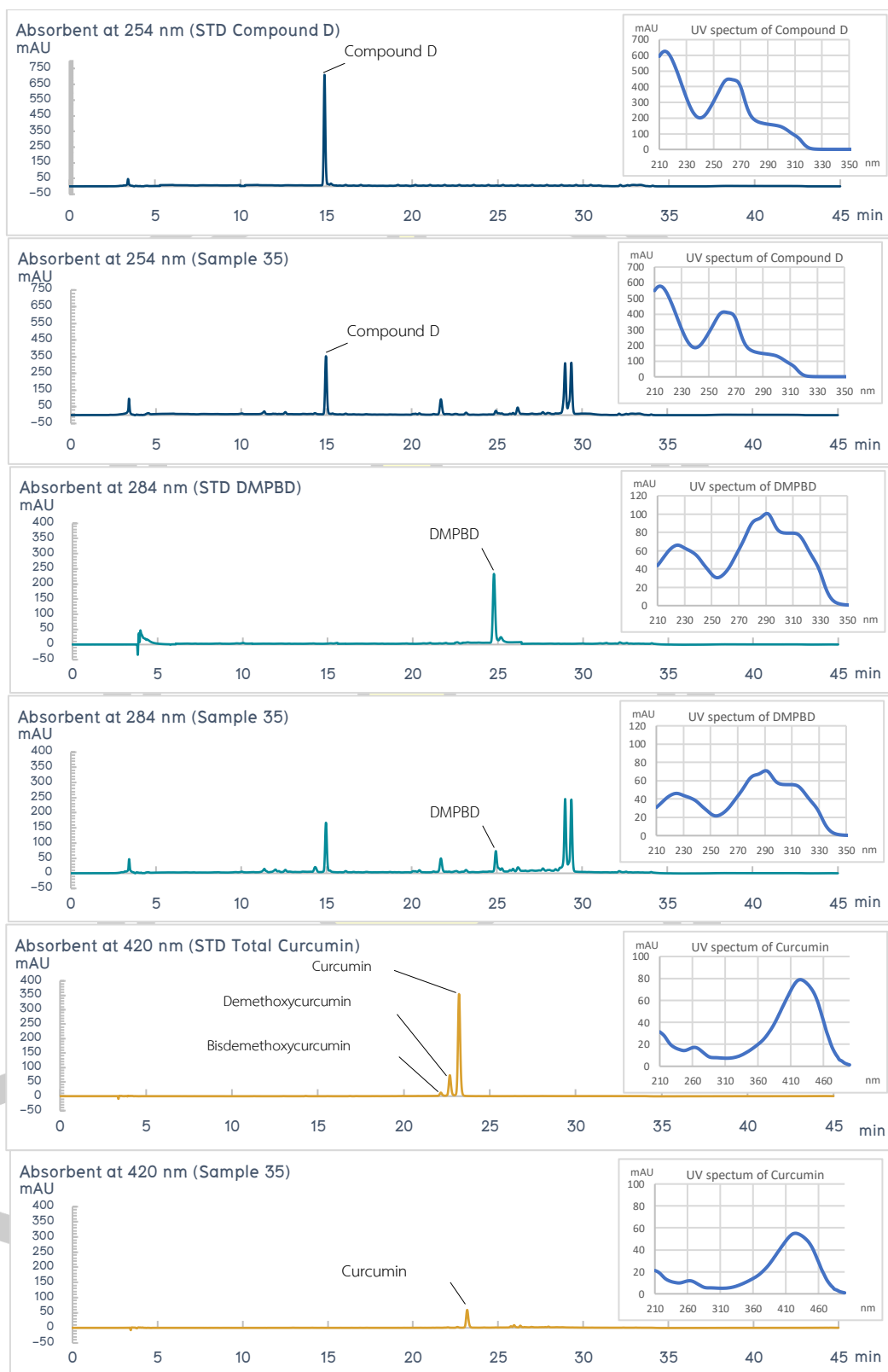
4.2 ผลการศึกษาและค่าการวิเคราะห์ทางสถิติในขั้นตอนการทดลอง Screening study

ในส่วนนี้เป็นการนำเสนอผลการศึกษาศักยภาพของสารสกัดจากเหง้าไพล โดยใช้ D-optimal Design ในการออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาผลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการสกัดสารสำคัญและการทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ การทดลองนี้ถูกแบ่งออกเป็นหัวข้อผลการศึกษาย่อยเพื่อนำเสนอผลการตรวจสอบโมเดลและประสิทธิภาพในการทำนายผลลัพธ์ รวมถึงการวิเคราะห์ความสำคัญของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการสกัดสารสำคัญจากเหง้าไพล ดังนี้

4.2.1 ผลการศึกษาในขั้นตอน Screening study ด้วย D-optimal Design

ผลการทดลองในขั้นตอน Screening Study โดย D-optimal Design ได้รับการนำเสนอในรูปแบบของ ตารางที่ 4.2 ซึ่งแสดงถึงการออกแบบการทดลองที่ใช้ชนิดของ Cyclodextrin (CD) และสารเติมแต่ง (Additive) รวมถึงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ความเข้มข้นของ CD (X3), น้ำหนักเหง้าไพล (X4), เวลาในการสกัด (X5), พลังงานคลื่นอัลตราซาวนด์ (X6), ความเข้มข้นของเอทานอล (X7) และปริมาณสารเติมแต่งที่ใช้ (X8) นอกจากนี้ ยังแสดงค่าผลลัพธ์ที่ได้จากการสกัดสารสำคัญ ซึ่งประกอบด้วย ปริมาณ Compound D (Y1), DMPBD (Y2) และ Curcuminoid content (Y3) ที่วิเคราะห์โดยใช้ High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) ตามที่แสดงใน ภาพที่ 4.19 ในการตรวจสอบสารสำคัญที่สกัดได้ ได้ทำการ เปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน (Reference Standards) โดยใช้ Retention Time (RT) และ UV Spectrum เป็นเกณฑ์ในการยืนยันตัวตนของสารออกฤทธิ์ การเปรียบเทียบค่าของสารที่สกัดได้กับสารมาตรฐานช่วยให้สามารถยืนยันความถูกต้องของการวิเคราะห์ และประเมินปริมาณสารสำคัญในแต่ละตัวอย่างได้อย่างแม่นยำ นอกจากนี้ ยังได้ทำการทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดโดยใช้วิธี DPPH assay (Y4), ABTS assay (Y5), และ FRAP assay (Y6) เพื่อนำไปประเมินศักยภาพทางชีวภาพของสารสกัดที่ได้รับภายใต้เงื่อนไขการทดลองต่างๆ

พหุ ประสิทธิภาพ



ภาพที่ 4.19 โครมาโทแกรมของตัวอย่างสารสกัดจากเหง้าโพลในขั้นตอน Screening study และสารมาตรฐานวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการศึกษาการสกัดสารสำคัญจากฟ้าทะลายโจรเพื่อใช้ในการ Screening ด้วย D-optimal Design

Exp	X1 (Type)	X2 (Type)	X3 (mM)	X4 (g/ml)	X5 (min)	X6 (m)	X7 (%EtOH)	X8 (%Add)	Y1 (µg/ml)	Y2 (µg/ml)	Y3 (µg/ml)	Y4 (µM TE)	Y5 (µM TE)	Y6 (µM TE)
N1	ACD	PEG400	30 (1)	0.04 (1)	10 (-1)	140 (-1)	20 (-1)	5 (-1)	189.165	324.165	48.128	199.420	297.310	686.500
N2	BCD	PEG400	10 (-1)	0.02 (-1)	10 (-1)	140 (-1)	30 (1)	15 (1)	84.055	261.035	70.935	252.855	206.210	620.000
N3	GCD	PEG400	30 (1)	0.02 (-1)	30 (1)	280 (1)	30 (1)	15 (1)	83.715	260.830	62.242	241.205	196.650	665.500
N4	MBCD	PEG400	30 (1)	0.04 (1)	10 (-1)	140 (-1)	20 (-1)	15 (1)	177.260	317.015	80.376	357.170	478.665	833.000
N5	HPBCD	PEG400	10 (-1)	0.02 (-1)	30 (1)	280 (1)	30 (1)	5 (-1)	97.060	268.850	83.990	336.560	381.780	972.000
N6	ACD	Glycerin	10 (-1)	0.02 (-1)	30 (1)	140 (-1)	30 (1)	15 (1)	73.525	254.710	65.656	175.705	286.745	691.500
N7	BCD	Glycerin	30 (1)	0.04 (1)	30 (1)	140 (-1)	20 (-1)	15 (1)	155.480	303.935	76.249	400.720	660.425	996.000
N8	GCD	Glycerin	10 (-1)	0.04 (1)	10 (-1)	280 (1)	20 (-1)	5 (-1)	182.055	319.895	48.985	281.385	573.935	829.000
N9	MBCD	Glycerin	30 (1)	0.02 (-1)	10 (-1)	280 (1)	30 (1)	5 (-1)	91.885	265.740	49.053	194.475	225.770	533.500
N10	SBEBCD	Glycerin	10 (-1)	0.02 (-1)	30 (1)	140 (-1)	30 (1)	15 (1)	66.545	250.520	88.183	256.110	319.220	686.000
N11	ACD	Propylene glycol	10 (-1)	0.02 (-1)	10 (-1)	280 (1)	30 (1)	15 (1)	100.745	271.060	58.445	209.215	420.415	777.000
N12	GCD	Propylene glycol	30 (1)	0.04 (1)	10 (-1)	140 (-1)	30 (1)	15 (1)	182.505	320.165	98.705	394.760	789.445	888.500
N13	MBCD	Propylene glycol	10 (-1)	0.02 (-1)	30 (1)	280 (1)	20 (-1)	5 (-1)	82.335	260.005	49.553	172.480	246.935	714.500
N14	SBEBCD	Propylene glycol	10 (-1)	0.04 (1)	30 (1)	140 (-1)	30 (1)	15 (1)	173.645	314.845	142.500	443.160	914.455	1,142.500
N15	HPBCD	Propylene glycol	30 (1)	0.02 (-1)	30 (1)	140 (-1)	20 (-1)	5 (-1)	76.215	262.335	55.070	268.190	316.335	777.500
N16	ACD	Sorbitol	30 (1)	0.02 (-1)	30 (1)	280 (1)	20 (-1)	15 (1)	63.975	248.975	6.799	145.725	252.530	642.000
N17	BCD	Sorbitol	10 (-1)	0.04 (1)	10 (-1)	280 (1)	30 (1)	5 (-1)	178.445	317.725	81.179	371.535	760.990	988.500
N18	GCD	Sorbitol	10 (-1)	0.02 (-1)	10 (-1)	140 (-1)	20 (-1)	15 (1)	58.770	245.850	13.037	143.635	184.510	391.000
N19	MBCD	Sorbitol	10 (-1)	0.04 (1)	30 (1)	140 (-1)	30 (1)	5 (-1)	171.535	313.580	117.088	331.940	670.895	934.000
N20	SBEBCD	Sorbitol	30 (1)	0.02 (-1)	30 (1)	140 (-1)	20 (-1)	5 (-1)	52.740	239.225	30.914	115.790	128.705	377.000
N21	HPBCD	Sorbitol	30 (1)	0.04 (1)	10 (-1)	280 (1)	30 (1)	15 (1)	194.990	327.665	95.593	540.260	1076.800	1,275.000

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการศึกษาการสกัดสารสำคัญจากเหง้าโพลีขนตอน Screening ด้วย D-optimal Design (ต่อ)

Exp	X1 (Type)	X2 (Type)	X3 (mM)	X4 (g/ml)	X5 (min)	X6 (W)	X7 (%EtOH)	X8 (%Add)	Y1 (µg/ml)	Y2 (µg/ml)	Y3 (µg/ml)	Y4 (µM TE)	Y5 (µM TE)	Y6 (µM TE)
N22	ACD	Tween20	10 (-1)	0.04 (1)	30 (1)	140 (-1)	30 (1)	5 (-1)	189.350	324.280	121.458	317.650	779.045	1137.000
N23	BCD	Tween20	30 (1)	0.02 (-1)	30 (1)	280 (1)	20 (-1)	15 (1)	69.780	252.465	48.332	309.185	346.250	921.000
N24	GCD	Tween20	10 (-1)	0.04 (1)	30 (1)	280 (1)	20 (-1)	5 (-1)	187.970	323.450	79.906	343.385	725.595	1125.000
N25	MBCD	Tween20	10 (-1)	0.02 (-1)	10 (-1)	140 (-1)	20 (-1)	15 (1)	89.530	264.325	57.323	259.115	314.695	709.000
N26	SBEB CD	Tween20	30 (1)	0.02 (-1)	10 (-1)	280 (1)	30 (1)	5 (-1)	90.750	265.060	64.488	246.140	346.755	689.500
N27	HPBCD	Tween20	30 (1)	0.04 (1)	10 (-1)	140 (-1)	30 (1)	15 (1)	209.500	336.380	130.533	541.145	1132.750	1365.000
N28	BCD	Tween80	30 (1)	0.02 (-1)	10 (-1)	140 (-1)	30 (1)	5 (-1)	89.060	258.035	66.465	324.150	398.245	793.000
N29	GCD	Tween80	30 (1)	0.02 (-1)	30 (1)	140 (-1)	30 (1)	5 (-1)	84.125	261.080	74.273	280.025	339.980	776.500
N30	MBCD	Tween80	30 (1)	0.04 (1)	30 (1)	280 (1)	30 (1)	15 (1)	200.765	331.135	134.271	565.450	1160.360	1520.000
N31	SBEB CD	Tween80	10 (-1)	0.04 (1)	10 (-1)	280 (1)	20 (-1)	15 (1)	193.085	326.520	97.440	505.495	1072.910	1381.000
N32	HPBCD	Tween80	10 (-1)	0.02 (-1)	10 (-1)	140 (-1)	20 (-1)	15 (1)	99.170	270.115	70.513	441.640	762.200	1150.500
N33	HPBCD	Tween80	20 (0)	0.03 (0)	20 (0)	210 (0)	25 (0)	10 (0)	169.680	304.655	107.914	546.855	1050.180	1478.500
N34	HPBCD	Tween80	20 (0)	0.03 (0)	20 (0)	210 (0)	25 (0)	10 (0)	154.175	306.155	96.094	525.035	1008.650	1445.990
N35	HPBCD	Tween80	20 (0)	0.03 (0)	20 (0)	210 (0)	25 (0)	10 (0)	160.090	311.810	100.914	553.365	1091.830	1408.450

หมายเหตุ: X1; ชนิดของโพลีเอ็กส์ทริกชัน, X2; ชนิดของสารเติมแต่ง, X3; ความเข้มข้นของโพลีเอ็กส์ทริกชัน (10-30 mM), X4; น้ำหนักของเหง้าโพลี (0.02-0.04 g/mL), X5; เวลาในการสกัด (10-30 นาที), X6; พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (140-280 W), X7; ความเข้มข้นของเอทานอล (20-30% w/w), X8; ความเข้มข้นของสารเติมแต่ง (5-15% w/w), Y1; ปริมาณ Compound D (µg/mL), Y2; ปริมาณ DMPBD (µg/mL), Y3; ปริมาณ Curcuminoid content (µg/mL), Y4; การต้านออกซิเดชันโดย DPPH assay (µM TE), Y5; การต้านออกซิเดชันโดย ABTS assay (µM TE), Y6; การต้านออกซิเดชันโดย FRAP assay (µM TE)

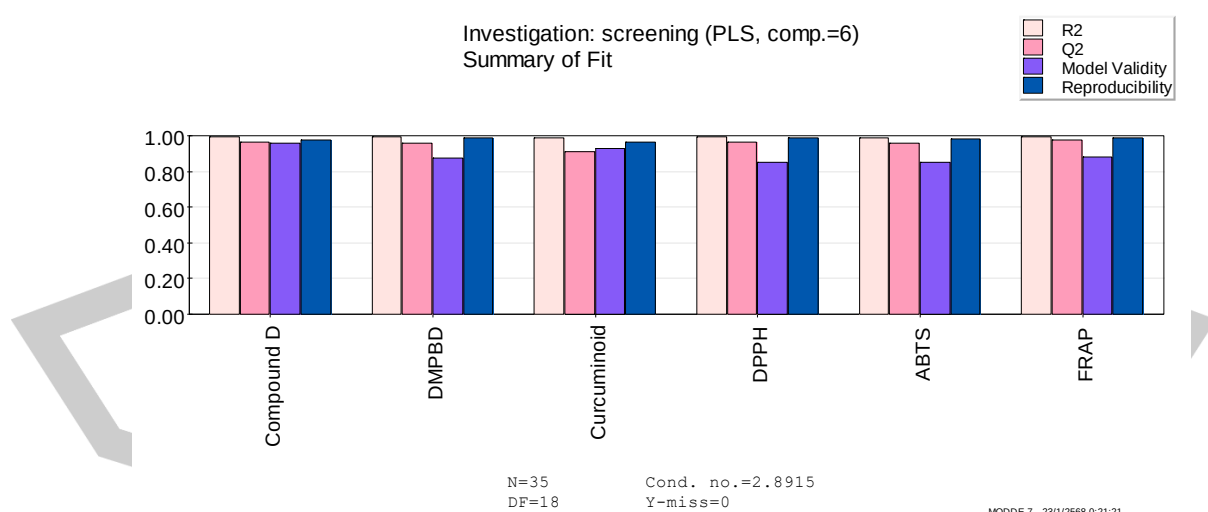
4.2.2 การตรวจสอบโมเดล (Model Validation)

การตรวจสอบโมเดลในขั้นตอน Screening ด้วย D-optimal Design จะพิจารณาค่าทางสถิติเพื่อประเมินคุณภาพและความน่าเชื่อถือของโมเดลที่ได้จากการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและผลลัพธ์ ซึ่งรวมถึงค่าทางสถิติที่สำคัญ ได้แก่ R^2 , Q^2 , Residual Standard Deviation (RSD), Lack of Fit Test, และการวิเคราะห์กราฟ Residuals ที่ได้จากการทดสอบ โดยมีรายละเอียดการประเมินโมเดลดังนี้

1. ค่าความถดถอย R^2 และค่าคาดการณ์ Q^2

- **ค่า R^2 (Coefficient of Determination)** บ่งชี้ถึงความสามารถของโมเดลในการอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลในกลุ่มข้อมูลที่ใช้เป็นโมเดล ยิ่งค่า R^2 ใกล้ 1 หมายถึงโมเดลสามารถอธิบายข้อมูลได้มากขึ้น โดยในกรณีนี้ โมเดลที่ได้มีค่า R^2 สำหรับแต่ละตัวแปร ซึ่งประกอบด้วยปริมาณ Compound D, DMPBD, และ Curcuminoid content โดยวิธีการวิเคราะห์ HPLC รวมไปถึงการทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH, ABTS, และ FRAP assay อยู่ในช่วงสูงประมาณ 0.98-0.99 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโมเดลมีความเหมาะสมกับข้อมูลทดลอง (ภาพที่ 4.20)

- **ค่า Q^2 (Predictive Ability)** ใช้ในการประเมินความสามารถของโมเดลในการคาดการณ์ค่าที่ไม่ได้อยู่ในข้อมูลที่ใช้สร้างโมเดล ค่า Q^2 ที่ใกล้เคียงกับค่า R^2 บ่งบอกถึงความน่าเชื่อถือในการพยากรณ์ โดยค่า Q^2 ที่ได้สำหรับการวัดต่าง ๆ มีค่าใกล้เคียงกับ R^2 ซึ่งยืนยันว่าโมเดลสามารถคาดการณ์ได้ดี (ภาพที่ 4.20)



ภาพที่ 4.20 กราฟ Summary of Fit แสดงผลค่า R^2 และ Q^2 สำหรับแต่ละตัวแปร

2. Residual Standard Deviation (RSD)

Residual Standard Deviation (RSD) เป็นตัวชี้วัดที่สำคัญในการประเมินความเหมาะสมของโมเดล โดยแสดงถึงความเบี่ยงเบนเฉลี่ยของค่า residuals หรือค่าความผิดพลาดจากการทำนาย

ของโมเดลเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่สังเกตได้จริง ในงานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์ค่า RSD สำหรับตัวแปรต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.3 โดยผลการวิเคราะห์สามารถสรุปได้ดังนี้

ตารางที่ 4.3 แสดง Model Validation Summary

Parameters	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6
N	35	35	35	35	35	35
R ²	0.993641	0.992532	0.987179	0.992243	0.990227	0.993450
Q ²	0.964184	0.961272	0.911375	0.963858	0.959749	0.975953
RSD	1.154040	0.754043	0.989628	3.218600	9.001730	6.90965

Y1 (Compound D) ค่า RSD สำหรับ Compound D เท่ากับ 1.1540 แสดงว่าโมเดลมีความแม่นยำในระดับที่เหมาะสมสำหรับการทำนายค่าปริมาณ Compound D แม้ว่าค่าความเบี่ยงเบนจะสูงกว่าตัวแปรอื่น ๆ ในกลุ่มของสารวัดปริมาณสารสำคัญเล็กน้อย ซึ่งอาจเกิดจากความซับซ้อนของกระบวนการสกัดหรือความแปรปรวนจากเครื่องมือที่ใช้วัดผล

Y2 (DMPBD) ค่า RSD เท่ากับ 0.7540 ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำ แสดงถึงความแม่นยำสูงของโมเดลในการทำนายปริมาณ DMPBD โดยค่า residuals มีการกระจายตัวใกล้เคียงกับค่าที่สังเกตได้

Y3 (Curcuminoid Content) ค่า RSD เท่ากับ 0.9896 เป็นค่าที่ต่ำพอสมควร ซึ่งบ่งชี้ว่าโมเดลสามารถทำนายค่าปริมาณสาร curcuminoids ได้อย่างแม่นยำและสอดคล้องกับค่าที่วัดได้จริง

Y4 (DPPH Assay) ค่า RSD เท่ากับ 3.2186 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโมเดลมีความแม่นยำในระดับปานกลางในการทำนายค่าการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH โดยค่าเบี่ยงเบนดังกล่าวอาจมาจากความแปรปรวนในการทำปฏิกิริยาของอนุมูลอิสระในกระบวนการวิเคราะห์

Y5 (ABTS Assay) ค่า RSD เท่ากับ 9.0017 ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่ค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับตัวแปรอื่น ๆ แสดงถึงความแปรปรวนมากในกระบวนการวัดค่าการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี ABTS โดยสาเหตุอาจมาจากความซับซ้อนของปฏิกิริยาเคมีหรือข้อจำกัดในการควบคุมสภาวะการทดลอง

Y6 (FRAP Assay) ค่า RSD เท่ากับ 6.9097 ซึ่งอยู่ในระดับปานกลางถึงสูง บ่งชี้ว่าโมเดลสามารถทำนายค่าฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี FRAP ได้ในระดับที่ยอมรับได้ แต่ยังคงมีค่าความเบี่ยงเบนที่ต้องพิจารณา

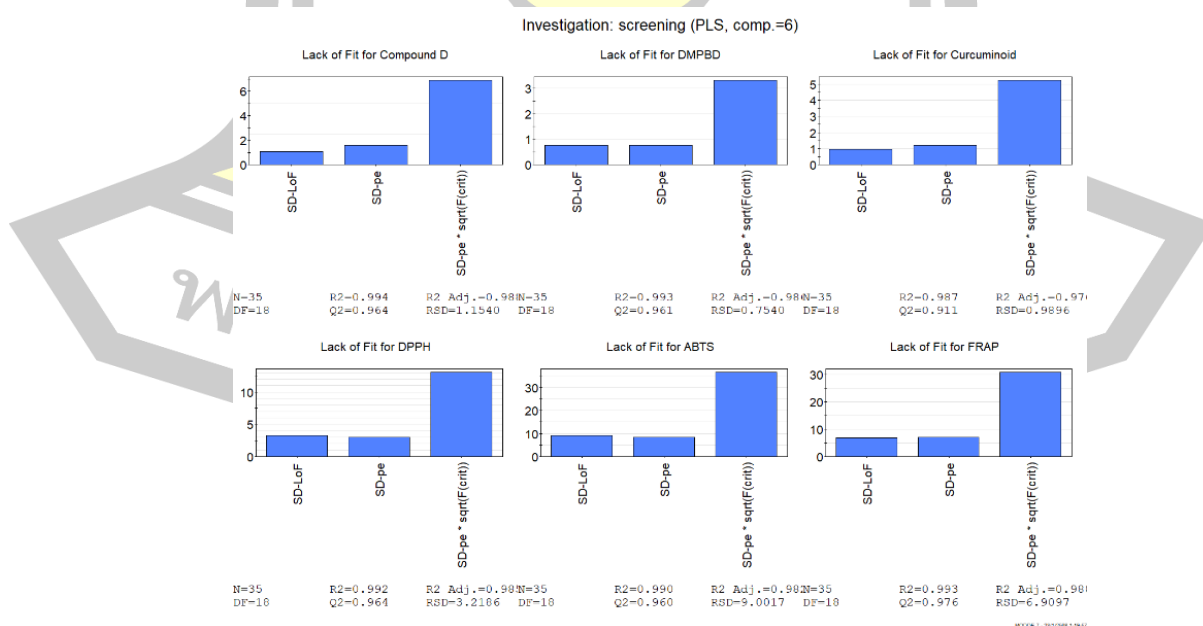
เปรียบเทียบความแม่นยำของโมเดลโดยรวม เมื่อพิจารณาค่า RSD ของตัวแปรทั้งหมดพบว่า ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับ ปริมาณสารสำคัญ (Y1–Y3) มีค่า RSD ต่ำกว่า 1 ยกเว้น Y1 (Compound D) ที่มีค่า RSD สูงกว่าตัวแปรอื่นเพียงเล็กน้อย ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับ ฤทธิ์ต้านอนุมูล

อิสระ (Y4–Y6) มีค่า RSD สูงกว่า โดยเฉพาะ ABTS assay (Y5) ซึ่งมีค่าความเบี่ยงเบนสูงที่สุดในกลุ่ม อาจแสดงถึงความไวต่อปัจจัยแวดล้อมของวิธีวิเคราะห์นี้

ค่า RSD ที่ได้จากการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าโมเดลสามารถทำนายค่าที่สังเกตได้ใกล้เคียงกับค่าที่วัดจริง โดยมีความแม่นยำในระดับที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับตัวแปรและกระบวนการทดลอง ค่า RSD ต่ำในตัวแปรบางตัว เช่น DMPBD (Y2) และ Curcuminoid Content (Y3) บ่งชี้ถึงความน่าเชื่อถือของโมเดล ส่วนตัวแปรที่มีค่า RSD สูงกว่า เช่น ABTS assay (Y5) แสดงถึงข้อจำกัดบางประการที่ควรนำไปพิจารณาเพื่อปรับปรุงกระบวนการทดลองในอนาคต

3. Lack of Fit (LOF) Analysis

การวิเคราะห์ Lack of Fit (LOF) เป็นขั้นตอนสำคัญในการตรวจสอบว่าโมเดลที่พัฒนาขึ้นสามารถอธิบายข้อมูลการทดลองได้ดีเพียงพอรึหรือไม่ โดยเปรียบเทียบค่าที่โมเดลทำนายได้กับค่าที่สังเกตจริง การวิเคราะห์นี้พิจารณาค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของ Lack of Fit (SD. LOF), ความเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความผิดพลาดแท้จริง (SD of PE) และค่า $Sp = \sqrt{F_{crit}}$ ซึ่งแต่ละค่านี้มีความสำคัญในการประเมินความเหมาะสมของโมเดล หากค่า SD. LOF ต่ำกว่าค่า Sp หมายความว่าโมเดลไม่มีปัญหา Lack of Fit และสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในการศึกษาครั้งนี้ ได้ทำการวิเคราะห์ LOF สำหรับตัวแปรผลตอบแทนทั้งหมด 6 ตัว ได้แก่ ปริมาณ Compound D (Y1), ปริมาณ DMPBD (Y2), ปริมาณ Curcuminoid รวม (Y3), ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH (Y4), ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ABTS (Y5) และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ FRAP (Y6) ผลการวิเคราะห์แสดงในภาพที่ 4.21 และตารางที่ ซึ่งแสดงรายละเอียดของแต่ละตัวแปรดังต่อไปนี้



ภาพที่ 4.21 กราฟ Lack of Fit แสดงถึงการประเมินค่าการทดสอบสำหรับแต่ละตัวแปร

สำหรับตัวแปร Compound D (Y1) ผลการวิเคราะห์ LOF ชี้ให้เห็นว่าโมเดลที่พัฒนาขึ้นสามารถทำนายค่าปริมาณ Compound D ได้อย่างแม่นยำ ค่า SD. LOF ที่คำนวณได้เท่ากับ 5.459 ซึ่งต่ำกว่าค่า Sp ที่มีค่าเท่ากับ 7.824 บ่งชี้ว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างค่าที่ทำนายและค่าที่วัดได้จริง ค่า p-value จากการวิเคราะห์ LOF เท่ากับ 0.839 ซึ่งสูงกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 อย่างมาก แสดงให้เห็นว่าโมเดลสามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในกรณีของตัวแปร DMPBD (Y2) ผลการวิเคราะห์ LOF ระบุว่าโมเดลมีความแม่นยำสูงในการทำนายค่าปริมาณ DMPBD ค่า SD. LOF เท่ากับ 3.770 ซึ่งต่ำกว่าค่า Sp ที่มีค่าเท่ากับ 3.773 และค่า p-value เท่ากับ 0.611 ซึ่งสูงกว่าระดับนัยสำคัญ แสดงว่าโมเดลสามารถอธิบายข้อมูลได้อย่างครบถ้วน โดยไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างค่าที่ทำนายและค่าที่สังเกตจริง

สำหรับตัวแปรปริมาณ Curcuminoid content (Y3) ผลการวิเคราะห์ LOF แสดงว่าโมเดลมีความเหมาะสมในการทำนายค่าปริมาณ Curcuminoid ค่า SD. LOF เท่ากับ 4.809 ซึ่งต่ำกว่าค่า Sp ที่มีค่าเท่ากับ 5.943 และค่า p-value เท่ากับ 0.753 แสดงให้เห็นว่าโมเดลสามารถทำนายค่าปริมาณสารสำคัญได้อย่างแม่นยำ โดยไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างค่าที่ทำนายและค่าที่วัดได้จริง

สำหรับตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ เริ่มจาก DPPH Assay (Y4) ผลการวิเคราะห์ LOF แสดงให้เห็นว่าโมเดลสามารถทำนายค่าการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH ได้ดี ค่า SD. LOF เท่ากับ 16.243 ซึ่งสูงกว่าค่า Sp ที่มีค่าเท่ากับ 14.838 และค่า p-value สำหรับการวิเคราะห์ LOF เท่ากับ 0.548 ซึ่งสูงกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ยืนยันว่าโมเดลไม่มีปัญหา Lack of Fit ในการทำนายค่าตัวแปรนี้

สำหรับ ABTS Assay (Y5) ผลการวิเคราะห์ LOF แสดงว่าโมเดลมีความเหมาะสมอย่างมากในการทำนายค่าฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี ABTS ค่า SD. LOF เท่ากับ 45.418 ซึ่งสูงกว่าค่า Sp ที่มีค่าเท่ากับ 41.590 และค่า p-value เท่ากับ 0.550 ซึ่งสูงกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างค่าที่ทำนายและค่าที่วัดได้จริง

สุดท้าย สำหรับ FRAP Assay (Y6) ผลการวิเคราะห์ LOF ยืนยันว่าโมเดลมีความเหมาะสมในระดับสูง ค่า SD. LOF เท่ากับ 34.484 ซึ่งต่ำกว่าค่า Sp ที่มีค่าเท่ากับ 35.055 และค่า p-value สำหรับ LOF เท่ากับ 0.622 ซึ่งสูงกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงให้เห็นว่าโมเดลสามารถทำนายค่าฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระจาก FRAP ได้อย่างแม่นยำ โดยไม่มีปัญหา Lack of Fit

จากผลการวิเคราะห์ LOF สำหรับตัวแปรทั้ง 6 ตัว พบว่า ค่า SD. LOF ของแต่ละตัวแปรส่วนใหญ่ต่ำกว่าหรือใกล้เคียงกับค่า Sp ซึ่งหมายความว่าโมเดลไม่มีปัญหา Lack of Fit ในการอธิบายความแปรปรวนของข้อมูล นอกจากนี้ ค่า p-value ที่สูงกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ในทุกตัวแปรช่วยยืนยันว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างค่าที่ทำนายและค่าที่วัดได้จริง ดังนั้นสามารถสรุป

ได้ว่าโมเดล PLS ที่พัฒนาขึ้นมีความเหมาะสมสูงในการทำนายข้อมูล ทั้งในแง่ของปริมาณสารสำคัญ (Compound D, DMPBD, Curcuminoid content และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ (DPPH, ABTS, FRAP) โดยไม่มีปัญหา Lack of Fit

4. Residuals Analysis

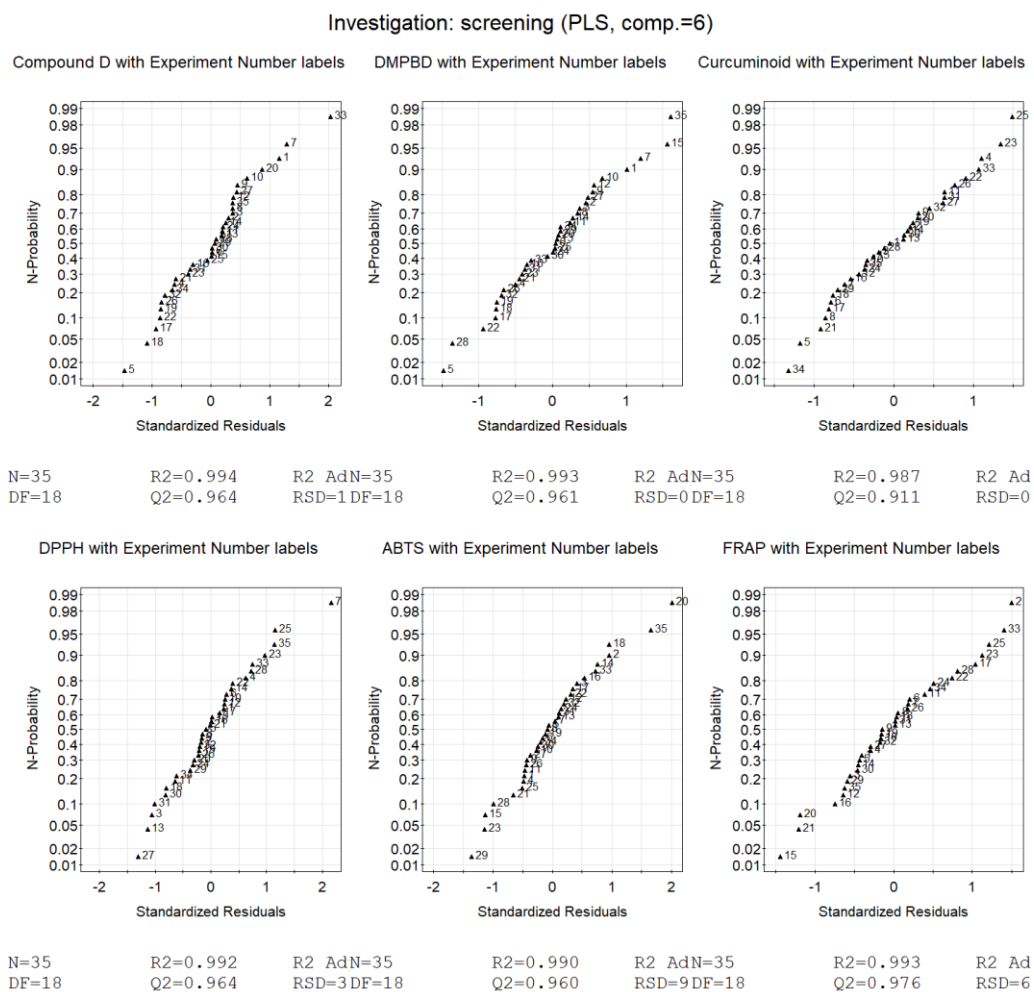
การวิเคราะห์ Residuals เป็นกระบวนการสำคัญในการประเมินคุณภาพและความเหมาะสมของโมเดลเชิงสถิติ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานวิจัยนี้ที่ใช้โมเดล Partial Least Squares (PLS) การวิเคราะห์ Residuals มีบทบาทสำคัญในการตรวจสอบว่าโมเดลสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพหรือไม่ อีกทั้งยังช่วยระบุรูปแบบของข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้น (Residuals) ซึ่งอาจบ่งชี้ถึงปัญหาความไม่เหมาะสมของโมเดล

Residuals คือค่าความแตกต่างระหว่างค่าที่สังเกตได้จริง (Observed Values) และค่าที่คาดการณ์โดยโมเดล (Predicted Values) หากโมเดลมีความแม่นยำเพียงพอ Residuals ที่ได้ควรมีลักษณะเป็นแบบสุ่ม (Random Error) และไม่มีรูปแบบใด ๆ ที่ชัดเจน การวิเคราะห์ Residuals ประกอบด้วยหลายส่วนสำคัญ ได้แก่ N-Probability Plot ของ Standardized Residuals, Residuals compared to Predicted Y Plot, Residuals compared to Run Order Plot และ Residuals compared to Variable Plot โดยในหัวข้อนี้จะเริ่มต้นจากการอธิบาย N-Probability Plot ของ Standardized Residuals

การวิเคราะห์ N-Probability Plot ของ Standardized Residuals

ในส่วนของ N-Probability Plot ของ Standardized Residuals ถูกใช้เพื่อตรวจสอบว่าข้อผิดพลาด (Residuals) ที่เกิดจากโมเดลมีการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution) หรือไม่ โดยกราฟนี้เปรียบเทียบค่าความน่าจะเป็นสะสม (Cumulative Probability) ของ Standardized Residuals กับการแจกแจงแบบปกติ จากผลการวิเคราะห์ N-Probability Plot ของ Standardized Residuals สำหรับตัวแปรแต่ละตัว แสดงในภาพที่ 4.22 พบข้อมูลดังนี้

พหุ ประสิทธิภาพ



ภาพที่ 4.22 กราฟ N-Probability Plot ของ Standardized Residuals

สำหรับตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับปริมาณสารสำคัญที่สกัดได้แสดงให้เห็นว่า Compound D (Y1) Residuals ของ Compound D มีการเรียงตัวใกล้เคียงกับเส้นทแยงมุมในกราฟ N-Probability Plot อย่างมาก แสดงให้เห็นว่าข้อผิดพลาดมีการกระจายตัวแบบปกติ ซึ่งเป็นเครื่องยืนยันว่าโมเดลสามารถทำนายค่าปริมาณ Compound D ได้อย่างแม่นยำโดยไม่ข้อผิดพลาดที่เป็นระบบ ในกรณีของ DMPBD (Y2) Residuals สำหรับตัวแปรนี้ก็แสดงลักษณะที่สอดคล้องกับการแจกแจงแบบปกติ โดยจุดในกราฟเรียงตัวใกล้เคียงกับเส้นทแยงมุม ซึ่งสะท้อนว่าโมเดลมีความเหมาะสมในการทำนายค่าปริมาณ DMPBD และสามารถอธิบายค่าที่สังเกตได้จริงอย่างน่าเชื่อถือ สำหรับ Curcuminoid Content (Y3) Residuals ที่เกิดจากการทำนายค่าปริมาณ Curcuminoid Content แสดงพฤติกรรมที่สอดคล้องกับการกระจายตัวแบบปกติ โดยไม่มีจุดใดที่เบี่ยงเบนออกจากเส้นทแยงมุมอย่างเห็นได้ชัด สิ่งนี้ช่วยยืนยันว่าโมเดลมีความเหมาะสมสูงและไม่มีปัญหาเกี่ยวกับข้อผิดพลาดที่เป็นระบบ

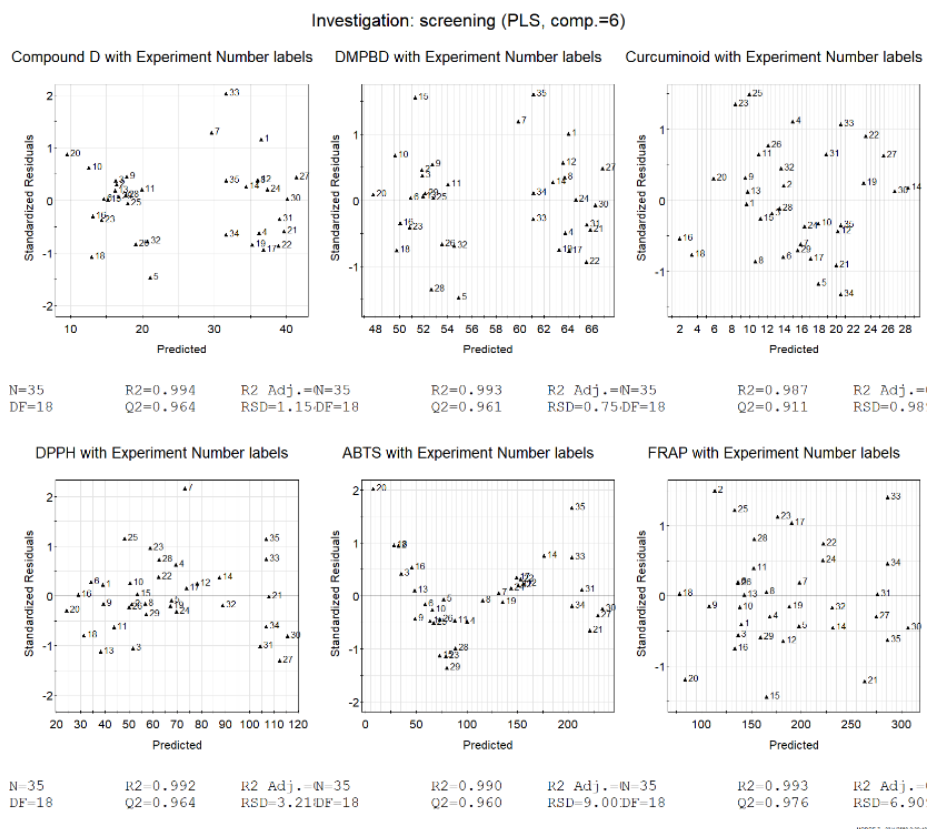
ในส่วนของการฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH Assay (Y4) Residuals ที่ได้จากการวิเคราะห์ แสดงให้เห็นว่าจุดส่วนใหญ่เรียงตัวอยู่ใกล้เส้นทแยงมุมในกราฟ แม้ว่าจะมีจุดบางส่วนเบี่ยงเบน เล็กน้อย แต่โดยรวมการกระจายตัวของข้อผิดพลาดยังถือว่าเป็นไปในลักษณะปกติ แสดงว่าโมเดล สามารถอธิบายค่าการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH ได้อย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับ ABTS Assay (Y5) Residuals ของตัวแปร ABTS Assay มีการเรียงตัวใกล้เคียงกับเส้นทแยงมุมอย่างสม่ำเสมอ บ่งชี้ว่าการกระจายตัวของข้อผิดพลาดมีลักษณะเป็นแบบปกติ สิ่งนี้แสดงว่าโมเดลสามารถทำนายค่าฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี ABTS ได้อย่างแม่นยำ สุดท้ายคือ FRAP Assay (Y6) Residuals สำหรับ FRAP Assay แสดงให้เห็นการเรียงตัวที่ใกล้เส้นทแยงมุมโดยไม่มีควมเบี่ยงเบนอย่างชัดเจน แสดงว่าโมเดลมีความเหมาะสมสูงสำหรับการทำนายค่าการต้านอนุมูลอิสระจาก FRAP

จากการวิเคราะห์ N-Probability Plot ของ Standardized Residuals สำหรับตัวแปรทั้ง 6 ตัว พบว่าข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นในโมเดลมีการกระจายตัวแบบปกติในทุกตัวแปร โดย Residuals ส่วนใหญ่เรียงตัวใกล้เคียงกับเส้นทแยงมุมในกราฟ ซึ่งช่วยยืนยันว่าโมเดล Partial Least Squares (PLS) ที่ใช้ในงานวิจัยมีความแม่นยำและเหมาะสมสำหรับการทำนายค่าต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับปริมาณสารสำคัญและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระจากเหง้าพล ผลการวิเคราะห์ Residuals นี้แสดงถึงข้อผิดพลาดที่เป็นแบบสุ่ม (Random Error) และไม่มีรูปแบบผิดปกติที่ชัดเจน ซึ่งสะท้อนถึงคุณภาพของโมเดลที่ดี และเป็นพื้นฐานที่สำคัญสำหรับการตรวจสอบเพิ่มเติมในส่วนของการวิเคราะห์ Residuals compared to Predicted Y Plot, Residuals compared to Run Order Plot และ Residuals compared to Variable Plot ที่จะช่วยให้เข้าใจลักษณะข้อผิดพลาดของโมเดลในแง่มุมอื่น ๆ อย่างละเอียดต่อไป

การวิเคราะห์ Residuals compared to Predicted Y Plot

Residuals compared to Predicted Y Plot เป็นเครื่องมือสำคัญที่ใช้ในการตรวจสอบความเหมาะสมของโมเดล โดยเฉพาะในแง่ของการกระจายตัวของ Residuals เมื่อเทียบกับค่าที่คาดการณ์ (Predicted Y) กราฟนี้ช่วยประเมินว่าโมเดลสามารถอธิบายข้อมูลได้อย่างสม่ำเสมอหรือไม่ โดยเน้นไปที่การพิจารณาว่า Residuals มีการกระจายตัวแบบสุ่มหรือไม่

การกระจายตัวของ Residuals ในกราฟนี้ควรมีลักษณะเป็นแบบสุ่มรอบค่าศูนย์ (Random Distribution around Zero) หาก Residuals มีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอและไม่แสดงรูปแบบ (Patterns) ใดๆ จะบ่งชี้ว่าโมเดลไม่มีความเอนเอียง (Bias) และสามารถอธิบายข้อมูลได้ดี อย่างไรก็ตาม หากมีรูปแบบการกระจายตัวของ Residuals เช่น การกระจุกตัวในบางพื้นที่ การเบี่ยงเบนอย่างเป็นระบบ หรือความแปรปรวนที่เพิ่มขึ้นหรือลดลง อาจบ่งบอกถึงปัญหา เช่น การละเลยตัวแปรสำคัญในโมเดล หรือความไม่เหมาะสมของฟังก์ชันที่ใช้สร้างโมเดล โดยรายละเอียดของการวิเคราะห์ถูกแสดงในภาพที่ 4.23



ภาพที่ 4.23 กราฟ Residuals compared to Predicted Y Plot

สำหรับตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการวัดค่าปริมาณสารสำคัญที่พบในสารสกัด Compound D (Y1) กราฟ Residuals compared to Predicted Y Plot แสดงให้เห็นว่า Residuals มีการกระจายตัวแบบสุ่มรอบค่าศูนย์ ไม่มีรูปแบบที่ชัดเจนหรือการกระจุกตัวในบางพื้นที่ ซึ่งบ่งชี้ว่าโมเดลสามารถทำนายค่าปริมาณ Compound D ได้อย่างเหมาะสม โดยข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นเป็นแบบสุ่ม ในกรณีของ DMPBD (Y2) Residuals ของตัวแปรนี้แสดงการกระจายตัวแบบสุ่มรอบค่าศูนย์ เช่นเดียวกัน โดยไม่มีจุดที่บ่งชี้ถึงความผิดปกติหรือรูปแบบเฉพาะใด ๆ การกระจายตัวที่เป็นแบบสุ่มนี้แสดงว่าโมเดลสามารถทำนายค่าปริมาณ DMPBD ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และไม่มีปัญหาในแง่ของการอธิบายความแปรปรวนของข้อมูล สำหรับ Curcuminoid Content (Y3) กราฟ Residuals compared to Predicted Y Plot แสดงให้เห็นว่า Residuals มีการกระจายตัวแบบสุ่มและสม่ำเสมอรอบค่าศูนย์ โดยไม่มีการกระจุกตัวหรือรูปแบบที่ชัดเจน ซึ่งเป็นสิ่งที่ยืนยันได้ว่าโมเดลสามารถทำนายค่าปริมาณ Curcuminoid Content ได้ดี

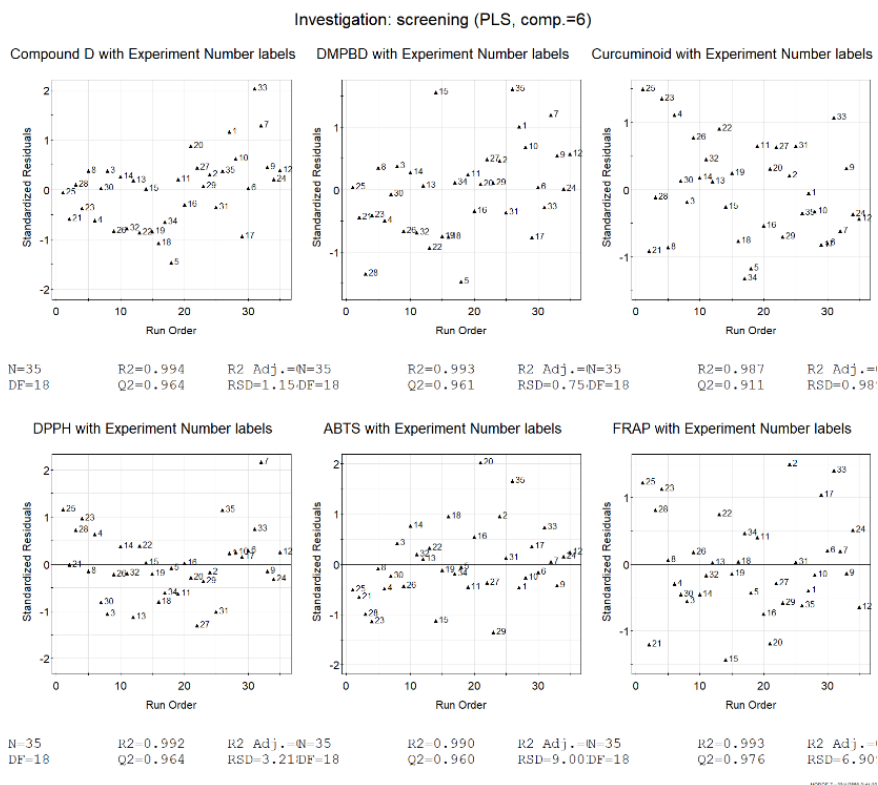
ในส่วนการวัดฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ค่า DPPH Assay (Y4) Residuals จากการทำนายค่าการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH มีการกระจายตัวรอบค่าศูนย์ แม้ว่าจะมีการกระจายตัวที่ดูเหมือน

แปรปรวนมากขึ้นเล็กน้อยในบางบริเวณ (ช่วงค่าที่คาดการณ์สูง) แต่โดยรวมการกระจายตัวยังถือว่าเป็นแบบสุ่ม ซึ่งสะท้อนว่าโมเดลมีความเหมาะสมสำหรับการทำนายค่าการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธีนี้สำหรับ ABTS Assay (Y5) Residuals มีการกระจายตัวรอบค่าศูนย์อย่างสม่ำเสมอ โดยไม่มีรูปแบบที่ชัดเจน เช่น การกระจุกตัวหรือความแปรปรวนที่เพิ่มขึ้นหรือลดลง ซึ่งบ่งชี้ว่าโมเดลสามารถทำนายค่าการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี ABTS ได้อย่างแม่นยำ สุดท้ายคือ FRAP Assay (Y6) Residuals ที่เกิดขึ้นมีลักษณะการกระจายตัวแบบสุ่มรอบค่าศูนย์ในลักษณะเดียวกับตัวแปรอื่น ๆ การไม่มีรูปแบบเฉพาะหรือการกระจุกตัวในกราฟนี้ยืนยันว่าโมเดลสามารถทำนายค่าการต้านอนุมูลอิสระจาก FRAP ได้ดี

จากการวิเคราะห์กราฟ Residuals compared to Predicted Y Plot สำหรับตัวแปรทุกตัว ได้แก่ Compound D, DMPBD, Total Curcuminoid Content, DPPH, ABTS และ FRAP พบว่า Residuals ของตัวแปรทั้งหมดมีการกระจายตัวแบบสุ่มรอบค่าศูนย์ โดยไม่มีรูปแบบ (Patterns) หรือความผิดปกติที่ชัดเจนในกราฟ สิ่งนี้แสดงว่าโมเดลไม่มีความเอนเอียง (Bias) ในการอธิบายข้อมูล และไม่มีตัวแปรสำคัญที่ถูกกลบเกลื่อนในโมเดล การวิเคราะห์นี้ช่วยยืนยันว่าโมเดล Partial Least Squares (PLS) ที่ใช้มีความเหมาะสมและสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยไม่มีข้อผิดพลาดในเชิงระบบ (Systematic Errors) ที่อาจส่งผลต่อความถูกต้องของการทำนายค่าที่สังเกตได้จริงจากข้อมูลการทดลอง

การวิเคราะห์ Residuals compared to Run Order Plot

Residuals compared to Run Order Plot เป็นกราฟสำคัญที่ช่วยตรวจสอบว่าข้อผิดพลาดที่เหลือ (Residuals) มีการเปลี่ยนแปลงตามลำดับการทดลองหรือไม่ โดยลำดับการรันของการทดลองอาจมีผลกระทบต่อผลลัพธ์ที่ได้ เช่น การเปลี่ยนแปลงของเครื่องมือหรือสภาวะแวดล้อมระหว่างการทดลอง หากมีผลกระทบดังกล่าว จะส่งผลให้ Residuals มีรูปแบบ (Pattern) ชัดเจน เช่น การกระจุกตัวหรือการแปรผันตามลำดับการรัน กราฟนี้จึงมีบทบาทสำคัญในการตรวจสอบความเสถียรและความน่าเชื่อถือของข้อมูล รวมถึงความเหมาะสมของโมเดลที่ใช้ จากการวิเคราะห์ Residuals compared to Run Order Plot สำหรับตัวแปร Compound D, DMPBD, Curcuminoid Content, DPPH Assay, ABTS Assay และ FRAP Assay พบว่า Residuals ของตัวแปรแต่ละตัวแสดงลักษณะการกระจายตัวที่สุ่ม ไม่มีรูปแบบแนวโน้มหรือความผิดปกติที่บ่งชี้ถึงผลกระทบจากลำดับการทดลอง แสดงกราฟของผลการศึกษาในภาพที่ 4.24



ภาพที่ 4.24 กราฟ Residuals compared to Run Order Plot

สำหรับการปริมาณตัวที่เกี่ยวข้องกับปริมาณสารสำคัญที่พบในสารสกัด ตัวแปร Compound D (Y1) Residuals แสดงการกระจายตัวแบบสุ่มตามลำดับการทดลอง โดย Residuals ไม่แสดงรูปแบบที่ชัดเจนหรือการเปลี่ยนแปลงเชิงระบบใด ๆ ซึ่งบ่งชี้ว่าโมเดลมีเสถียรภาพในระหว่างการทดลอง และไม่มีผลกระทบจากลำดับการรันที่ส่งผลต่อการทำนายค่าปริมาณ Compound D ในส่วนของตัวแปร DMPBD (Y2) Residuals มีลักษณะการกระจายตัวแบบสุ่มคล้ายกับตัวแปร Compound D โดยไม่พบความผิดปกติที่ชัดเจนในช่วงใดของลำดับการรัน แสดงว่าโมเดลสามารถทำนายค่าปริมาณ DMPBD ได้อย่างเหมาะสม โดยไม่มีผลกระทบจาก Run Order ซึ่งช่วยตอกย้ำความน่าเชื่อถือของการวิเคราะห์สำหรับตัวแปรนี้ สำหรับตัวแปร Total Curcuminoid Content (Y3) Residuals แสดงพฤติกรรมที่สุ่มรอบค่าศูนย์ โดยไม่มีการกระจุกตัวในช่วงใดของลำดับการรัน รวมถึงไม่มีแนวโน้มที่แสดงถึงความแปรปรวนตาม Run Order ซึ่งบ่งชี้ว่าโมเดลสามารถอธิบายค่าที่สังเกตได้จริงอย่างแม่นยำ โดยไม่เกิดปัญหาความไม่เสถียรระหว่างลำดับการรัน

ในกรณีของการวัดฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ จากตัวแปร DPPH Assay (Y4) Residuals มีการกระจายตัวที่สุ่มตามลำดับการทดลอง แม้ว่าจะมีค่าบางจุดที่เบี่ยงเบนเล็กน้อย แต่โดยรวมยังคงไม่พบรูปแบบที่ชัดเจนหรือแนวโน้มเชิงระบบระหว่างลำดับการรันของการทดลอง ซึ่งแสดงว่าโมเดลสามารถทำนายค่าการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH ได้อย่างเหมาะสม สำหรับตัวแปร ABTS Assay (Y5) Residuals มีการกระจายตัวแบบสุ่มเช่นเดียวกับตัวแปรก่อนหน้า โดยไม่พบการเบี่ยงเบนที่ชัดเจน

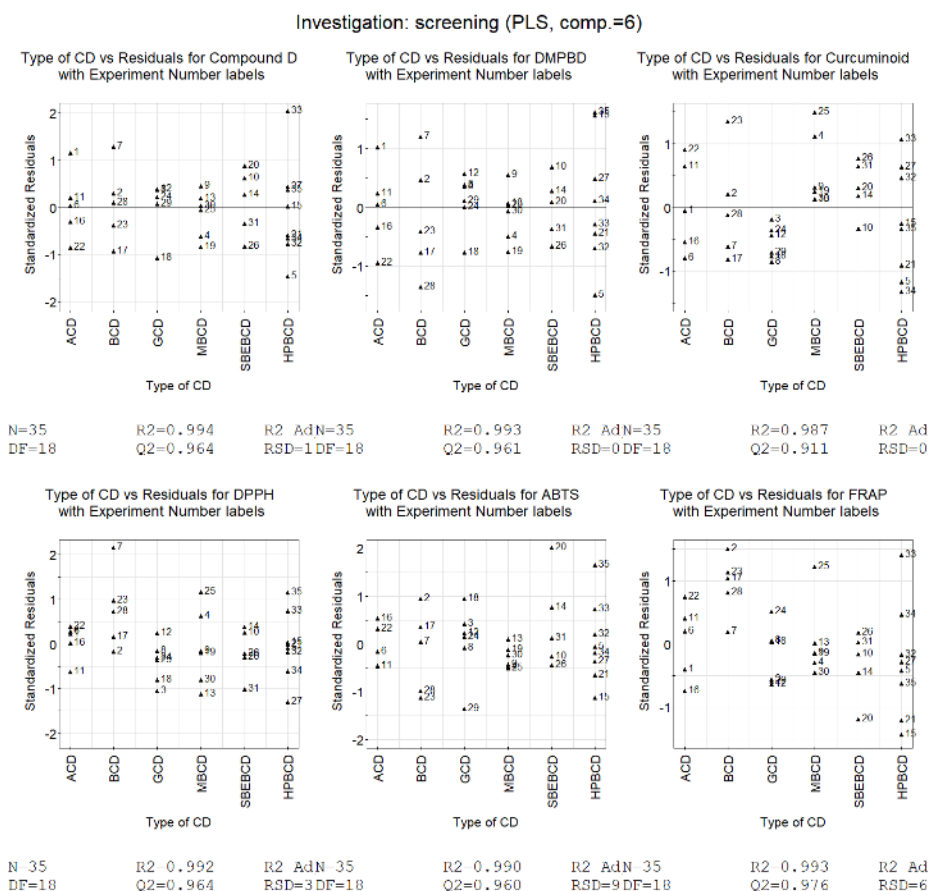
หรือการกระจุกตัวในบางช่วงของลำดับการรัน ความสม่ำเสมอในการกระจายตัวนี้ช่วยยืนยันว่าโมเดลมีความเสถียร และ Run Order ไม่มีผลกระทบต่อการทำนายค่าฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี ABTS สุดท้ายสำหรับตัวแปร FRAP Assay (Y6) Residuals แสดงการกระจายตัวแบบสุ่มรอบค่าศูนย์ โดยไม่มีแนวโน้มหรือการกระจุกตัวในช่วงใดของ Run Order การกระจายตัวในลักษณะนี้สะท้อนว่าโมเดลสามารถทำนายค่าฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระจาก FRAP ได้อย่างแม่นยำ โดยไม่มีผลกระทบจากลำดับการทดลองที่อาจลดความน่าเชื่อถือของข้อมูล

จากการวิเคราะห์ Residuals compared to Run Order Plot สำหรับตัวแปรทั้งหมดพบว่า Residuals ของทุกตัวแปร ได้แก่ Compound D, DMPBD, Total Curcuminoid Content, DPPH Assay, ABTS Assay และ FRAP Assay มีการกระจายตัวแบบสุ่มตามลำดับการทดลอง โดยไม่มีรูปแบบหรือความผิดปกติที่แสดงถึงผลกระทบจาก Run Order ความสุ่มดังกล่าวช่วยยืนยันว่าโมเดล Partial Least Squares (PLS) ที่ใช้ในการวิเคราะห์มีความเสถียรสูงและไม่ถูกรบกวนจากลำดับการทดลอง ทำให้ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองมีความน่าเชื่อถือและเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ต่อไป

การวิเคราะห์ Residuals compared to Variable Plot

Residuals compared to Variable Plot เป็นกราฟที่ใช้ตรวจสอบการกระจายตัวของข้อผิดพลาดที่เหลือ (Residuals) เมื่อเทียบกับตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในโมเดล เช่น ชนิดของ Cyclodextrin (CD) หรือปัจจัยอื่น ๆ ที่อาจมีผลต่อความแม่นยำของการทำนาย โดยในกราฟนี้ Residuals ควรมีลักษณะการกระจายตัวแบบสุ่ม หากพบรูปแบบที่ชัดเจน เช่น การกระจุกตัวหรือแนวโน้มของ Residuals ที่สัมพันธ์กับตัวแปร จะบ่งชี้ว่ามีความสัมพันธ์เชิงเส้นที่ไม่ได้ถูกจับไว้ในโมเดลหรือโมเดลยังไม่สมบูรณ์

กราฟ Residuals compared to Variable Plot ถูกออกแบบมาเพื่อตรวจสอบว่าโมเดลสามารถจัดการความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ และค่าผลลัพธ์ได้อย่างเหมาะสมหรือไม่ ความสัมพันธ์ที่ยังหลงเหลือ (Residual Patterns) อาจสะท้อนถึงข้อผิดพลาดในการเลือกตัวแปรหรือแสดงว่ามีปัจจัยอื่นที่ไม่ได้รวมอยู่ในโมเดลและอาจส่งผลต่อผลลัพธ์ หาก Residuals มีการกระจายตัวแบบสุ่มรอบค่าศูนย์ แสดงว่าโมเดลสามารถอธิบายตัวแปรได้ดีและไม่มีผลกระทบจากตัวแปรที่ใช้ ในกรณีนี้ การวิเคราะห์ Residuals เทียบกับชนิดของ Cyclodextrin (CD) ถูกนำมาใช้เพื่อประเมินว่ามีผลกระทบที่ไม่ได้รับการอธิบายจากโมเดลหรือไม่ โดยชนิดของ Cyclodextrin ที่ศึกษา ได้แก่ ACD, BCD, GCD, MBCD, SBEB CD และ HPBCD แสดงผลการวิเคราะห์ในภาพที่ 4.25



ภาพที่ 4.25 กราฟ Residuals compared to Variable Plot แสดงการกระจายตัวแบบสุ่มของ Residuals ตามชนิดของ CD ยืนยันว่าโมเดลไม่มีปัญหาในการอธิบายความแปรปรวน

สำหรับผลการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับปริมาณของสารสำคัญที่สกัดได้โดยตัวแปร Compound D (Y1) กราฟ Residuals compared to Variable Plot แสดงให้เห็นว่าการกระจายตัวของ Residuals สำหรับ Compound D ไม่มีรูปแบบหรือแนวโน้มที่สัมพันธ์กับชนิดของ Cyclodextrin โดย Residuals มีการกระจายตัวแบบสุ่มรอบค่าศูนย์ ซึ่งแสดงว่าโมเดลสามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของ Cyclodextrin กับค่าปริมาณ Compound D ได้อย่างเหมาะสม ในกรณีของ DMPBD (Y2) การกระจายตัวของ Residuals มีลักษณะสุ่มและไม่มีรูปแบบที่ชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับชนิดของ Cyclodextrin Residuals ไม่ได้มีการกระจุกตัวในประเภทใดประเภทหนึ่งของ Cyclodextrin ซึ่งแสดงถึงความน่าเชื่อถือของโมเดลในการจัดการความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร DMPBD และชนิดของ Cyclodextrin สำหรับตัวแปร Curcuminoid Content (Y3) Residuals มีลักษณะการกระจายตัวแบบสุ่มเมื่อเทียบกับชนิดของ Cyclodextrin โดยไม่มีความสัมพันธ์หรือ

แนวโน้มที่บ่งชี้ถึงปัญหาในโมเดล การกระจายตัวที่ไม่เป็นระบบนี้ช่วยยืนยันว่าโมเดลสามารถอธิบายค่าปริมาณ Curcuminoid Content ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในส่วนของการวัดฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระตัวแปร DPPH Assay (Y4) Residuals แสดงลักษณะการกระจายตัวแบบสุ่มรอบค่าศูนย์เมื่อเปรียบเทียบกับชนิดของ Cyclodextrin เช่นเดียวกับตัวแปรก่อนหน้า ไม่มีรูปแบบหรือแนวโน้มที่ผิดปกติ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโมเดลมีความเหมาะสมในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรนี้กับชนิดของ Cyclodextrin สำหรับตัวแปร ABTS Assay (Y5) การวิเคราะห์ Residuals พบว่ามีการกระจายตัวแบบสุ่มเช่นกัน โดยไม่มีการกระจุกตัวหรือแนวโน้มใด ๆ ที่สัมพันธ์กับชนิดของ Cyclodextrin ซึ่งบ่งชี้ว่าโมเดลสามารถอธิบายค่าฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี ABTS ได้อย่างน่าเชื่อถือ สุดท้ายคือ FRAP Assay (Y6) Residuals มีลักษณะการกระจายตัวแบบสุ่มเมื่อเปรียบเทียบกับชนิดของ Cyclodextrin โดยไม่มีรูปแบบหรือแนวโน้มที่ชัดเจน สิ่งนี้ช่วยยืนยันว่าโมเดลสามารถทำนายค่าฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระจาก FRAP ได้อย่างเหมาะสม และไม่มีผลกระทบจากตัวแปร Cyclodextrin ที่อาจลดความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์

จากการวิเคราะห์ Residuals compared to Variable Plot สำหรับตัวแปร Compound D, DMPBD, Curcuminoid Content, DPPH Assay, ABTS Assay และ FRAP Assay พบว่า Residuals ของตัวแปรทั้งหมดมีการกระจายตัวแบบสุ่มรอบค่าศูนย์ และไม่แสดงรูปแบบหรือความสัมพันธ์ใด ๆ กับชนิดของ Cyclodextrin ที่ใช้ในงานวิจัย ผลการวิเคราะห์นี้แสดงว่าโมเดล Partial Least Squares (PLS) ที่ใช้ในงานวิจัยมีความสามารถในการอธิบายตัวแปรที่ศึกษาได้อย่างดี โดยไม่มีข้อผิดพลาดเชิงระบบหรือปัญหาความสัมพันธ์ที่ไม่ได้รวมอยู่ในโมเดล ความสม่ำเสมอในการกระจายตัวของ Residuals ช่วยตอกย้ำถึงความน่าเชื่อถือของโมเดล และสนับสนุนว่าผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองมีความถูกต้องและเหมาะสมสำหรับการนำไปวิเคราะห์เชิงลึกต่อไป

การวิเคราะห์ Residuals ในงานวิจัยนี้มีบทบาทสำคัญในการประเมินความเหมาะสมของโมเดล Partial Least Squares (PLS) โดย Residuals ซึ่งเป็นค่าความแตกต่างระหว่างค่าที่สังเกตได้จริงและค่าที่คาดการณ์จากโมเดล ถูกตรวจสอบในหลายมิติ เพื่อยืนยันว่าโมเดลสามารถอธิบายข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพและไม่มีข้อผิดพลาดเชิงระบบที่อาจส่งผลกระทบต่อความแม่นยำของผลลัพธ์ จากการวิเคราะห์ Residuals ในหลากหลายกราฟ ได้แก่ N-Probability Plot, Residuals compared to Predicted Y Plot, Residuals compared to Run Order Plot และ Residuals compared to Variable Plot พบว่า Residuals ในทุกมิติแสดงการกระจายตัวแบบสุ่ม ไม่มีลักษณะของความผิดปกติหรือรูปแบบที่แน่นอน เช่น แนวโน้มหรือการกระจุกตัวของค่า ซึ่งสะท้อนว่าโมเดลไม่มีความเอนเอียง (Bias) และไม่มีผลกระทบจากปัจจัยภายนอก เช่น ลำดับการทดลองหรือปัจจัยตัวแปรอื่น โดยเฉพาะในกราฟ N-Probability Plot Residuals เรียงตัวใกล้เคียงกับเส้นทแยงมุม บ่งชี้ว่าข้อผิดพลาดมีการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution) ซึ่งเป็นสมมติฐานสำคัญสำหรับการ

วิเคราะห์เชิงสถิติ กราฟ Residuals compared to Predicted Y Plot และ Residuals compared to Run Order Plot ยังช่วยยืนยันว่า Residuals ไม่มีความสัมพันธ์เชิงระบบหรือผลกระทบจากลำดับการรัน ส่วน Residuals compared to Variable Plot ซึ่งเปรียบเทียบข้อผิดพลาดกับชนิดของ Cyclodextrin ก็แสดงว่าโมเดลสามารถจัดการความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรได้อย่างเหมาะสม

โดยรวม ผลการวิเคราะห์ Residuals ชี้ให้เห็นว่าโมเดลที่สร้างขึ้นมีความน่าเชื่อถือสูง สามารถทำนายค่าที่เกี่ยวข้องกับการสกัดสารสำคัญและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในเหง้าโพลได้อย่างแม่นยำและมีความเสถียร ข้อผิดพลาดที่เหลืออยู่ไม่มีลักษณะเชิงระบบ ซึ่งสะท้อนว่าโมเดลมีความเหมาะสมสำหรับการใช้งานในการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงลึกในงานวิจัยนี้

4.2.3 การตรวจสอบประสิทธิภาพของโมเดล

การตรวจสอบประสิทธิภาพของโมเดลเป็นขั้นตอนสำคัญในกระบวนการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อประเมินว่าโมเดลที่สร้างขึ้นสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้ดีเพียงใด และสามารถนำไปใช้งานในเชิงพยากรณ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในหัวข้อนี้ได้ทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของโมเดลโดยใช้วิธีการที่หลากหลาย ได้แก่ การวิเคราะห์ ANOVA, การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficient Analysis), การวิเคราะห์ผลกระทบ (Effects Plot), การตรวจสอบระยะห่างระหว่างค่าจริงและค่าทำนายของโมเดล (Distance to Model) และการประเมินความสำคัญของตัวแปร (Variable Importance Plot; VIP) โดยรายละเอียดในแต่ละส่วนมีดังนี้

1. การวิเคราะห์ ANOVA

การวิเคราะห์ ANOVA (Analysis of Variance) ในงานวิจัยนี้ใช้เพื่อตรวจสอบความเหมาะสมของโมเดล Partial Least Squares (PLS) ในการอธิบายค่าที่สังเกตได้จริง (Observed Values) และค่าที่คาดการณ์ (Predicted Values) จากข้อมูลตัวแปร Compound D, DMPBD, Curcuminoid Content, DPPH, ABTS และ FRAP โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อตรวจสอบว่าความแปรปรวนของข้อมูลที่โมเดลสามารถอธิบายได้มีนัยสำคัญหรือไม่แสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 สรุปผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของค่าการตอบสนองทั้งหมด

Response	R ²	Adjusted R ²	F-value	p-value (Regression)	Lack of Fit p-value	Residual SD (RSD)
Compound D	0.9940	0.9880	175.7970	0.0000	0.8390	1.1540
DMPBD	0.9930	0.9860	149.5110	0.0000	0.6110	0.7540
Curcuminoid	0.9870	0.9760	86.6230	0.0000	0.7530	0.9896
DPPH	0.9920	0.9850	143.8990	0.0000	0.5480	3.2186
ABTS	0.9900	0.9820	113.9830	0.0000	0.5500	9.0017
FRAP	0.9930	0.9880	170.6410	0.0000	0.6220	6.9097

หมายเหตุ: R² และ Adjusted R²: ค่าที่สูง ใกล้เคียงกับ 1) แสดงถึงความสอดคล้องสูงระหว่างโมเดลและข้อมูลจริง ทำให้เห็นว่าโมเดลสามารถทำนายผลได้ดี, F-value และ p-value: ค่า F-value สูง และค่า p-value ต่ำกว่า 0.05 แสดงว่าโมเดลมีนัยสำคัญทางสถิติในการทำนายค่าการตอบสนอง, Lack of Fit p-value: ค่า p ที่สูงกว่า 0.05 บ่งบอกว่าไม่มีนัยสำคัญในการแสดงความผิดพลาดของโมเดล ซึ่งแปลว่าโมเดลสามารถอธิบายข้อมูลได้ดีโดยไม่มีค่าความแปรปรวนที่ไม่ได้อธิบาย, Residual SD (RSD) ค่า RSD ต่ำ แสดงถึงความแม่นยำของโมเดลในการทำนายและความเชื่อถือได้

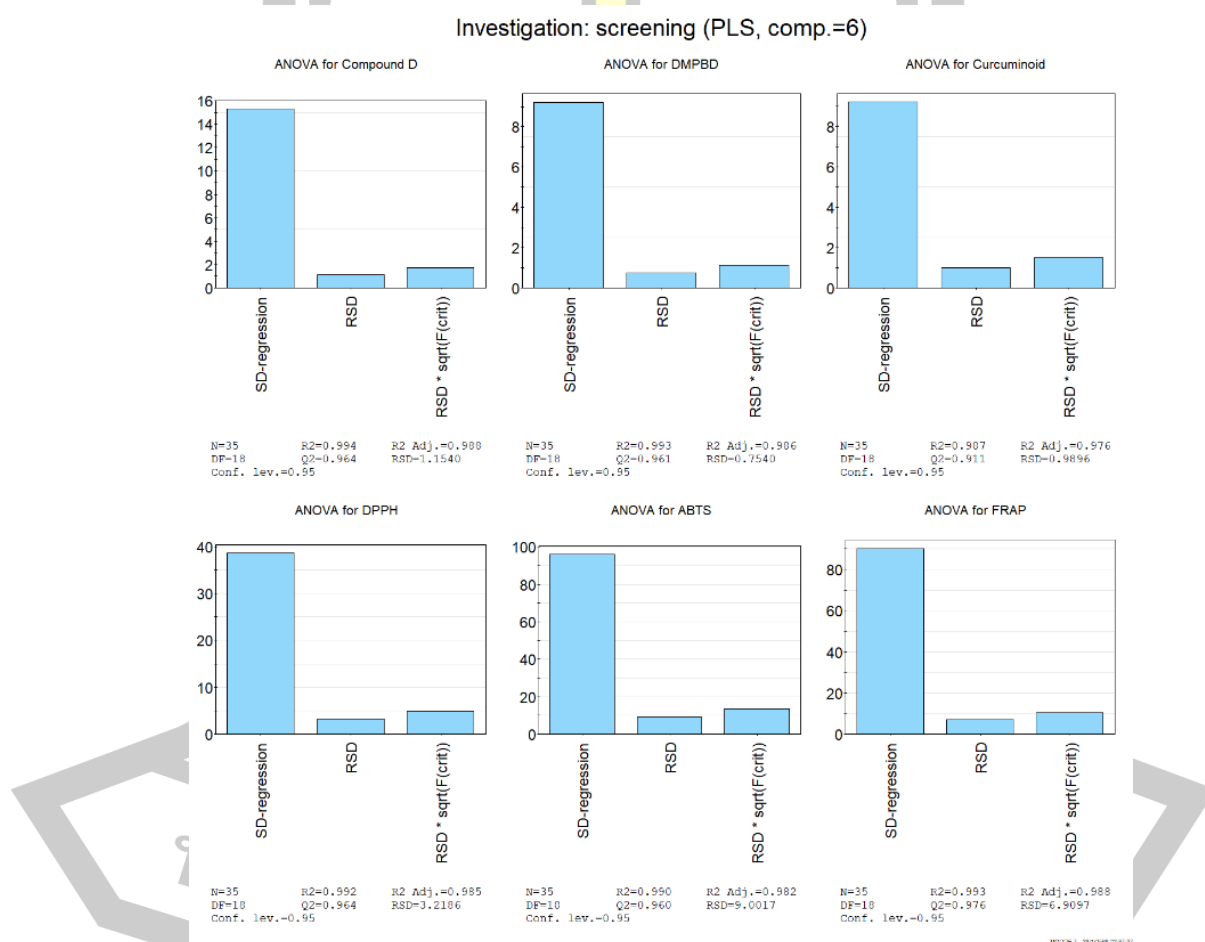
ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าโมเดลที่สร้างขึ้นมีประสิทธิภาพสูงในทุกตัวแปร ค่า R² ซึ่งแสดงถึงความสามารถของโมเดลในการอธิบายความแปรปรวนทั้งหมดของข้อมูล มีค่ามากกว่า 0.98 สำหรับตัวแปรทั้งหมด โดยค่าที่สูงที่สุดคือ Compound D (R² = 0.994) และค่าต่ำสุดคือ Curcuminoid Content (R² = 0.987) แสดงว่าโมเดลสามารถอธิบายข้อมูลได้ในระดับสูง ค่า Adjusted R² ซึ่งคำนึงถึงจำนวนตัวแปรในโมเดล ยังคงอยู่ในช่วง 0.976–0.988 ซึ่งสะท้อนว่าโมเดลมีความเสถียร แม้จะมีการปรับค่าความเหมาะสมเพื่อหลีกเลี่ยงการอธิบายข้อมูลเกินความเป็นจริง

ค่า F-value ที่ได้จากการวิเคราะห์ ANOVA แสดงค่าที่สูงในทุกตัวแปร โดยตัวแปรที่มีค่า F-value สูงที่สุดคือ Compound D (F = 175.797) และตัวแปรที่มีค่า F-value ต่ำที่สุดคือ Curcuminoid Content (F = 86.623) ค่า F-value ที่สูงแสดงถึงความแปรปรวนที่อธิบายได้โดยโมเดลมีมากกว่าความแปรปรวนที่เกิดจากข้อผิดพลาดแบบสุ่มอย่างมีนัยสำคัญ และค่า p-value (Regression) ที่ต่ำกว่า 0.0001 ในทุกตัวแปรยืนยันว่าโมเดลสามารถอธิบายความสัมพันธ์เชิงสถิติระหว่างตัวแปรอิสระและค่าผลลัพธ์ได้ดี

การตรวจสอบ Lack of Fit p-value ซึ่งใช้ประเมินว่าโมเดลสามารถอธิบายข้อมูลได้อย่างเหมาะสมหรือไม่เมื่อเทียบกับความแปรปรวนจากการทดลองซ้ำ (Pure Error) พบว่าค่า p-value ในทุกตัวแปรมีค่ามากกว่า 0.5 แสดงว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างค่าที่โมเดลคาดการณ์

และค่าที่วัดได้จริงในเชิงระบบ ตัวอย่างเช่น Compound D มีค่า Lack of Fit p-value = 0.839 และ FRAP มีค่า Lack of Fit p-value = 0.622 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

จากการวิเคราะห์ข้อมูลในรูป ANOVA Bar Plot ในภาพที่ 4.26 ซึ่งแสดงเปรียบเทียบค่า SD-Regression, RSD, และเกณฑ์การยอมรับความเบี่ยงเบน ($RSD < \sqrt{F_{crit}}$) สำหรับตัวแปร Compound D, DMPBD, Curcuminoid Content, DPPH, ABTS และ FRAP พบว่าในทุกตัวแปร ค่า SD-Regression (ค่าความแปรปรวนที่อธิบายโดยโมเดล) สูงกว่าค่า RSD อย่างชัดเจน และค่า RSD อยู่ต่ำกว่าเกณฑ์ $\sqrt{F_{crit}}$ เสมอ แสดงให้เห็นว่าโมเดลสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้มากกว่าความแปรปรวนที่เหลืออย่างมีนัยสำคัญ



ภาพที่ 4.26 กราฟ ANOVA แสดงการกระจายของความแปรปรวน

ตัวแปร Compound D แสดงค่า SD-Regression ที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับค่า RSD ซึ่งสะท้อนถึงความแม่นยำสูงของโมเดลในการทำนายปริมาณ Compound D ตัวแปร DMPBD และ Curcuminoid Content มีลักษณะใกล้เคียงกัน โดยค่า SD-Regression มีค่ามากกว่าค่า RSD หลาย

เท่า แสดงให้เห็นว่าโมเดลมีความสามารถสูงในการอธิบายข้อมูล ขณะที่ตัวแปร DPPH, ABTS และ FRAP ซึ่งเกี่ยวข้องกับฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ แสดงค่า SD-Regression สูงกว่า RSD ในลักษณะเดียวกัน แม้ว่าความแปรปรวนของ Residuals (RSD) ใน ABTS และ FRAP จะมีค่าสูงกว่าตัวแปรอื่น แต่ค่า SD-Regression ยังคงโดดเด่นกว่าอย่างมีนัยสำคัญ

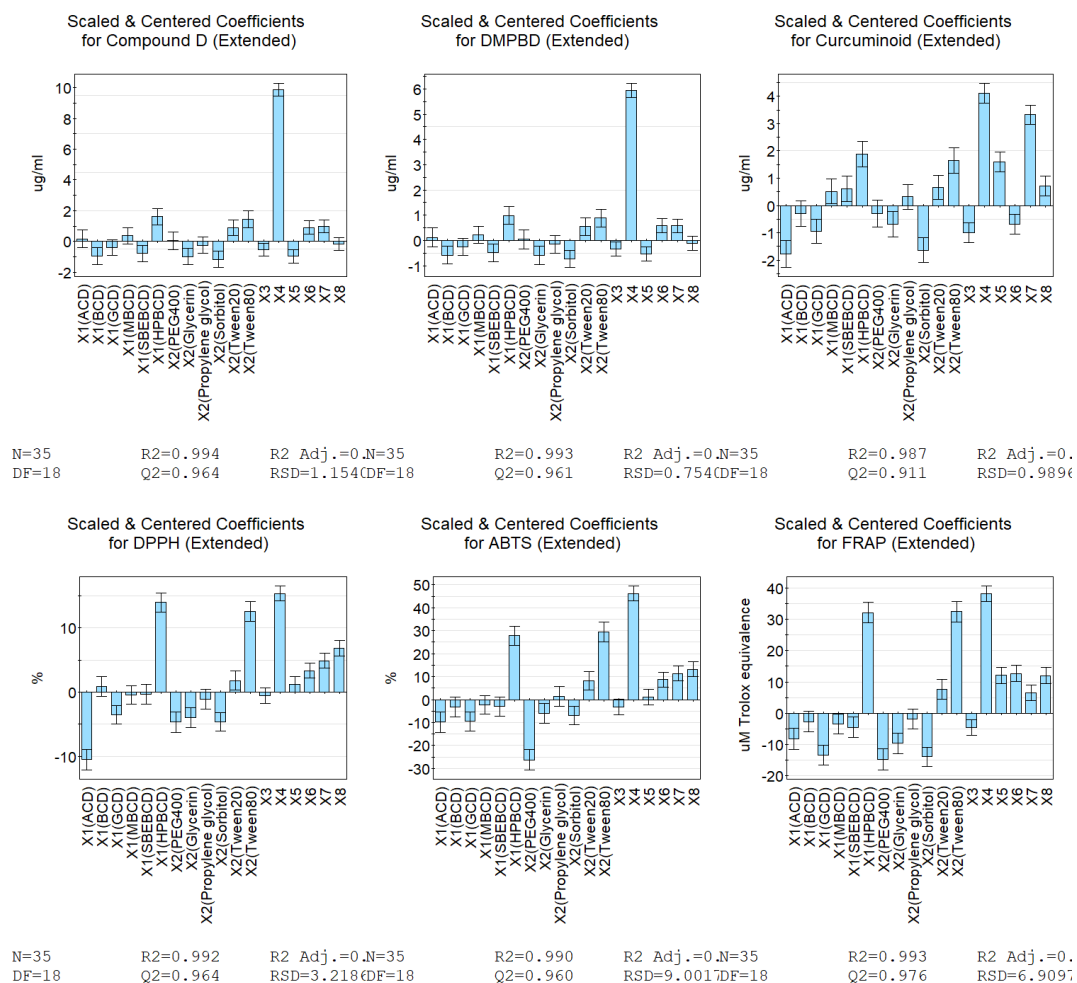
จากผลการวิเคราะห์ ANOVA ทั้งจากข้อมูลในตารางและรูปที่แสดงใน ANOVA Bar Plot พบว่าโมเดล Partial Least Squares (PLS) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีประสิทธิภาพสูงในการอธิบายค่าความแปรปรวนในตัวแปร Compound D, DMPBD, Curcuminoid Content, DPPH, ABTS และ FRAP โดยค่า R^2 และ Adjusted R^2 ในระดับสูงสะท้อนว่าโมเดลสามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและค่าผลลัพธ์ได้ดี ค่า F-value ที่สูงและ p-value (Regression) ที่ต่ำกว่า 0.0001 ในทุกตัวแปรยืนยันว่าโมเดลมีนัยสำคัญทางสถิติ ค่า RSD ที่ต่ำและค่า Lack of Fit p-value ที่มากกว่า 0.5 สนับสนุนว่าโมเดลไม่มีข้อผิดพลาดเชิงระบบหรือความไม่เหมาะสมในเชิงสถิติ การแสดงผลใน ANOVA Bar Plot ช่วยยืนยันภาพรวมของข้อมูลว่าโมเดลสามารถอธิบายความแปรปรวนที่เกิดขึ้นในข้อมูลได้อย่างชัดเจน และค่า RSD ในทุกตัวแปรอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมสำหรับการนำโมเดลไปใช้ในการพยากรณ์และวิเคราะห์ข้อมูลในงานวิจัยนี้

2. การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficient Analysis)

การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficient Analysis) ในงานวิจัยนี้มีเป้าหมายเพื่อประเมินผลกระทบของตัวแปรอิสระที่มีต่อค่าผลลัพธ์ในโมเดล Partial Least Squares (PLS) โดยแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์เชิงตัวเลขและเชิงสถิติของปัจจัยที่ทำการศึกษา

ค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficients) ที่ได้จากการวิเคราะห์นี้แสดงผลในรูปแบบ Scaled & Centered Coefficients ซึ่งเป็นการปรับค่าตัวเลขให้อยู่ในมาตรฐานเดียวกันเพื่อให้สามารถเปรียบเทียบผลกระทบของตัวแปรแต่ละตัวได้อย่างชัดเจนและสมเหตุสมผล โดยค่าที่เป็นบวกแสดงถึงผลกระทบในเชิงบวก หรือเพิ่มค่าผลลัพธ์ ขณะที่ค่าที่เป็นลบแสดงผลกระทบในเชิงลบ หรือทำให้ค่าผลลัพธ์ลดลง นอกจากนี้ ความนัยสำคัญทางสถิติ (p-value) ถูกใช้เพื่อยืนยันว่าผลกระทบนั้นมีความหมายในเชิงสถิติหรือไม่ จากข้อมูลตารางค่าสัมประสิทธิ์และกราฟ Scaled & Centered Coefficients สำหรับตัวแปร Compound D, DMPBD, Curcuminoid Content, DPPH, ABTS และ FRAP (ภาพที่ 4.27) รายละเอียดการวิเคราะห์ผลลัพธ์สำหรับตัวแปรแต่ละตัวมีดังนี้

Investigation: screening (PLS, comp.=6)



ภาพที่ 4.27 กราฟค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficient) ของการตอบสนองของการศึกษา

การวิเคราะห์ผลกระทบของตัวแปรแต่ละตัว

สำหรับตัวแปร Compound D ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่า ชนิด CD เป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ โดย HPBCD แสดงค่าสัมประสิทธิ์เชิงบวกสูงที่สุด (Coeff. SC = 1.60635, $p < 0.00001$) ซึ่งหมายความว่า HPBCD สามารถเพิ่มปริมาณ Compound D ได้ดีที่สุด ในทางกลับกัน BCD (Coeff. SC = -0.945716, $p < 0.01$) และ SBEB CD (Coeff. SC = -0.78624, $p < 0.01$) แสดงผลกระทบในเชิงลบอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งชี้ว่าการใช้ CD ชนิดนี้อาจไม่เหมาะสมสำหรับการสกัด Compound D ในส่วนของชนิดสารเติมแต่ง พบว่า Tween 80 มีผลกระทบในเชิงบวกสูงที่สุด (Coeff. SC = 1.43544, $p < 0.001$) แสดงว่ามีบทบาทสำคัญในการช่วยเพิ่มปริมาณ Compound D ขณะที่ Sorbitol (Coeff. SC = -1.16438, $p < 0.001$) แสดงผลกระทบในเชิงลบเด่นชัด ซึ่งบ่งชี้ว่าการใช้ Sorbitol อาจลดประสิทธิภาพในการสกัดสารดังกล่าว ในปัจจัยเชิงน้ำหนักของสมุนไพร (X4)

แสดงผลกระทบเชิงบวกสูงสุด (Coeff. SC = 9.85836, $p < 0.0001$) ขณะที่เวลาในการสกัด (X5) มีผลกระทบเชิงลบ (Coeff. SC = -0.964553, $p < 0.001$) ซึ่งบ่งชี้ว่าการเพิ่มน้ำหนักของสมุนไพรในช่วงที่กำหนดช่วยเพิ่มการสกัด Compound D แต่การเพิ่มเวลาในการสกัดอาจลดประสิทธิภาพ

ผลลัพธ์สำหรับตัวแปร DMPBD มีลักษณะคล้ายกับ Compound D โดยที่ HPBCD แสดงผลกระทบเชิงบวกเด่นชัดที่สุด (Coeff. SC = 0.984841, $p < 0.00001$) ในขณะที่ BCD (Coeff. SC = -0.57793, $p < 0.01$) และ SBEB CD (Coeff. SC = -0.484985, $p < 0.01$) มีผลกระทบเชิงลบที่ชัดเจน สารช่วยละลาย Tween 80 ยังคงมีผลกระทบเชิงบวกสูงสุด (Coeff. SC = 0.886553, $p < 0.001$) ในขณะที่ Sorbitol แสดงผลกระทบเชิงลบเด่นชัด (Coeff. SC = -0.727849, $p < 0.001$) ผลลัพธ์นี้ยืนยันถึงประสิทธิภาพของ Tween 80 ในการเพิ่ม DMPBD ในปัจจัยเชิงปริมาณคือน้ำหนักของสมุนไพร (X4) แสดงผลกระทบในเชิงบวกที่เด่นชัด (Coeff. SC = 5.94414, $p < 0.001$) ขณะที่เวลาในการสกัด (X5) มีผลกระทบเชิงลบ (Coeff. SC = -0.531801, $p < 0.001$) เช่นเดียวกับ Compound D

ในกรณีของ Total Curcuminoid Content พบว่า HPBCD ยังคงแสดงผลกระทบเชิงบวกสูงสุด (Coeff. SC = 1.87291, $p < 0.00001$) ขณะที่ Tween 80 มีผลกระทบเชิงบวกเช่นกัน (Coeff. SC = 1.64553, $p < 0.001$) ในทางกลับกัน Sorbitol แสดงผลกระทบในเชิงลบที่เด่นชัดที่สุด (Coeff. SC = -1.6374, $p < 0.001$) ปัจจัยเชิงปริมาณ เช่น น้ำหนักของสมุนไพร (X4) ยังคงมีผลกระทบเชิงบวกสูงสุด (Coeff. SC = 3.32141, $p < 0.001$) ส่วนเวลาในการสกัด (X5) มีผลกระทบเชิงลบเล็กน้อย (Coeff. SC = -1.00983, $p < 0.001$)

สำหรับตัวแปรฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ได้แก่ DPPH, ABTS และ FRAP ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า HPBCD และ Tween 80 ยังคงมีผลกระทบเชิงบวกสูงที่สุดในทุกตัวแปร ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระที่วัดด้วย DPPH แสดงว่า HPBCD มีผลกระทบเด่นชัดที่สุด (Coeff. SC = 13.9502, $p < 0.001$) เช่นเดียวกับ Tween 80 (Coeff. SC = 12.5493, $p < 0.001$) ในขณะที่ PEG 400 และ Sorbitol แสดงผลกระทบเชิงลบ (-4.68011 และ -4.61378 ตามลำดับ, $p < 0.001$) ใน ABTS และ FRAP ผลลัพธ์ยังคงแสดงความคล้ายคลึงกัน โดยที่ HPBCD และ Tween 80 มีผลกระทบในเชิงบวกสูงที่สุดในตัวแปรทั้งสอง (Coeff. SC = 27.8232 และ 32.1097 ตามลำดับสำหรับ ABTS; Coeff. SC = 32.1097 และ 32.3882 ตามลำดับสำหรับ FRAP, $p < 0.001$) ขณะที่ Sorbitol และ PEG 400 แสดงผลกระทบในเชิงลบในตัวแปรทั้งสอง

กราฟ Scaled & Centered Coefficients ช่วยแสดงผลการวิเคราะห์อย่างชัดเจน โดยแสดงให้เห็นว่า HPBCD และ Tween 80 มีค่าสัมประสิทธิ์ในเชิงบวกที่สูงที่สุดในทุกตัวแปร ขณะที่ Sorbitol และ PEG 400 แสดงผลกระทบในเชิงลบที่ชัดเจนในตัวแปรส่วนใหญ่ CD ชนิดต่าง ๆ เช่น BCD และ SBEB CD แสดงผลกระทบในเชิงลบในบางตัวแปร เช่น Compound D และ DMPBD ซึ่ง

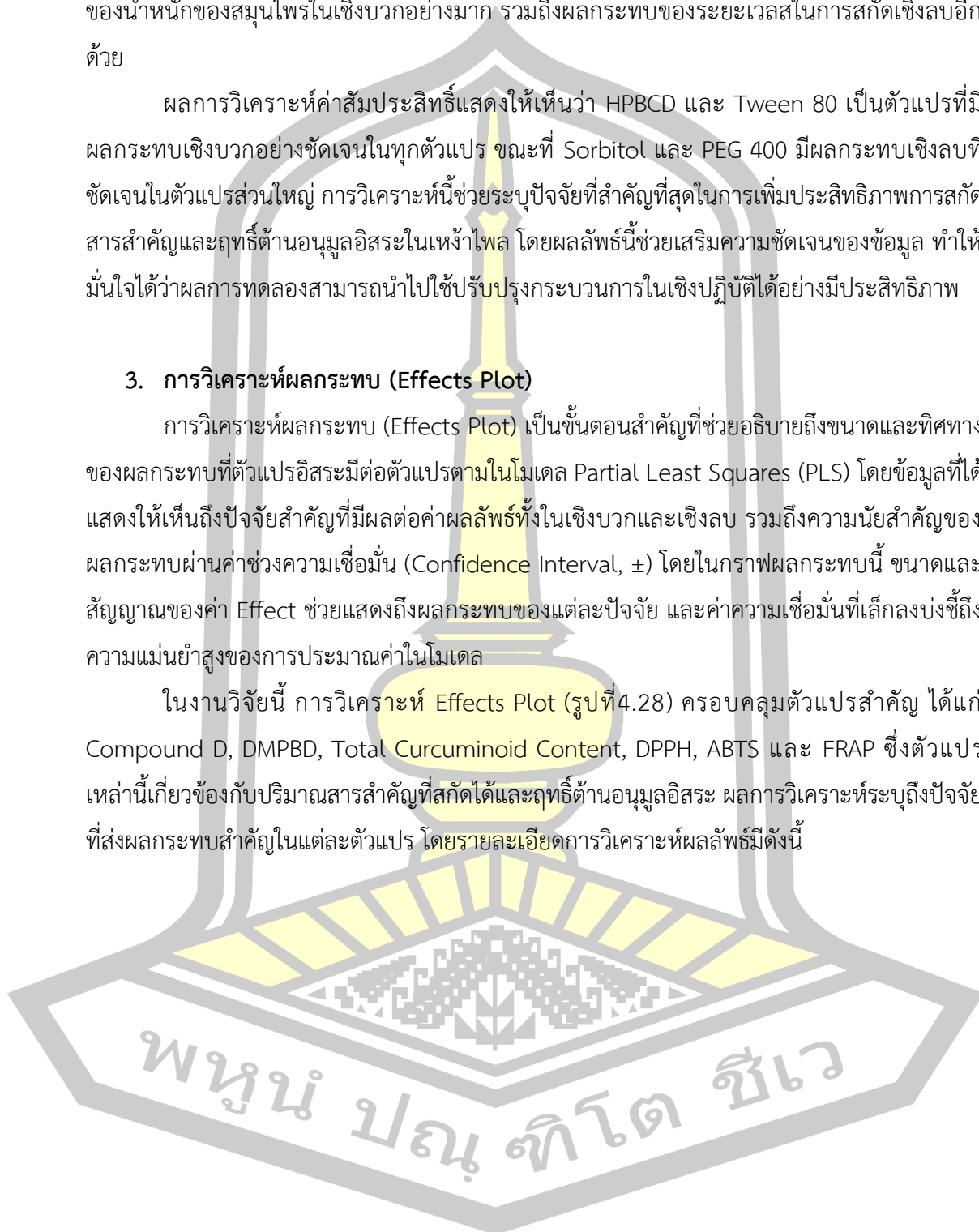
แสดงให้เห็นว่าชนิดของ CD มีบทบาทสำคัญต่อประสิทธิภาพการสกัด กราฟนี้ยังแสดงถึงความสำคัญของน้ำหนักของสมุนไพรในเชิงบวกอย่างมาก รวมถึงผลกระทบของระยะเวลาในการสกัดเชิงลบอีกด้วย

ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์แสดงให้เห็นว่า HPBCD และ Tween 80 เป็นตัวแปรที่มีผลกระทบเชิงบวกอย่างชัดเจนในทุกตัวแปร ขณะที่ Sorbitol และ PEG 400 มีผลกระทบเชิงลบที่ชัดเจนในตัวแปรส่วนใหญ่ การวิเคราะห์นี้ช่วยระบุปัจจัยที่สำคัญที่สุดในการเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดสารสำคัญและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในเหง้าโพล โดยผลลัพธ์นี้ช่วยเสริมความชัดเจนของข้อมูล ทำให้มั่นใจได้ว่าผลการทดลองสามารถนำไปใช้ปรับปรุงกระบวนการในเชิงปฏิบัติได้อย่างมีประสิทธิภาพ

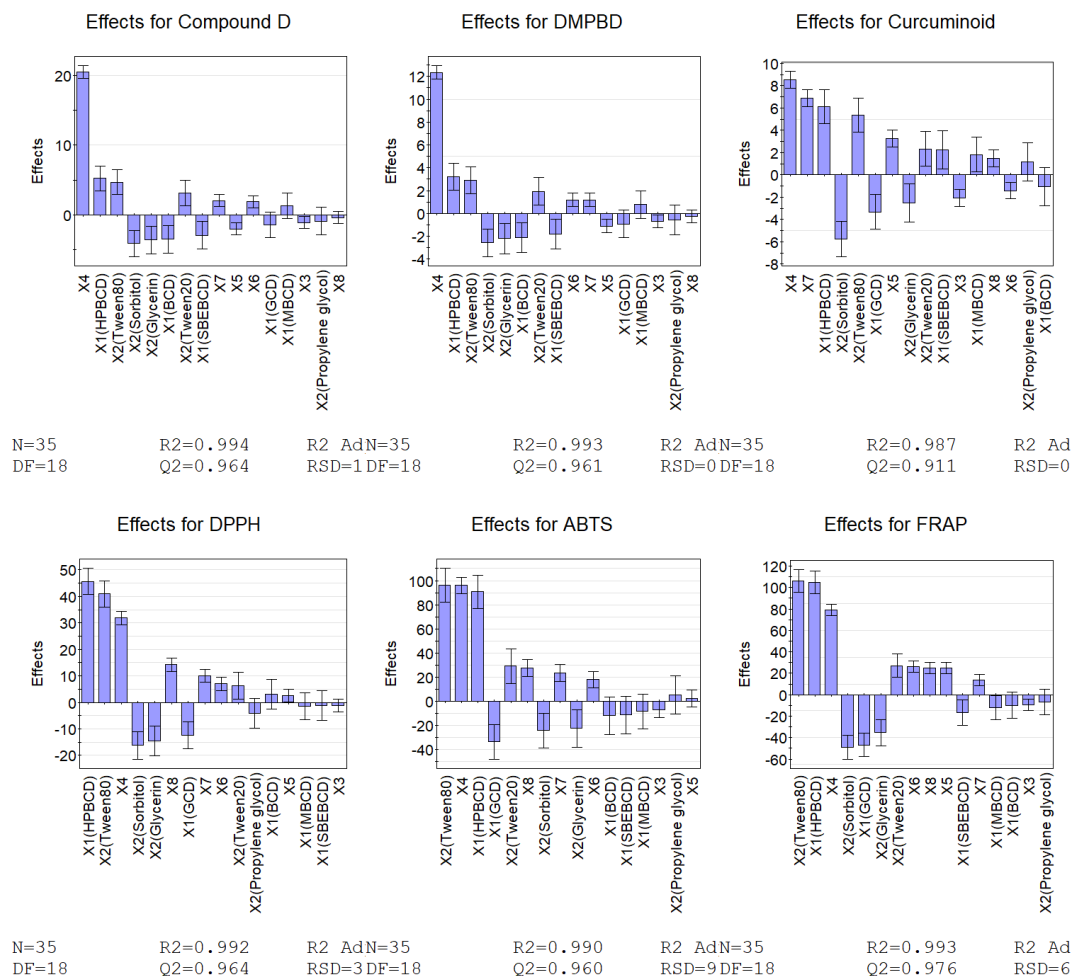
3. การวิเคราะห์ผลกระทบ (Effects Plot)

การวิเคราะห์ผลกระทบ (Effects Plot) เป็นขั้นตอนสำคัญที่ช่วยอธิบายถึงขนาดและทิศทางของผลกระทบที่ตัวแปรอิสระมีต่อตัวแปรตามในโมเดล Partial Least Squares (PLS) โดยข้อมูลที่ได้แสดงให้เห็นถึงปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อค่าผลลัพธ์ทั้งในเชิงบวกและเชิงลบ รวมถึงความสำคัญของผลกระทบผ่านค่าช่วงความเชื่อมั่น (Confidence Interval, $\pm$) โดยในกราฟผลกระทบนี้ ขนาดและสัญญาณของค่า Effect ช่วยแสดงถึงผลกระทบของแต่ละปัจจัย และค่าความเชื่อมั่นที่เล็กลงบ่งชี้ถึงความแม่นยำสูงของการประมาณค่าในโมเดล

ในงานวิจัยนี้ การวิเคราะห์ Effects Plot (รูปที่ 4.28) ครอบคลุมตัวแปรสำคัญ ได้แก่ Compound D, DMPBD, Total Curcuminoid Content, DPPH, ABTS และ FRAP ซึ่งตัวแปรเหล่านี้เกี่ยวข้องกับปริมาณสารสำคัญที่สกัดได้และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ผลการวิเคราะห์ระบุถึงปัจจัยที่ส่งผลกระทบสำคัญในแต่ละตัวแปร โดยรายละเอียดการวิเคราะห์ผลลัพธ์มีดังนี้



Investigation: screening (PLS, comp.=6)



ภาพที่ 4.28 กราฟค่าผลกระทบ (Effects Plot)

ตัวแปร Compound D แสดงให้เห็นว่า น้ำหนักของสมุนไพร (X4) มีผลกระทบเชิงบวกสูงที่สุด (Effect = 20.4703, ± 0.879251) โดยบ่งชี้ว่าการเพิ่มน้ำหนักสมุนไพรในช่วงที่ทดลองช่วยเพิ่มปริมาณ Compound D อย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ HPBCD (X1) และ Tween 80 (X2) ก็แสดงผลกระทบเชิงบวกอย่างชัดเจน (Effect = 5.2478 และ 4.68943 ตามลำดับ) ซึ่งแสดงถึงบทบาทสำคัญของ CD และสารช่วยละลายที่เหมาะสมในทางกลับกัน Sorbitol (X2) และ Glycerin (X2) แสดงผลกระทบในเชิงลบต่อ Compound D อย่างมีนัยสำคัญ (Effect = -4.09953 และ -3.59259 ตามลำดับ) ซึ่งสะท้อนว่าการใช้สารช่วยละลายเหล่านี้นี้อาจลดประสิทธิภาพในการสกัดสารสำคัญ นอกจากนี้ BCD (X1) และ SBEB CD (X1) ยังแสดงผลกระทบเชิงลบ (Effect = -3.48763 และ -2.89951 ตามลำดับ) บ่งชี้ว่า CD ชนิดนี้อาจไม่เหมาะสมสำหรับการสกัด Compound D ตัวแปรเชิงปริมาณ เช่น ความเข้มข้นของเอทานอล (X7) และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (X6) แสดงผลกระทบ

เชิงบวกต่อ Compound D (Effect = 2.07381 และ 1.89743 ตามลำดับ) ในขณะที่เวลาในการสกัด (X5) แสดงผลกระทบเชิงลบเล็กน้อย (Effect = -1.98848)

ในตัวแปร DMPBD ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า น้ำหนักของสมุนไพร (X4) ยังคงเป็นปัจจัยที่มีผลกระทบเชิงบวกสูงที่สุด (Effect = 12.3426, ± 0.574495) ซึ่งแสดงถึงความสำคัญของปริมาณสมุนไพรที่ใช้ต่อปริมาณ DMPBD ที่สกัดได้ นอกจากนี้ HPBCD (X1) และ Tween 80 (X2) แสดงผลกระทบเชิงบวกที่ชัดเจน (Effect = 3.21738 และ 2.89628 ตามลำดับ) ในขณะที่ Sorbitol (X2) และ Glycerin (X2) แสดงผลกระทบเชิงลบเด่นชัด (Effect = -2.56259 และ -2.2006) ซึ่งแสดงถึงลักษณะการลดประสิทธิภาพของสารช่วยละลายบางชนิดต่อ DMPBD ตัวแปรเชิงปริมาณ เช่น ความเข้มข้นของเอทานอล (X7) และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (X6) ยังคงแสดงผลกระทบในเชิงบวกต่อ DMPBD (Effect = 1.19341 และ 1.19946 ตามลำดับ)

ในตัวแปร Curcuminoid Content พบว่า น้ำหนักของสมุนไพร (X4) ยังคงมีผลกระทบเชิงบวกสูงที่สุด (Effect = 8.53596, ± 0.753985) ขณะที่ความเข้มข้นของเอทานอล (X7) แสดงผลกระทบเชิงบวกเช่นกัน (Effect = 6.89669) HPBCD (X1) และ Tween 80 (X2) ยังคงมีผลกระทบในเชิงบวกต่อ Curcuminoid Content อย่างมีนัยสำคัญ (Effect = 6.11861 และ 5.3758 ตามลำดับ) ในทางกลับกัน Sorbitol (X2) และ GCD (X1) แสดงผลกระทบในเชิงลบเด่นชัด (Effect = -5.76491 และ -3.32327)

ในกรณีของตัวแปรฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ เช่น DPPH, ABTS และ FRAP ผลกระทบของปัจจัยต่าง ๆ มีความคล้ายคลึงกัน โดย HPBCD (X1) และ Tween 80 (X2) แสดงผลกระทบเชิงบวกสูงที่สุดในทุกตัวแปร สำหรับ DPPH พบว่า HPBCD แสดงผลกระทบสูงที่สุด (Effect = 45.5738, ± 4.93571) ตามมาด้วย Tween 80 (Effect = 40.9974) และน้ำหนักสมุนไพร (X4) (Effect = 31.839) ในขณะที่ Sorbitol และ Glycerin แสดงผลกระทบในเชิงลบอย่างเด่นชัด (Effect = -16.244 และ -14.5033) ใน ABTS และ FRAP ผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่า HPBCD และ Tween 80 ยังคงเป็นตัวแปรที่มีผลกระทบเชิงบวกสูงสุด โดยสำหรับ ABTS ค่า Effect ของ Tween 80 เท่ากับ 96.2096 ขณะที่ HPBCD มีค่า Effect เท่ากับ 90.8955 สำหรับ FRAP ค่า Effect ของ Tween 80 และ HPBCD มีค่าใกล้เคียงกัน (105.809 และ 104.899 ตามลำดับ) ในตัวแปรทั้งสองนี้ Sorbitol และ GCD แสดงผลกระทบในเชิงลบที่เด่นชัดที่สุด เช่นใน FRAP Sorbitol มีค่า Effect = -49.0331 และ GCD มีค่า Effect = -46.8935

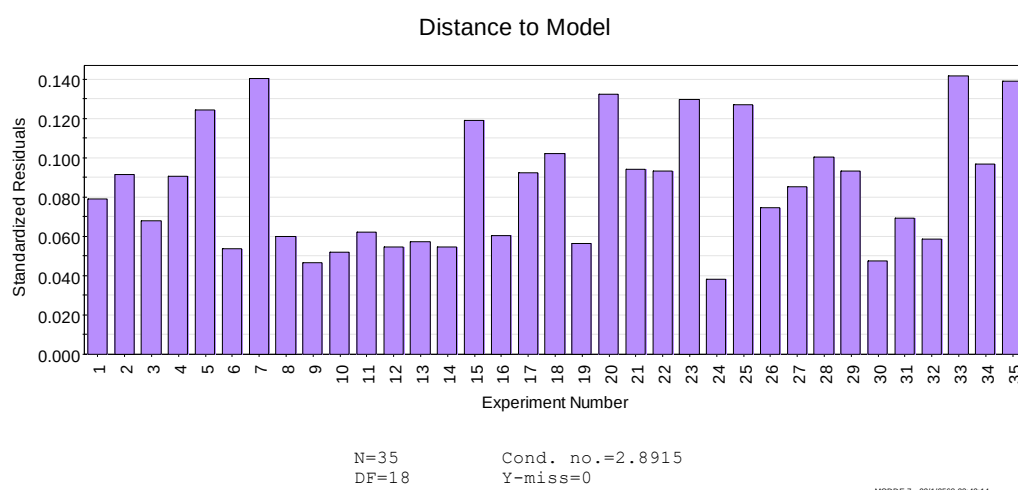
กราฟ Effects Plot แสดงผลกระทบของปัจจัยอิสระแต่ละตัวอย่างชัดเจน โดยช่วยเน้นปัจจัยที่ส่งผลกระทบเชิงบวกหรือเชิงลบต่อค่าผลลัพธ์ในตัวแปรแต่ละตัว เช่นใน Compound D และ DMPBD พบว่า HPBCD และ Tween 80 เป็นปัจจัยที่มีบทบาทสำคัญที่สุดในเชิงบวก ขณะที่ Sorbitol และ Glycerin มักมีผลกระทบในเชิงลบ ในตัวแปรฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ เช่น ABTS และ

FRAP กราฟแสดงให้เห็นว่าค่า Effect ของ HPBCD และ Tween 80 มีความโดดเด่นและสม่ำเสมอในเชิงบวกในขณะที่ค่า Effect ของ Sorbitol และ GCD มีความโดดเด่นในเชิงลบ

ผลการวิเคราะห์ Effects Plot ชี้ให้เห็นว่า HPBCD และ Tween 80 เป็นปัจจัยที่มีผลกระทบเชิงบวกสูงสุดในตัวแปรทุกตัวที่ศึกษา ขณะที่ Sorbitol และ GCD แสดงผลกระทบเชิงลบในตัวแปรส่วนใหญ่ การวิเคราะห์นี้ช่วยระบุปัจจัยสำคัญที่มีบทบาทในการเพิ่มปริมาณสารสำคัญและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระอย่างชัดเจน ข้อมูลในกราฟ Effects Plot ยังช่วยแสดงผลกระทบของปัจจัยในลักษณะที่เข้าใจง่ายและสื่อความหมายได้ดี โดยยืนยันถึงความเหมาะสมของ HPBCD และ Tween 80 ในกระบวนการสกัดสารสำคัญจากเหง้าไพล

4. การวิเคราะห์ระยะห่างค่าจริงและค่าทำนายของโมเดล (Distance to Model)

การตรวจสอบระยะห่างระหว่างค่าจริงและค่าทำนายของโมเดล หรือที่เรียกว่า Distance to Model Analysis เป็นขั้นตอนสำคัญที่ใช้ประเมินความเหมาะสมของโมเดลที่สร้างขึ้น โดยระยะห่างนี้สะท้อนถึงความแตกต่างระหว่างค่าที่สังเกตได้จริง (Observed Values) และค่าที่โมเดลทำนาย (Predicted Values) ในลักษณะของ Residuals ที่ได้ถูกทำให้เป็นมาตรฐาน (Standardized Residuals) ในกราฟ "Distance to Model" (ภาพที่ 4.29) ที่นำเสนอ ใช้แสดงผลความแตกต่างระหว่างค่าจริงและค่าทำนายสำหรับการทดลองทั้ง 35 จุด (Experiment Numbers 1–35) โดยค่าระยะห่างที่ใกล้เคียงศูนย์สะท้อนว่าโมเดลสามารถทำนายค่าผลลัพธ์ได้อย่างแม่นยำและมีความเหมาะสม ส่วนค่าที่สูงกว่าอาจสะท้อนถึงการกระจายตัวหรือข้อผิดพลาดในกระบวนการทดลอง



ภาพที่ 4.29 กราฟ Distance to Model

จากกราฟ "Distance to Model" (ภาพที่ 4.29) พบว่าระยะห่างของ Residuals ที่ได้จากการทดลองทั้ง 35 จุดมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอ และไม่มีจุดข้อมูลใดที่เบี่ยงเบนออกไปมากจนถือว่าเป็น "Outlier" หรือจุดผิดปกติในโมเดลที่สร้างขึ้น ค่าของ Standardized Residuals ในกราฟอยู่ในช่วงประมาณ 0.02 ถึง 0.14 ซึ่งแสดงถึงความแม่นยำของโมเดลในการทำนายค่าผลลัพธ์ กราฟยังแสดงให้เห็นว่ามีบางจุดทดลองที่มี Residuals ใกล้เคียงศูนย์ เช่น จุดทดลองหมายเลข 6, 9, และ 24 ซึ่งแสดงถึงการทำนายของโมเดลที่ใกล้เคียงกับค่าจริงอย่างมาก ขณะที่บางจุด เช่น จุดทดลองหมายเลข 5, 7, 15, 20, 23, 25, 33 และ 35 มีค่าระยะห่างที่สูงกว่า (ประมาณ 0.12–0.14) ซึ่งอาจสะท้อนถึงความแตกต่างของค่าจริงและค่าทำนายในระดับที่มากขึ้น

ผลจากการวิเคราะห์นี้ยังสอดคล้องกับคุณสมบัติของโมเดล PLS ที่สร้างขึ้น โดยมีค่าตัวชี้วัดสำคัญ เช่น ค่า R^2 (0.994 สำหรับ Compound D, 0.993 สำหรับ DMPBD, และ 0.992 สำหรับ DPPH) และค่า Q^2 ที่สูงในทุกตัวแปร ซึ่งแสดงถึงความสามารถของโมเดลในการอธิบายค่าที่สังเกตได้ และการทำนายค่าที่ไม่เคยเห็นมาก่อน ค่าของ Residual Standard Deviation (RSD) ในโมเดลนี้ เช่น 1.1540 สำหรับ Compound D และ 0.7540 สำหรับ DMPBD ยืนยันว่าโมเดลมีความแม่นยำสูง และระยะห่างของ Residuals ส่วนใหญ่สะท้อนถึงความเป็นปกติของค่าผลลัพธ์ที่กระจายรอบค่าศูนย์

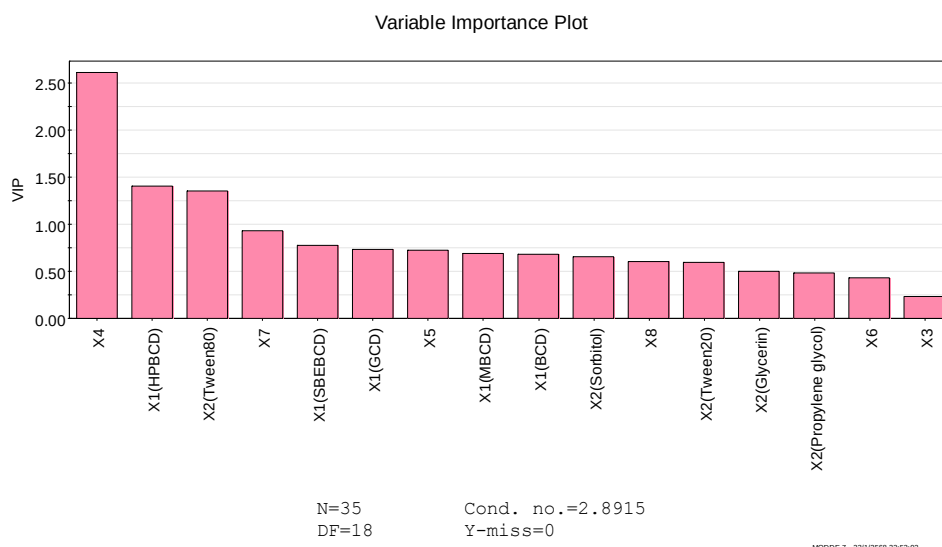
การตรวจสอบระยะห่างระหว่างค่าจริงและค่าทำนายจากกราฟ "Distance to Model" แสดงให้เห็นว่าโมเดลที่สร้างขึ้นมีประสิทธิภาพสูงในการอธิบายและทำนายค่าผลลัพธ์ เนื่องจากไม่มีจุดข้อมูลใดที่มี Residuals ที่สูงจนถือว่าเป็นข้อผิดพลาดที่สำคัญ การกระจายตัวที่สม่ำเสมอและค่า Residuals ที่อยู่ในช่วงปกติแสดงถึงความเสถียรของโมเดล ซึ่งสามารถรองรับการนำไปใช้งานในกระบวนการทำนายค่าผลลัพธ์หรือการออกแบบการทดลองเพิ่มเติมในอนาคตได้อย่างมั่นใจ

5. ความสำคัญของตัวแปร (Variable Importance Plot; VIP)

การวิเคราะห์ Variable Importance Plot (VIP) เป็นขั้นตอนสำคัญในการประเมินบทบาทและความสำคัญของตัวแปรอิสระที่ส่งผลต่อค่าผลลัพธ์ในโมเดล Partial Least Squares (PLS) ตัวแปรที่มีค่า VIP สูงแสดงถึงความสำคัญที่มากกว่าในการอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลและการทำนายค่าผลลัพธ์ ส่วนตัวแปรที่มีค่า VIP ต่ำจะมีบทบาทน้อยกว่า การวิเคราะห์นี้ช่วยให้สามารถระบุปัจจัยที่มีผลกระทบมากที่สุดในการบวนการทดลองและสามารถนำไปใช้ในการปรับปรุงกระบวนการได้

จากผลการวิเคราะห์ VIP และกราฟที่แสดงค่า VIP (ภาพที่ 4.30) สำหรับตัวแปรต่าง ๆ พบว่ามีตัวแปรบางตัวที่โดดเด่นในแง่ของผลกระทบ โดยเฉพาะ X4 (น้ำหนักวัดถุดิบสมุนไพร), X1(HPBCD) และ X2(Tween 80) ที่มีค่า VIP สูงที่สุดในทุกตัวแปรผลลัพธ์ และถูกพิจารณาเป็น

ปัจจัยที่มีบทบาทสำคัญในการอธิบายความแปรปรวนของผลลัพธ์ ข้อมูลจากตารางยังเสริมความเข้าใจถึงผลกระทบเชิงตัวเลขในแต่ละตัวแปรผลลัพธ์ รายละเอียดของผลการวิเคราะห์มีดังนี้



ภาพที่ 4.30 กราฟความสำคัญของตัวแปร (Variable Importance Plot; VIP)

การวิเคราะห์ตัวแปรที่มีความสำคัญสูง

จากผลการศึกษานี้ตัวแปรที่มีความสำคัญสูงโดยพิจารณาจากการมีค่า VIP มากกว่า 1.0 คือ X4 (น้ำหนักรวตฤติบสมุนไพรร) มีค่า VIP สูงที่สุดที่ 2.61632 ซึ่งสะท้อนถึงความสำคัญที่โดดเด่นในการอธิบายผลลัพธ์ในทุกตัวแปรผลลัพธ์ ค่า Coeff ที่เกี่ยวข้องยังแสดงถึงผลกระทบเชิงบวกที่ชัดเจนในทุกตัวแปร เช่น ค่า Coeff เท่ากับ 9.85836 สำหรับ Compound D, 5.94414 สำหรับ DMPBD, และ 15.3335 สำหรับ DPPH ผลลัพธ์นี้แสดงว่าน้ำหนักรวตฤติบที่เพิ่มขึ้นในช่วงการทดลองมีบทบาทสำคัญในการเพิ่มปริมาณสารสำคัญที่สกัดได้และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ

ตัวแปร X1 (HPBCD) เป็น CD ชนิดหนึ่งที่มีค่า VIP สูงถึง 1.40517 แสดงถึงความสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดสารสำคัญและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ผลกระทบเชิงบวกปรากฏชัดเจน เช่น ค่า Coeff เท่ากับ 1.60635 สำหรับ Compound D, 0.984841 สำหรับ DMPBD, 13.9502 สำหรับ DPPH และ 32.1097 สำหรับ FRAP การใช้ HPBCD ช่วยเพิ่มความสามารถในการละลายของสารสำคัญ ส่งผลให้ได้สารสกัดที่มีปริมาณมากขึ้น

ตัวแปร X2 (Tween 80) มีค่า VIP สูงถึง 1.35519 โดยแสดงผลกระทบเชิงบวกในทุกตัวแปรผลลัพธ์ เช่น ค่า Coeff เท่ากับ 1.43544 สำหรับ Compound D, 0.886553 สำหรับ DMPBD, และ 12.5493 สำหรับ DPPH ผลลัพธ์นี้บ่งชี้ว่า Tween 80 มีบทบาทสำคัญในฐานะสารช่วยละลายที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสกัด

ตัวแปรที่มีความสำคัญระดับกลาง

ตัวแปรที่มีค่า VIP ในช่วง 0.7–1.0 ได้แก่ X7, X1(SBEB CD), และ X1(GCD) ซึ่งมีบทบาทสำคัญในบางตัวแปรผลลัพธ์ ตัวอย่างเช่น X7 มีค่า VIP เท่ากับ 0.934609 และแสดงผลกระทบเชิงบวก เช่น ค่า Coeff เท่ากับ 3.32141 สำหรับ Curcuminoid Content และ 4.86385 สำหรับ DPPH ในขณะที่ X1(SBEB CD) และ X1(GCD) แสดงผลกระทบที่หลากหลาย โดย X1(SBEB CD) แสดงผลกระทบเชิงลบในบางตัวแปร เช่น DMPBD (-0.484985) และ DPPH (-0.329881) ในขณะที่ X1(GCD) แสดงผลกระทบเชิงลบเด่นชัดใน FRAP (-13.3191)

ตัวแปรที่มีความสำคัญต่ำ

ตัวแปรที่มีค่า VIP ต่ำกว่า 0.7 เช่น X5 (เวลาในการสกัด), X3 (ปริมาณ Cyclodextrin), และ X2 (Propylene glycol) มีบทบาทน้อยกว่าในการอธิบายความแปรปรวนของตัวแปรผลลัพธ์ แม้บางตัวแปร เช่น X5 จะแสดงผลกระทบเชิงบวกในบางตัวแปร เช่น FRAP (12.0736) แต่ค่า VIP ที่ต่ำบ่งชี้ว่ามีบทบาทจำกัดในโมเดล

กราฟ VIP แสดงให้เห็นชัดเจนถึงตัวแปรที่มีความสำคัญสูงสุด โดย X4 มีค่า VIP สูงสุดและห่างจากตัวแปรอื่นอย่างชัดเจน ตามมาด้วย X1(HPBCD) และ X2(Tween 80) ที่มีค่า VIP ใกล้เคียงกัน กราฟยังช่วยเน้นให้เห็นตัวแปรที่มีผลกระทบต่ำ เช่น X3 และ X2(Propylene glycol) ซึ่งค่า VIP ใกล้ศูนย์

ผลการวิเคราะห์ VIP แสดงให้เห็นว่า X4 (น้ำหนักวัตถุดิบสมุนไพร), X1(HPBCD), และ X2(Tween 80) เป็นตัวแปรที่มีความสำคัญสูงสุดในโมเดล โดยมีบทบาทสำคัญในการเพิ่มปริมาณสารสำคัญและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ในทางกลับกัน ตัวแปรเช่น X3 (ปริมาณ Cyclodextrin) และ X2(Propylene glycol) มีผลกระทบน้อยกว่า การวิเคราะห์นี้ช่วยเน้นย้ำถึงปัจจัยที่มีความสำคัญที่สุดในกระบวนการสกัดสารสำคัญจากเหง้าไพล และสนับสนุนข้อมูลที่จำเป็นสำหรับการปรับปรุงกระบวนการในอนาคต

4.2.4 บทสรุปผลการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการสกัดสารสำคัญจากเหง้าไพลด้วยวิธี Cyclodextrin-assisted Extraction

การสกัดสารสำคัญจากเหง้าไพลด้วยวิธี Cyclodextrin-assisted Extraction ได้รับการศึกษาในแง่ของผลกระทบจากปัจจัยที่ควบคุม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัดทั้งในด้านปริมาณสารสำคัญที่ได้ และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ โดยโมเดล Partial Least Squares (PLS) ได้ถูกนำมาใช้วิเคราะห์ผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ผลการวิเคราะห์จากทั้งตารางข้อมูลและกราฟสนับสนุนให้

สามารถระบุปัจจัยที่สำคัญได้อย่างชัดเจน โดยในส่วนนี้จะกล่าวถึงผลกระทบในเชิงลึกของแต่ละปัจจัยหลักดังต่อไปนี้

1. ชนิดของไซโคลเด็กซ์ทริน (Type of Cyclodextrin) ชนิดของไซโคลเด็กซ์ทรินที่ใช้ (HPBCD, BCD, MBCD, SBEB CD, และ GCD) มีผลกระทบอย่างชัดเจนต่อการสกัดสารสำคัญจากเหง้าไพล โดยเฉพาะอย่างยิ่ง HPBCD ซึ่งมีค่า VIP สูงที่สุด (1.40517) รองจากน้ำหนักผงสมุนไพร HPBCD แสดงผลกระทบเชิงบวกเด่นชัดในทุกตัวแปร เช่น ค่า Coeff เท่ากับ 1.60635 สำหรับ Compound D, 0.984841 สำหรับ DMPBD, 13.9502 สำหรับ DPPH และ 32.1097 สำหรับ FRAP การที่ HPBCD มีประสิทธิภาพสูงกว่านั้น เนื่องจากโครงสร้างของ HPBCD มีความสามารถในการสร้าง Inclusion Complex ได้ดีกับสารสำคัญในเหง้าไพล เช่น Curcuminoid และสารต้านอนุมูลอิสระ ทำให้ช่วยเพิ่มการละลายและความเสถียรของสารสำคัญ ในทางกลับกัน GCD แสดงผลกระทบในเชิงลบในตัวแปรบางตัว เช่น FRAP (-13.3191) และ ABTS (-3.05006) ซึ่งบ่งชี้ว่าไซโคลเด็กซ์ทรินบางชนิดอาจลดประสิทธิภาพการสกัดหากเลือกใช้ในลักษณะที่ไม่เหมาะสม

2. ชนิดของสารเติมแต่งที่ใช้ช่วยการสกัด (Type of Additive) Tween 80 แสดงผลกระทบเชิงบวกสูงที่สุดในกลุ่มสารเติมแต่ง โดยมีค่า VIP 1.35519 และ Coeff เท่ากับ 1.43544 สำหรับ Compound D, 12.5493 สำหรับ DPPH, และ 32.3882 สำหรับ FRAP ความสามารถของ Tween 80 ในการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดน่าจะเกิดจากคุณสมบัติในการลดแรงตึงผิวของสารช่วยละลาย ซึ่งช่วยให้สารสำคัญในเหง้าไพลสามารถแพร่กระจายได้ดีขึ้นในสารละลาย ในทางกลับกัน Sorbitol และ PEG 400 แสดงผลกระทบเชิงลบในหลายตัวแปร เช่น Compound D (-1.16438) และ DPPH (-4.61378) การที่สารเติมแต่งเหล่านี้มีผลลบอาจเกิดจากความเข้ากันได้ต่ำกับสารสำคัญในเหง้าไพล และความสามารถในการละลายของสารช่วยลดลงในกรณีที่ใช้สารเหล่านี้

3. ความเข้มข้นของไซโคลเด็กซ์ทริน (Concentration of Cyclodextrin) ความเข้มข้นของไซโคลเด็กซ์ทริน (X3) มีค่า VIP ต่ำสุดในกลุ่มปัจจัยที่ศึกษา (0.234951) และแสดงผลกระทบที่จำกัดต่อประสิทธิภาพการสกัดสารสำคัญ โดย Coeff ของ X3 อยู่ในช่วงเชิงลบเล็กน้อยในตัวแปร เช่น Compound D (-0.530757) และ DMPBD (-0.332028) ซึ่งแสดงว่าความเข้มข้นของไซโคลเด็กซ์ทรินมีผลกระทบที่ไม่ชัดเจนเท่ากับชนิดของไซโคลเด็กซ์ทริน อย่างไรก็ตาม การควบคุมความเข้มข้นให้อยู่ในช่วงเหมาะสมยังคงจำเป็นเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด

4. น้ำหนักของผงสมุนไพรที่ใช้ในการสกัด (Weight of Herbal Material) น้ำหนักของผงสมุนไพร (X4) เป็นปัจจัยที่มีผลกระทบมากที่สุดในกระบวนการสกัด โดยมีค่า VIP สูงถึง 2.61632 และแสดง Coeff เชิงบวกในทุกตัวแปร เช่น 9.85836 สำหรับ Compound D, 15.3335 สำหรับ DPPH, และ 46.2016 สำหรับ ABTS การเพิ่มน้ำหนักของสมุนไพรช่วยเพิ่มปริมาณสารสำคัญที่สกัดได้อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากการเพิ่มแหล่งของสารออกฤทธิ์โดยตรง

5. เวลาที่ใช้ในการสกัดด้วยวิธี Ultrasonic-assisted Extraction (Extraction Time)

เวลาในการสกัด (X5) มีผลกระทบในระดับปานกลาง โดยมีค่า VIP เท่ากับ 0.727241 และแสดงผลกระทบทั้งในเชิงบวกและเชิงลบ เช่น Coeff เท่ากับ 1.58999 สำหรับ Curcuminoid content และ -0.964553 สำหรับ Compound D การเพิ่มระยะเวลาในการสกัดสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดในบางกรณี แต่หากนานเกินไป อาจทำให้สารสำคัญบางชนิดเสื่อมสภาพ

6. ระดับพลังงานที่ใช้การสกัดด้วยวิธี Ultrasonic-assisted Extraction (Ultrasonic Power)

พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (X6) แสดงผลกระทบในระดับปานกลาง โดยมีค่า VIP เท่ากับ 0.428415 และ Coeff ที่มีความสำคัญในบางตัวแปร เช่น 8.6614 สำหรับ ABTS และ 12.719 สำหรับ FRAP การเพิ่มพลังงานช่วยเร่งกระบวนการสกัดและช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในบางกรณี แต่ต้องคำนึงถึงความเสี่ยงในการทำลายโครงสร้างของสารสำคัญ

7. ความเข้มข้นของเอทานอลที่ใช้ช่วยในการสกัด (Ethanol Concentration)

เข้มข้นของเอทานอล (X7) มีค่า VIP เท่ากับ 0.934609 โดยแสดงผลกระทบเชิงบวกเด่นชัดในตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ เช่น Coeff เท่ากับ 4.86385 สำหรับ DPPH และ 6.48093 สำหรับ FRAP การเพิ่มความเข้มข้นของเอทานอลในช่วงที่เหมาะสมช่วยเพิ่มการละลายของสารสำคัญ

8. ความเข้มข้นของสารเติมแต่งที่ใช้การสกัด (Additive Concentration)

ของสารเติมแต่ง (X8) มีผลกระทบในระดับที่ต่ำ โดยมีค่า VIP เท่ากับ 0.601646 และแสดง Coeff เชิงบวกในบางตัวแปร เช่น 13.2631 สำหรับ ABTS และ 12.0053 สำหรับ FRAP อย่างไรก็ตาม ความเข้มข้นที่สูงเกินไปของสารเติมแต่ง เช่น Sorbitol อาจมีผลลบในตัวแปรบางตัว เช่น Compound D (-0.174122)

จากการวิเคราะห์ปัจจัยทั้งหมด พบว่า X4 (น้ำหนักรวมสมุนไพร), X1 (HPBCD) และ X2 (Tween 80) เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลสูงสุดต่อปริมาณสารสำคัญที่สกัดได้และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ โดยแสดงให้เห็นถึงบทบาทที่สำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัด ในขณะที่ปัจจัยอื่น ๆ เช่น เวลาในการสกัด (X5), พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (X6) และความเข้มข้นของเอทานอล (X7) แม้ว่าจะมีผลต่อกระบวนการสกัด แต่มีอิทธิพลในระดับรองลงมา ผลการศึกษานี้นำไปสู่ การกำหนดปัจจัยสำคัญ 3 ปัจจัยหลัก ที่ถูกคัดเลือกสำหรับ Screening Study ได้แก่

1. ชนิดของ Cyclodextrin (X1) เลือกใช้ Hydroxypropyl-Beta-Cyclodextrin (HPBCD) เนื่องจากให้ประสิทธิภาพสูงสุดในการเพิ่มการละลายของสารออกฤทธิ์
2. ชนิดของสารเติมแต่ง (X2) เลือกใช้ Tween 80 ซึ่งช่วยเพิ่มการกระจายตัวและเพิ่มการละลายของสารออกฤทธิ์ในระบบ
3. น้ำหนักของสมุนไพร (X4) กำหนดที่ 0.02 mg/mL ซึ่งเป็นปริมาณที่เหมาะสมในการสกัด

จากผลการคัดเลือกนี้ ปัจจัยทั้งสามถูกนำไปใช้เป็นตัวแปรหลักในการศึกษาต่อใน Optimization Study เพื่อกำหนดสถานะที่เหมาะสมที่สุดในการเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดสารออกฤทธิ์จากเหง้าไพล โดยมีเป้าหมายเพื่อพัฒนาเทคนิคการสกัดที่ให้ผลผลิตสูงสุด คุณภาพของสารสำคัญ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

4.3 ผลการศึกษาในขั้นตอน Optimization Study ด้วย Central Composite Design

การศึกษาในขั้นตอน Optimization Study ได้รับการออกแบบและดำเนินการต่อเนื่องจากผลการวิเคราะห์ในขั้นตอน Screening Study โดยมีเป้าหมายเพื่อพัฒนาสถานะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการสกัดสารสำคัญจากเหง้าไพล การออกแบบการทดลองในขั้นตอนนี้ใช้ Central Composite Design (CCD) ซึ่งเป็นรูปแบบของการทดลองแบบ Response Surface Methodology (RSM) ที่มีประสิทธิภาพสูงในการศึกษาผลกระทบของปัจจัยหลายตัว รวมถึงการประเมินผลกระทบเชิงเส้น (Linear Effects) การปฏิสัมพันธ์ของปัจจัย (Interaction Effects) และผลกระทบเชิงกำลังสอง (Quadratic Effects) ต่อค่าการตอบสนอง (Response)

ในขั้นตอน Screening Study ก่อนหน้านี้ ได้ทำการคัดเลือกปัจจัยที่สำคัญต่อกระบวนการสกัดสารสำคัญจากเหง้าไพลจากปัจจัยทั้งหมดที่อาจมีผลต่อค่าการตอบสนอง โดยใช้การวิเคราะห์เชิงสถิติ เช่น การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficient Analysis) การวิเคราะห์ผลกระทบ (Effect Analysis) และการสร้าง Variable Importance Plot (VIP) เพื่อให้เข้าใจถึงความสำคัญของปัจจัย ผลการศึกษาพบว่า 9 ปัจจัยหลัก ที่ส่งผลต่อค่าการตอบสนอง ได้แก่

1. ชนิดของไซโคลเด็กซ์ทรีน (Type of Cyclodextrin, X1)
2. ชนิดของสารเติมแต่ง (Type of Additive, X2)
3. ความเข้มข้นของไซโคลเด็กซ์ทรีน (Cyclodextrin Concentration, X3)
4. น้ำหนักของผงสมุนไพร (Herbal Material Weight, X4)
5. เวลาที่ใช้ในการสกัด (Extraction Time, X5)
6. พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (Ultrasound Power, X6)
7. ความเข้มข้นของเอทานอล (Ethanol Concentration, X7)
8. ความเข้มข้นของสารเติมแต่ง (Additive Concentration, X8)
9. อุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด (Extraction Temperature, X9)

อย่างไรก็ตาม จากผลการวิเคราะห์ในขั้นตอน Screening Study พบว่าบางปัจจัย เช่น ชนิดของไซโคลเด็กซ์ทรีน (X1) และชนิดของสารเติมแต่ง (X2) และน้ำหนักของผงสมุนไพร (X4) มีผลกระทบต่อการสกัดอย่างมีนัยสำคัญ แต่เพื่อความสะดวกในการออกแบบการทดลองในขั้นตอน

Optimization Study ได้มีการกำหนดชนิดของไซโคลเด็กซ์ทรินและสารเติมแต่งเป็นค่าคงที่ (Fixed Factors) รวมไปถึงน้ำหนักของผงสมุนไพรที่ 0.02 g/ml ในขณะที่ปัจจัยอื่น ๆ ที่มีลักษณะเชิงปริมาณ เช่น X3 (ความเข้มข้นของไซโคลเด็กซ์ทริน), X5 (เวลาที่ใช้ในการสกัด), X6 (พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์), X7 (ความเข้มข้นของเอทานอล) X8 (ความเข้มข้นของสารเติมแต่ง) และ X9 (อุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด) ถูกเลือกให้เป็นตัวแปรอิสระ (Independent Variables) ที่จะทำการศึกษาในขั้นตอน

การศึกษาในขั้นตอน Optimization Study จึงมุ่งเน้นไปที่การปรับสภาวะของ 6 ปัจจัยอิสระเชิงปริมาณ ได้แก่ X3, X5, X6, X7, X8 และ X9 เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับค่าการตอบสนอง 6 ค่า (Y1–Y6) ซึ่งประกอบด้วย Y1 ปริมาณ Compound D, Y2 ปริมาณ DMPBD, Y3 ปริมาณ Curcuminoid content, Y4 ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH assay, Y5 ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี ABTS assay และ Y6 ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี FRAP assay

Central Composite Design (CCD) ที่ใช้ในขั้นตอนนี้ได้รับการออกแบบให้เหมาะสมกับการศึกษาผลกระทบของปัจจัยหลักใน 5 แผนการทดลอง (Plan) โดยในแต่ละแผนมีการตั้งค่าระดับของปัจจัยที่แตกต่างกันออกไปเพื่อครอบคลุมพื้นที่การทดลองในรูปแบบเชิงเส้นและเชิงโค้ง (Curvature) รวมถึงการตรวจสอบการปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย นอกจากนี้ยังมีการเพิ่มจุดศูนย์กลาง (Center Point) และจุดที่อยู่นอกกรอบการทดลอง (Axial Points) เพื่อให้ครอบคลุมข้อมูลทั้งในมิติของ Linear และ Quadratic Effects การศึกษานี้จะถูวิเคราะห์และนำเสนอผลลัพธ์ใน 5 แผนการทดลอง (Plan 1–5) เพื่อให้ได้ภาพรวมที่ครอบคลุมของปัจจัยที่มีผลกระทบมากที่สุดต่อกระบวนการสกัดสารสำคัญจากเหง้าไพล โดยการวิเคราะห์จะแบ่งออกเป็น 5 หัวข้อหลัก ได้แก่

1. การวิเคราะห์ความสอดคล้องของแบบจำลอง (Model Adequacy Check)
2. การวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัย (Effect Analysis)
3. การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Model Building)
4. การกำหนดสภาวะที่เหมาะสมที่สุด (Optimization)
5. บทสรุปการวิเคราะห์

4.3.1 ผลการวิเคราะห์ Optimization study Plan 1

การทดลองใน Plan 1 ได้รับการออกแบบโดยใช้ Central Composite Design (CCD) เพื่อศึกษาผลกระทบของปัจจัยกระบวนการต่อประสิทธิภาพของการสกัดสารออกฤทธิ์จากเหง้าไพล โดยมุ่งเน้นไปที่การประเมินประสิทธิภาพของการใช้ Hydroxypropyl-Beta-Cyclodextrin (HPBCD) ร่วมกับเอทานอลและสารเติมแต่ง Tween 80 ซึ่งเป็นระบบตัวทำละลายร่วมที่มีศักยภาพในการเพิ่ม

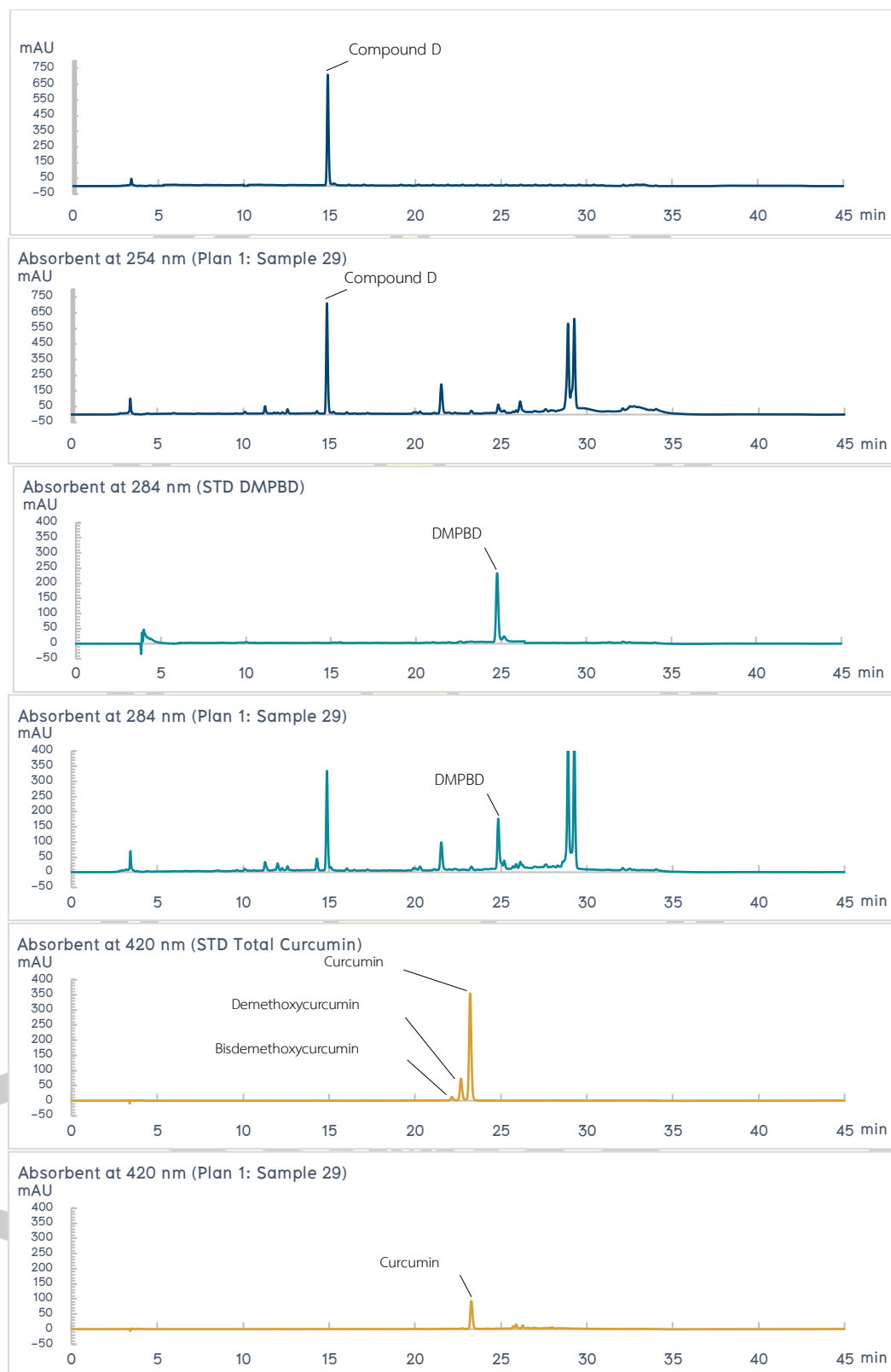
ปริมาณสารออกฤทธิ์ที่สกัดได้ รวมถึงเสริมเสถียรภาพของสารสำคัญ จากผลการศึกษาใน Screening Study พบว่า HPBCD, Tween 80 และน้ำหนักรวมของสมุนไพร (0.02 mg/mL) เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลสำคัญที่สุดต่อการเพิ่มการละลายของสารออกฤทธิ์ ดังนั้น ปัจจัยเหล่านี้จึงถูกกำหนดเป็นค่าคงที่ในขั้นตอน Optimization Study และถูกนำมาใช้เป็นองค์ประกอบหลักของ Plan 1 เพื่อศึกษาการทำงานร่วมกันของระบบ Cyclodextrin-Assisted Extraction (CAE) ภายใต้สภาวะที่แตกต่างกัน

HPBCD เป็น Cyclodextrin ที่มีความสามารถในการสร้าง Inclusion Complex กับสารสำคัญในโพล ทำให้สามารถป้องกันการเสื่อมสภาพของสารจากปัจจัยภายนอก เช่น ความร้อนและออกซิเดชัน นอกจากนี้ เอทานอลยังเป็นตัวทำละลายที่ช่วยเสริมประสิทธิภาพของการเกิด Inclusion Complex และเพิ่มการสกัดสารออกฤทธิ์ได้ดีขึ้น โดยสามารถทำหน้าที่ร่วมกับ HPBCD ในการกักเก็บสารสำคัญและช่วยละลายสารประกอบฟีนอลิกและโพลีฟีนอลที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูง ขณะที่ Tween 80 ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิวจะช่วยเพิ่มการกระจายตัวของสารสำคัญในตัวทำละลาย ลดการตกตะกอนของสาร และช่วยเพิ่มความสามารถในการสกัดสารออกฤทธิ์ การศึกษานี้จึงเป็นการประเมินผลกระทบของ HPBCD ร่วมกับเอทานอลและ Tween 80 ภายใต้สภาวะการสกัดที่แตกต่างกัน เพื่อระบุปัจจัยกระบวนการที่เหมาะสมในการเพิ่มปริมาณสารสำคัญและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดจากโพล โดยมีการศึกษา Process Factors ได้แก่ X3, X5, X6, X7 และ X8 ซึ่งเป็นตัวแปรที่สามารถปรับแต่งได้เพื่อตรวจสอบระดับที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย ข้อมูลรายละเอียดของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองแสดงในตารางที่ 4.5

การวิเคราะห์โครมาโตแกรมของตัวอย่างสารสกัดจากเหง้าโพลใน Plan 1 (ภาพที่ 4.31) ได้รับการดำเนินการโดยใช้เครื่อง HPLC (High-Performance Liquid Chromatography) ซึ่งเป็นเทคนิคที่มีความแม่นยำสูงในการแยกและตรวจวัดสารสำคัญในตัวอย่าง โครมาโตแกรมที่ได้แสดงผลของสารสำคัญในตัวอย่าง โดยเปรียบเทียบกับสารมาตรฐานที่ทราบค่าล่วงหน้า เพื่อประเมินประสิทธิภาพของการสกัดในแต่ละจุดการทดลอง โครมาโตแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์แสดงพีคของสารสำคัญต่าง ๆ ซึ่งประกอบด้วยสารในกลุ่ม Curcuminoids ได้แก่ Curcumin, Demethoxycurcumin (DMC) และ Bisdemethoxycurcumin (BDMC) รวมถึงสารสำคัญที่พบโดยเฉพาะในเหง้าโพลอย่าง Phenybutanoids เช่น Compound D และ DMPBD ลักษณะสำคัญของโครมาโตแกรมคือการปรากฏพีคที่ชัดเจนในตำแหน่งที่ตรงกับเวลา (Retention Time, RT) ของสารมาตรฐาน ซึ่งเป็นการยืนยันว่าการสกัดสามารถแยกสารสำคัญออกมาได้สำเร็จ ในโครมาโตแกรมของตัวอย่างสกัด พบว่าแต่ละพีคของสารมีความคมชัด โดยไม่มีการซ้อนทับกัน (Overlap) อย่างมีนัยสำคัญ การวิเคราะห์พื้นที่ใต้กราฟ (Area Under the Curve, AUC) ของแต่ละพีคสามารถใช้ในการคำนวณปริมาณของสารสำคัญในตัวอย่างได้ ซึ่งค่าที่คำนวณได้ในโครมาโตแกรมนี้มีความสอดคล้องกับค่าการตอบสนอง (Response) ในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการศึกษาการสกัดสารสำคัญจากเหง้าโพลีซันตอน Optimization study Plan 1

DESIGN POINT	PROCESS FACTOR					RESPONSE					
	X3 (mM)	X5 (min)	X6 (W)	X7 (%EtOH)	X8 (%ADD)	Y1 (µg/ml)	Y2 (µg/ml)	Y3 (µg/ml)	Y4 (µM)	Y5 (µM)	Y6 (µM)
N1	10 (-1)	20 (-1)	140 (-1)	20 (-1)	15 (1)	252.862	674.855	172.273	663.53	738.805	1177
N2	30 (1)	20 (-1)	140 (-1)	20 (-1)	5 (-1)	240.387	661.345	167.915	618.91	698.5	1117.5
N3	10 (-1)	40 (1)	140 (-1)	20 (-1)	5 (-1)	276.187	700.39	180.068	741.05	786.945	1293
N4	30 (1)	40 (1)	140 (-1)	20 (-1)	15 (1)	289.181	717.93	186.109	802.445	841.58	1368
N5	10 (-1)	20 (-1)	280 (1)	20 (-1)	5 (-1)	243.086	660.62	169.332	645.175	707.23	1151.5
N6	30 (1)	20 (-1)	280 (1)	20 (-1)	15 (1)	262.301	665.955	174.313	693.68	784.035	1240.5
N7	10 (-1)	40 (1)	280 (1)	20 (-1)	15 (1)	250.926	655.48	171.442	671.925	764.33	1205.5
N8	30 (1)	40 (1)	280 (1)	20 (-1)	5 (-1)	246.108	672.28	170.825	655.49	720.665	1156
N9	10 (-1)	20 (-1)	140 (-1)	30 (1)	5 (-1)	263.287	689.325	174.856	709.98	764.33	1230
N10	30 (1)	20 (-1)	140 (-1)	30 (1)	15 (1)	272.166	682.41	179.729	730.275	753.36	1,287.5
N11	10 (-1)	40 (1)	140 (-1)	30 (1)	15 (1)	271.092	672.41	178.68	740.73	848.52	1291
N12	30 (1)	40 (1)	140 (-1)	30 (1)	5 (-1)	260.413	660.055	173.437	692.235	771.05	1229
N13	10 (-1)	20 (-1)	280 (1)	30 (1)	15 (1)	273.488	656.535	177.596	739.785	784.26	1290
N14	30 (1)	20 (-1)	280 (1)	30 (1)	5 (-1)	243.464	691.69	169.947	646.465	805.98	1,131.5
N15	10 (-1)	40 (1)	280 (1)	30 (1)	5 (-1)	261.788	699.135	174.832	693.985	756.27	1220
N16	30 (1)	40 (1)	280 (1)	30 (1)	15 (1)	249.839	678.58	170.955	653.22	733.43	1158
N17	10 (-1)	30 (0)	210 (0)	25 (0)	10 (0)	294.937	720.48	185.518	805.025	854.645	1,383.5
N18	30 (1)	30 (0)	210 (0)	25 (0)	10 (0)	289.594	720.96	183.17	779.735	847.625	1360
N19	20 (0)	20 (-1)	210 (0)	25 (0)	10 (0)	286.111	714.93	183.149	774.915	832.625	1353
N20	20 (0)	40 (1)	210 (0)	25 (0)	10 (0)	297.214	728.26	186.78	810.73	855.015	1,391.5
N21	20 (0)	30 (0)	140 (-1)	25 (0)	10 (0)	293.031	726	186.079	803.52	846.73	1,389.5
N22	20 (0)	30 (0)	280 (1)	25 (0)	10 (0)	283.497	717.995	181.855	765.99	834.19	1326
N23	20 (0)	30 (0)	210 (0)	20 (-1)	10 (0)	289.26	723.42	183.074	773.6	833.295	1356
N24	20 (0)	30 (0)	210 (0)	30 (1)	10 (0)	288.563	724.8	185.544	783.28	861.36	1359
N25	20 (0)	30 (0)	210 (0)	25 (0)	5 (-1)	284.801	720.48	182.605	765.32	842.995	1,320.5
N26	20 (0)	30 (0)	210 (0)	25 (0)	15 (1)	297.716	722.485	187.349	814.505	874.27	1419
N27	20 (0)	30 (0)	210 (0)	25 (0)	10 (0)	294.518	734.26	188.496	825.655	861.285	1,425.5
N28	20 (0)	30 (0)	210 (0)	25 (0)	10 (0)	296.313	729.805	188.88	809.775	859.72	1,399.5
N29	20 (0)	30 (0)	210 (0)	25 (0)	10 (0)	301.067	730.17	186.04	835.055	876.51	1,401.5



ภาพที่ 4.31 โครมาโทแกรมของตัวอย่างสารสกัดจากเหง้าโพลในขั้นตอน Optimization study Plan 1 และ
สารมาตรฐานวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC

4.3.1.1 การวิเคราะห์ความสอดคล้องของแบบจำลอง (Model Adequacy Check)

ผลการวิเคราะห์ในขั้นตอน Optimization Study Plan 1 ซึ่งประเมินความสอดคล้องของแบบจำลองผ่านตัวชี้วัดสำคัญ ได้แก่ ค่า R^2 , Adjusted R^2 , ค่า Q^2 , การทดสอบ Lack of Fit, ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Residual Standard Deviation; RSD), รวมถึงค่า Model Validity และ Reproducibility เพื่อยืนยันความเหมาะสมและเสถียรภาพของแบบจำลองในการอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลและความสามารถในการพยากรณ์ผลลัพธ์

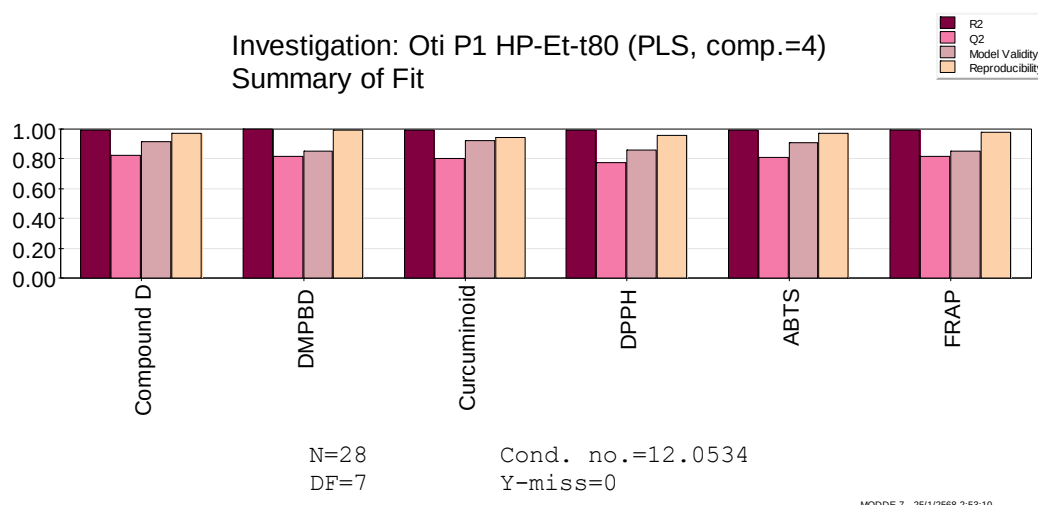
ตารางที่ 4.6 Model Validation Summary ของขั้นตอน Optimization study Plan 1

Parameters	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6
N	29	29	35	29	29	29
R^2	0.994235	0.997686	0.990261	0.989818	0.994508	0.994033
R^2 Adj.	0.977763	0.991073	0.962437	0.960728	0.978816	0.976986
Q^2	0.820573	0.818564	0.800194	0.775834	0.810307	0.815886
RSD	0.580272	0.502108	0.256403	2.54628	1.59816	2.92638

ค่า R^2 แสดงถึงความสามารถของแบบจำลองในการอธิบายความแปรปรวนในข้อมูล โดยค่าที่ใกล้เคียง 1 หมายถึงความแม่นยำสูงสุด จาก ตาราง Model Validation Summary (ตารางที่ 4.6) ค่า R^2 สำหรับค่าการตอบสนอง Y1 ถึง Y6 มีค่าตั้งแต่ 0.989818 ถึง 0.997686 โดยค่าที่สูงสุดพบใน Y2 ซึ่งมีค่า $R^2=0.997686$ แสดงถึงการอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลเกือบสมบูรณ์

ค่า Adjusted R^2 ซึ่งปรับปรุงค่า R^2 โดยพิจารณาจำนวนตัวแปรในแบบจำลอง มีค่าตั้งแต่ 0.960728 ถึง 0.991073 แสดงถึงความเหมาะสมของแบบจำลองหลังการปรับปรุง โดยเฉพาะใน Y2 และ Y1 ซึ่ง Adjusted R^2 สูงถึง 0.991073 และ 0.977763 ตามลำดับ สะท้อนถึงความเสถียรของแบบจำลอง

ค่า Q^2 ใช้ประเมินความสามารถของแบบจำลองในการพยากรณ์ผลสำหรับข้อมูลใหม่ ค่า Q^2 ที่มากกว่า 0.5 แสดงถึงความสามารถในการพยากรณ์ที่ดี โดยค่า Q^2 ของ Y1 ถึง Y6 มีค่าตั้งแต่ 0.775834 ถึง 0.820573 ซึ่งแสดงว่าแบบจำลองมีศักยภาพสูงในการทำนายผลลัพธ์ โดยเฉพาะใน Y1 (Compound D) และ Y2 (DMPBD) ซึ่งมีค่า Q^2 ใกล้เคียง 0.82 แสดงถึงความน่าเชื่อถือสูงสุดในการพยากรณ์



ภาพที่ 4.32 กราฟ Summary of Fit แสดงผลค่า R^2 และ Q^2 สำหรับแต่ละตัวแปรของ ขั้นตอน Optimization study Plan 1

Model Validity ใช้ประเมินความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง โดยค่าที่สูงกว่า 0.5 บ่งชี้ว่าโมเดลสามารถตรวจจับสัญญาณสำคัญในข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากกราฟ Summary of Fit ค่า Model Validity ของค่าการตอบสนอง Y1 ถึง Y6 อยู่ในระดับสูงเกินกว่า 0.85 ทุกค่า สะท้อนถึงความสามารถของโมเดลในการอธิบายความสัมพันธ์ในข้อมูลอย่างเหมาะสม

Reproducibility แสดงถึงความสามารถของแบบจำลองในการสร้างผลลัพธ์ซ้ำได้เมื่ออยู่ในเงื่อนไขเดียวกัน ค่า Reproducibility ที่สูงกว่า 0.8 แสดงถึงความเสถียรของโมเดล จากกราฟพบว่าค่า Reproducibility สำหรับ Y1 ถึง Y6 อยู่ในระดับสูงกว่า 0.9 ทุกค่าการตอบสนอง สะท้อนถึงความแม่นยำและเสถียรภาพของแบบจำลอง

ผลการวิเคราะห์ความสอดคล้องของแบบจำลองใน Plan 1 (ภาพที่ 4.32) ยืนยันว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นมีความเหมาะสมและมีความสามารถสูงในการอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลค่าทางสถิติ เช่น R^2 , Adjusted R^2 , Q^2 , Model Validity, และ Reproducibility ต่างอยู่ในระดับสูง และค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (RSD) ที่ต่ำสนับสนุนว่าแบบจำลองมีความแม่นยำและความน่าเชื่อถือสูง เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้วิเคราะห์และพยากรณ์ค่าการตอบสนอง

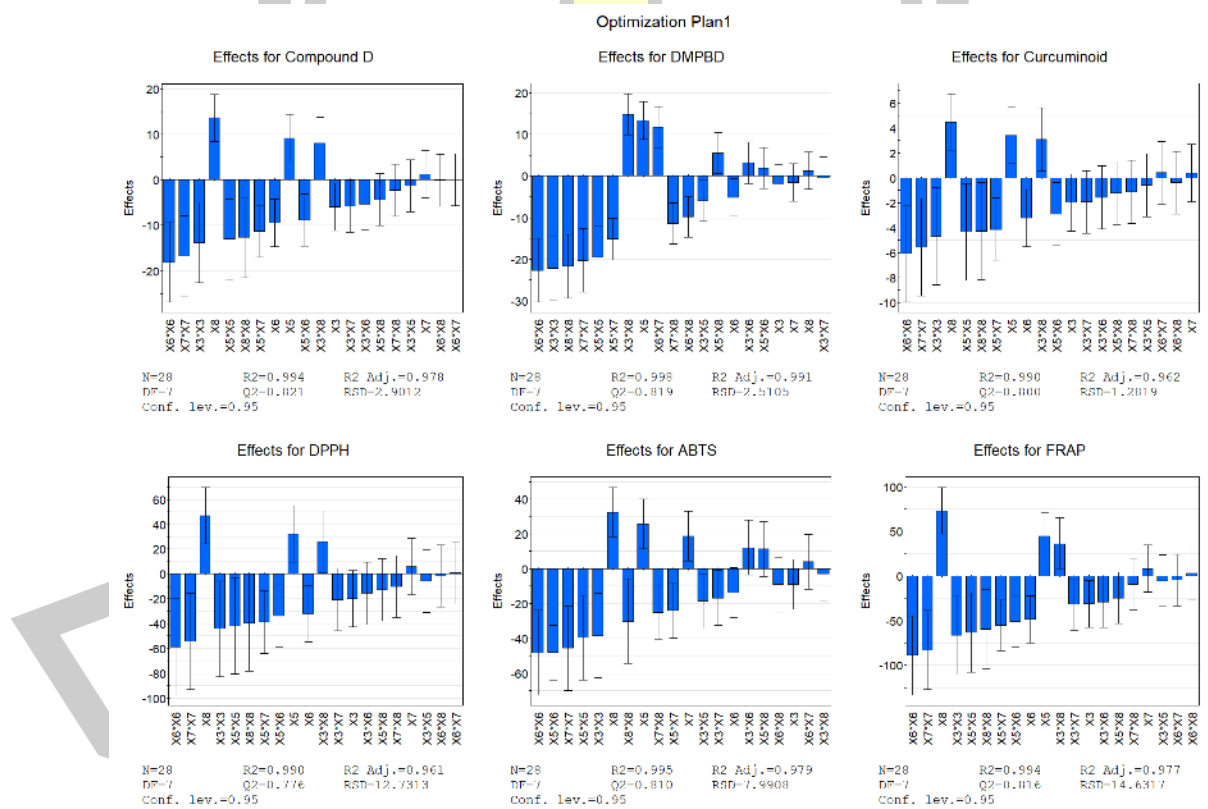
4.3.1.2 การวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัย (Effect Analysis)

ในการศึกษาขั้นตอน Optimization Study Plan 1 ด้วย Central Composite Design ได้ทำการวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีต่อค่าการตอบสนอง (Y1 ถึง Y6) เพื่อให้เข้าใจถึงความสัมพันธ์เชิงลึกระหว่างปัจจัยกระบวนการและผลลัพธ์ที่ได้ การวิเคราะห์นี้ถูกแบ่งออกเป็น 4

ส่วนสำคัญ ได้แก่ การวิเคราะห์ผลกระทบหลัก (Main Effects Analysis), การวิเคราะห์ผลกระทบของการปฏิสัมพันธ์ (Interaction Effects Analysis), ผลกระทบเชิงกำลังสอง (Quadratic Effects), (ภาพที่ 4.33) และการวิเคราะห์ Contour Plot และ Surface Plot โดยผลการศึกษาส่งสะท้อนถึงผลกระทบของปัจจัยสำคัญในกระบวนการสกัดสารสำคัญจากเหง้าไพล ดังรายละเอียดต่อไปนี้

การวิเคราะห์ผลกระทบหลัก (Main Effects Analysis) ของ Optimization Study Plan 1

การศึกษานี้พิจารณาผลกระทบของแต่ละปัจจัยอิสระที่ส่งผลโดยตรงต่อค่าการตอบสนอง โดยไม่คำนึงถึงผลของปัจจัยอื่น ๆ ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าปัจจัยที่มีบทบาทสำคัญต่อค่าการตอบสนอง ได้แก่ X3 (ไซโคลเด็กซ์ทรีน), X5 (เวลาสกัด), X6 (พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์), X7 (ความเข้มข้นของเอทานอล) และ X8 (สารเติมแต่ง) ดังนี้



ภาพที่ 4.33 ผลการวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยต่อค่าการตอบสนองใน Optimization Study Plan 1

ปริมาณ Compound D (Y1) พบว่าปัจจัย X6 (-9.44) และ X3 (-5.96) ส่งผลเชิงลบต่อปริมาณ Compound D ที่ถูกสกัด ขณะที่ X8 (13.59) และ X5 (9.18) มีผลกระทบเชิงบวก

โดยเฉพาะ X8 ซึ่งช่วยเพิ่มปริมาณการสกัดได้อย่างมีนัยสำคัญ และ X7 ส่งผลในเชิงบวกเล็กน้อยต่อการตอบสนอง

ปริมาณ DMPBD (Y2) พบว่า X6 (-5.12) มีผลกระทบทางลบต่อปริมาณ DMPBD ในขณะที่ X5 (13.32) ส่งผลในเชิงบวกอย่างชัดเจน นอกจากนี้ X8 (1.31) มีผลเชิงบวกเล็กน้อย ส่วน X3 (-1.79) และ X7 (-1.54) ส่งผลในเชิงลบเล็กน้อยต่อการตอบสนอง

ปริมาณ Curcuminoid (Y3) พบว่าปัจจัย X6 (-3.23) และ X3 (-1.98) มีผลกระทบเชิงลบเล็กน้อย ในขณะที่ X8 (4.45) และ X5 (3.42) ส่งผลในเชิงบวก โดย X8 มีบทบาทสำคัญที่สุดในการเพิ่มปริมาณ Curcuminoid และ X7 ส่งผลในเชิงบวกเล็กน้อยต่อการตอบสนอง

ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH (Y4) ปัจจัย X6 (-31.84) และ X3 (-20.04) มีผลกระทบเชิงลบที่เด่นชัดต่อฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH ในขณะที่ X5 (32.32) และ X8 (46.98) ส่งผลเชิงบวก โดยเฉพาะ X8 ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระได้มากที่สุด ในขณะที่ X7 ส่งผลในเชิงบวกเล็กน้อยต่อการตอบสนอง

ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ABTS (Y5) พบว่า X6 (-13.68) มีผลกระทบทางลบต่อฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ABTS ส่วน X3 ส่งผลในเชิงลบเล็กน้อยต่อการตอบสนอง ในขณะที่ X7 (18.78), X5 (25.73) และ X8 (32.45) ส่งผลเชิงบวก โดยเฉพาะ X8 ซึ่งช่วยเพิ่มฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ABTS ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ FRAP (Y6) พบว่า X6 (-48.57) และ X3 (-31.26) ส่งผลกระทบเชิงลบอย่างชัดเจนต่อฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ FRAP ในขณะที่ X5 (44.52) และ X8 (73.17) ส่งผลเชิงบวก โดยเฉพาะ X8 ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระได้มากที่สุด

จากการศึกษาพบว่า X6 และ X3 มีแนวโน้มส่งผลกระทบเชิงลบต่อการตอบสนอง โดยเฉพาะฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ขณะที่ X8 และ X5 มีแนวโน้มส่งผลในเชิงบวก โดยเฉพาะ X8 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความเข้มข้นของสารเติมแต่งช่วยเสริมประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้น การควบคุมค่าของปัจจัยเหล่านี้ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดและคุณภาพของสารสกัดที่ได้

การวิเคราะห์ผลกระทบของการปฏิสัมพันธ์ (Interaction Effects Analysis) ใน Optimization Study Plan 1

การวิเคราะห์ผลกระทบของการปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยเป็นส่วนสำคัญของการศึกษาประสิทธิภาพการสกัดสารสำคัญจากเหง้าไพล โดยใช้ Central Composite Design ใน Optimization Study Plan 1 ปัจจัยต่าง ๆ ที่นำมาศึกษา ซึ่งการปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยเหล่านี้สามารถส่งผลต่อการตอบสนอง (Y1 ถึง Y6) อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะในกรณีที่มีปัจจัยสองตัว

ทำงานร่วมกันและสร้างผลกระทบที่ไม่สามารถอธิบายได้โดยผลของปัจจัยเดียวเท่านั้น การวิเคราะห์ผลกระทบของการปฏิสัมพันธ์ต่อค่าการตอบสนอง

ปริมาณ Compound D (Y1) การปฏิสัมพันธ์ที่มีผลกระทบสูงสุด ได้แก่ X5X7 (-11.31) และ X5X6 (-8.91) ซึ่งส่งผลเชิงลบต่อปริมาณ Compound D ที่สกัดได้ ขณะที่ X3X8 (8.02) มีผลเชิงบวกต่อปริมาณสารสกัด นอกจากนี้ X3X7 (-5.84), X3X6 (-5.36), X5X8 (-4.33), X7X8 (-2.33), และ X3X5 (-1.27) มีผลกระทบทางลบต่อค่าการตอบสนองในระดับปานกลาง ในขณะที่ X6X8 (-0.09) และ X6X7 (0.02) ส่งผลกระทบน้อยต่อค่าการตอบสนอง

ปริมาณ DMPBD (Y2) พบว่าปฏิสัมพันธ์ X5X7 (-15.15) และ X7X8 (-11.42) มีผลกระทบทางลบที่สำคัญ ขณะที่ X3X8 (14.82) และ X5X8 (5.52) ส่งผลบวกต่อปริมาณ DMPBD ที่สกัดได้ นอกจากนี้ X6X7 (11.72) และ X3X6 (3.19) ส่งผลเชิงบวกเล็กน้อยต่อค่าการตอบสนอง ส่วน X6X8 (-9.79), X3X5 (-5.90), และ X5X6 (1.94) แสดงผลกระทบที่แตกต่างกันไป

ปริมาณ Curcuminoid (Y3) การปฏิสัมพันธ์ X5X7 (-4.14) และ X3X7 (-1.94) มีผลกระทบเชิงลบต่อปริมาณ Curcuminoid ที่สกัดได้ ในขณะที่ X3X8 (3.08) และ X5X8 (-1.22) มีผลในเชิงบวกและลบตามลำดับ นอกจากนี้ X3X6 (-1.58), X7X8 (-1.13), และ X6X8 (-0.39) มีผลกระทบในระดับเล็กน้อยต่อค่าการตอบสนอง

ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH (Y4) พบว่าการปฏิสัมพันธ์ X5X7 (-38.81) และ X5X6 (-33.80) มีผลกระทบทางลบที่ชัดเจนต่อฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH ในขณะที่ X3X8 (25.89) ส่งผลบวกต่อค่าการตอบสนอง นอกจากนี้ X3X7 (-20.69), X3X6 (-15.68), และ X5X8 (-12.86) มีผลกระทบในระดับปานกลาง ขณะที่ X6X8 (-1.60) และ X6X7 (0.84) ส่งผลเล็กน้อย

ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ABTS (Y5) ปฏิสัมพันธ์ X5X6 (-48.14) และ X5X7 (-23.82) มีผลกระทบทางลบอย่างชัดเจน ขณะที่ X3X6 (12.17) และ X5X8 (11.35) มีผลกระทบเชิงบวก นอกจากนี้ X3X5 (-18.49), X3X7 (-16.69), X7X8 (-24.98), และ X6X8 (-8.99) มีผลกระทบที่แตกต่างกันไป ขณะที่ X6X7 (4.03) และ X3X8 (-2.91) มีผลในระดับเล็กน้อย

ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ FRAP (Y6) พบว่าการปฏิสัมพันธ์ X5X7 (-54.87) และ X5X6 (-50.70) ส่งผลกระทบนegatively อย่างชัดเจนต่อฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ FRAP ในขณะที่ X3X8 (36.07) มีผลเชิงบวก นอกจากนี้ X3X7 (-31.65), X3X6 (-28.93), X5X8 (-24.53), และ X7X8 (-9.06) มีผลกระทบที่แตกต่างกันไป ขณะที่ X6X7 (-4.54) และ X6X8 (3.05) มีผลกระทบเพียงเล็กน้อย

จากผลการศึกษาพบว่าปัจจัย X5 (เวลาสกัด) และ X7 (ความเข้มข้นของเอทานอล) มีการปฏิสัมพันธ์เชิงลบที่สำคัญในหลายค่าการตอบสนอง ซึ่งบ่งชี้ว่าการควบคุมเวลาสกัดและความเข้มข้นของเอทานอลอยู่ในช่วงที่เหมาะสมเป็นสิ่งสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพของการสกัด ในทางกลับกัน

ปฏิสัมพันธ์ระหว่าง $X_3 \times X_8$ มีแนวโน้มเป็นปัจจัยที่ช่วยเพิ่มปริมาณสารที่สกัดได้และเพิ่มฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ

การวิเคราะห์ผลกระทบของการปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยช่วยให้เข้าใจถึงความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนในกระบวนการสกัด และสามารถนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ในการปรับปรุงเงื่อนไขการสกัดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของสารสกัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การวิเคราะห์ผลกระทบเชิงกำลังสอง (Quadratic Effects Analysis) ใน Optimization Study Plan 1

การวิเคราะห์ผลกระทบเชิงกำลังสอง (Quadratic Effects Analysis) เป็นอีกหนึ่งขั้นตอนสำคัญในการทำความเข้าใจพฤติกรรมของปัจจัยในกระบวนการสกัดสารสำคัญจากเหง้าพล โดยใช้ Central Composite Design ใน Optimization Study Plan 1 การศึกษานี้ช่วยให้เห็นถึงแนวโน้มของค่าการตอบสนองเมื่อค่าของปัจจัยเปลี่ยนแปลงในระดับที่สูงขึ้นหรือต่ำลงจากจุดกึ่งกลาง ซึ่งสามารถสะท้อนถึงปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น เช่น ความอิ่มตัวของตัวทำละลาย หรือการเสื่อมสลายของสารสำคัญเมื่อปัจจัยอยู่ในระดับที่สูงเกินไป การวิเคราะห์ผลกระทบเชิงกำลังสองต่อค่าการตอบสนองดังนี้

ปริมาณ Compound D (Y1) ปัจจัย $X_6 \times X_6$ (-18.05) และ $X_7 \times X_7$ (-16.74) มีผลกระทบเชิงลบที่สูงที่สุด แสดงให้เห็นว่าหากพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์หรือความเข้มข้นของเอทานอลสูงเกินไป อาจลดประสิทธิภาพของการสกัด Compound D นอกจากนี้ $X_3 \times X_3$ (-13.80), $X_5 \times X_5$ (-13.02) และ $X_8 \times X_8$ (-12.64) แสดงให้เห็นว่าเมื่อปัจจัยเหล่านี้อยู่ในระดับที่สูงเกินไป อาจทำให้การสกัดสารลดลง ซึ่งอาจเกิดจากการสลายตัวของสารสำคัญ

ปริมาณ DMPBD (Y2) พบว่าปัจจัย $X_6 \times X_6$ (-22.66) และ $X_3 \times X_3$ (-22.15) มีผลกระทบทางลบที่สูงที่สุดต่อการสกัด DMPBD ซึ่งบ่งบอกว่าหากพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์หรือปริมาณไฮโคลเด็กซ์ทรินสูงเกินไป อาจทำให้เกิดภาวะอิ่มตัวของสารสกัดและลดประสิทธิภาพของกระบวนการ นอกจากนี้ $X_8 \times X_8$ (-21.65), $X_7 \times X_7$ (-20.27) และ $X_5 \times X_5$ (-19.52) ยังมีผลกระทบเชิงลบต่อปริมาณ DMPBD ที่สกัดได้ แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการควบคุมระดับของปัจจัยให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม

ปริมาณ Curcuminoid (Y3) พบว่าปัจจัย $X_6 \times X_6$ (-6.07) และ $X_7 \times X_7$ (-5.57) มีผลกระทบเชิงลบต่อปริมาณ Curcuminoid ที่สกัดได้ แสดงว่าหากใช้พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์หรือความเข้มข้นของเอทานอลในระดับที่สูงเกินไป อาจทำให้เกิดการเสื่อมสลายของสารสำคัญ นอกจากนี้ $X_3 \times X_3$ (-4.67), $X_5 \times X_5$ (-4.34) และ $X_8 \times X_8$ (-4.27) ยังมีผลกระทบเชิงลบในระดับที่ใกล้เคียงกัน

ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH (Y4) การวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าปัจจัย $X_6 \times X_6$ (-58.89) และ $X_7 \times X_7$ (-54.39) มีผลกระทบเชิงลบที่รุนแรงที่สุด ซึ่งหมายความว่าการใช้พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์

หรือความเข้มข้นของเอทานอลที่สูงเกินไป อาจลดฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารที่สกัดได้ นอกจากนี้ X3X3 (-44.21), X5X5 (-41.77) และ X8*X8 (-39.59) ยังแสดงผลกระทบเชิงลบต่อฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH

ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ABTS (Y5) พบว่าปัจจัย X6X6 (-48.21) และ X7X7 (-45.59) มีผลกระทบเชิงลบอย่างมีนัยสำคัญต่อฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ABTS เช่นเดียวกับ X5X5 (-39.41) และ X3X3 (-38.37) ซึ่งบ่งบอกว่าค่าปัจจัยที่สูงเกินไปอาจทำให้ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระลดลง นอกจากนี้ X8*X8 (-30.10) มีผลกระทบในระดับปานกลาง

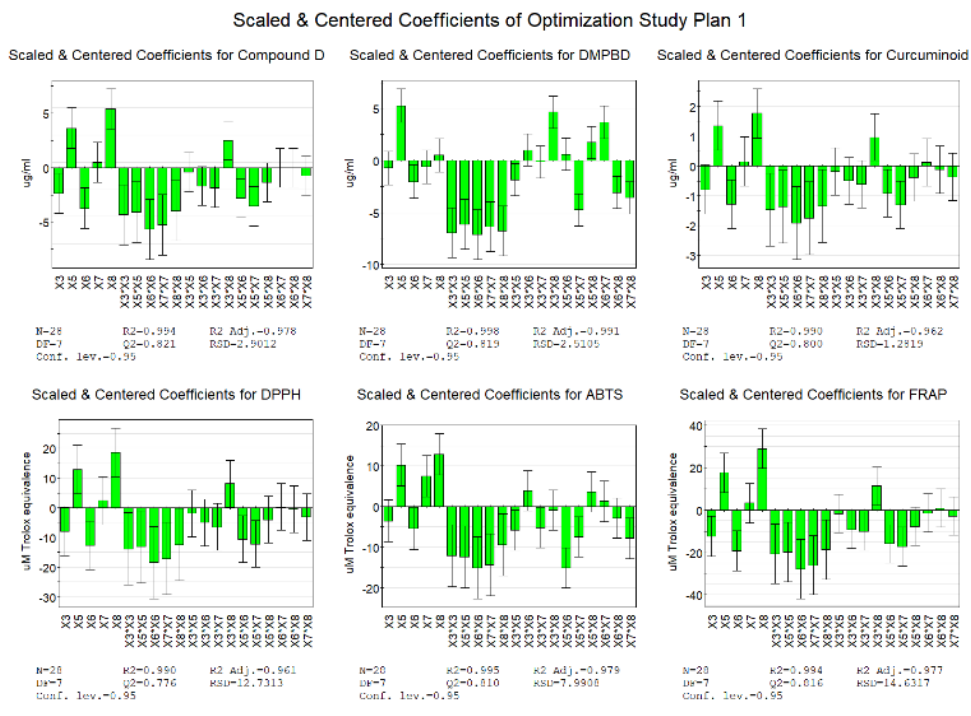
ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ FRAP (Y6) พบว่าปัจจัย X6X6 (-88.89) และ X7X7 (-82.82) มีผลกระทบเชิงลบที่รุนแรงที่สุด แสดงให้เห็นว่าหากใช้พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์หรือความเข้มข้นของเอทานอลสูงเกินไป อาจทำให้สารต้านอนุมูลอิสระเสื่อมสลาย นอกจากนี้ X3X3 (-66.07), X5X5 (-63.08) และ X8*X8 (-59.63) ยังมีผลกระทบเชิงลบต่อฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ FRAP เช่นกัน

จากผลการศึกษาพบว่าปัจจัย X6X6 และ X7X7 เป็นตัวแปรที่มีผลกระทบเชิงลบมากที่สุดในทุกค่าการตอบสนอง ซึ่งบ่งชี้ว่าการควบคุมพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์และความเข้มข้นของเอทานอลให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมเป็นสิ่งสำคัญ นอกจากนี้ X3X3, X5X5 และ X8*X8 ก็มีแนวโน้มแสดงผลกระทบเชิงลบต่อปริมาณสารที่สกัดได้และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ดังนั้น การกำหนดค่าของปัจจัยให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัด

การวิเคราะห์ผลกระทบเชิงกำลังสองช่วยให้เข้าใจถึงพฤติกรรมของปัจจัยเมื่อเปลี่ยนแปลงในระดับที่สูงหรือต่ำกว่าจุดกึ่งกลาง และสามารถนำข้อมูลนี้ไปใช้เพื่อกำหนดช่วงที่เหมาะสมของปัจจัยแต่ละตัว เพื่อให้ได้สารสกัดที่มีปริมาณสูงและมีฤทธิ์ทางชีวภาพที่ดีที่สุด

4.3.1.3 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Model Building) ใน Optimization Study Plan 1

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นขั้นตอนสำคัญในการวิเคราะห์และทำนายผลของกระบวนการสกัดสารสำคัญจากเหง้าไพล โดยใช้ Central Composite Design (CCD) ภายใต้ Optimization Study Plan 1 การสร้างแบบจำลองนี้ช่วยให้สามารถคำนวณค่าการตอบสนองที่คาดการณ์ได้และระบุระดับที่เหมาะสมของปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการสกัด โดยใช้สมการเชิงคณิตศาสตร์ที่พัฒนาโดยการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุ (Multiple Regression Analysis) และ Response Surface Methodology (RSM) (ภาพที่ 4.34)



**ภาพที่ 4.34 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของปัจจัยที่มีผลต่อค่าการตอบสนอง
ใน Optimization Study Plan 1**

- **การสร้างแบบจำลองสำหรับ Compound D ของ Optimization Study Plan 1**

การศึกษาการสกัด Compound D อาศัยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้การถดถอยเชิงพหุ (Multiple Regression Analysis) เพื่อนำเสนอสมการที่สามารถอธิบายพฤติกรรมของกระบวนการสกัดได้อย่างแม่นยำต่อปัจจัยที่นำมาพิจารณา นอกจากนี้ยังวิเคราะห์ผลกระทบเชิงกำลังสองและปฏิสัมพันธ์ของปัจจัยเหล่านี้ต่อปริมาณ Compound D ที่สกัดได้

สมการเชิงพหุนามที่ใช้พยากรณ์ค่าการตอบสนองของ Compound D สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 Y_1 = & 297.447 - 2.3606X_3 + 3.64006X_5 - 3.74089X_6 + 0.491555X_7 + 5.38491X_8 - \\
 & 4.3363X_3^2 - 4.09026X_5^2 - 5.67094X_6^2 - 5.2604X_7^2 - 3.96976X_8^2 - \\
 & 0.398684X_3X_5 - 1.68257X_3X_6 - 1.83372X_3X_7 + 2.51959X_3X_8 - 2.7986X_5X_6 - \\
 & 3.55179X_5X_7 - 1.36127X_5X_8 + 0.00505934X_6X_7 - 0.0291449X_6X_8 - \\
 & 0.733538X_7X_8
 \end{aligned}$$

ปัจจัยเชิงเส้นที่มีผลต่อค่าการตอบสนอง พบว่าการเพิ่มสารเติมแต่ง (X8) ช่วยให้ปริมาณ Compound D ที่สกัดได้เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (X6) และไซโคลเด็กซ์ทรีน (X3) มีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้ในระดับที่สูงเกินไป ปัจจัยเวลาสกัด (X5) มีผลในเชิงบวกอย่างชัดเจน ส่วนความเข้มข้นของเอทานอล (X7) ไม่มีผลกระทบที่มีนัยสำคัญต่อปริมาณ Compound D

ผลกระทบเชิงกำลังสองแสดงให้เห็นว่า เมื่อค่าของ X3, X5, X6, X7 และ X8 สูงเกินกว่าระดับที่เหมาะสม ปริมาณ Compound D จะลดลง ซึ่งอาจเป็นผลจากภาวะอิ่มตัวของสารที่ละลายหรือการสลายตัวของสารสำคัญที่เกิดขึ้นในกระบวนการสกัด นอกจากนี้ปัจจัยปฏิสัมพันธ์ยังมีบทบาทสำคัญ โดยพบว่าการทำงานร่วมกันของไซโคลเด็กซ์ทรีนและสารเติมแต่ง (X3X8) ส่งผลบวกต่อปริมาณ Compound D อย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่การปฏิสัมพันธ์ระหว่างเวลาสกัดและพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (X5X6) และระหว่างเวลาสกัดและความเข้มข้นของเอทานอล (X5X7) มีแนวโน้มลดทอนประสิทธิภาพของกระบวนการสกัด

แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นได้รับการประเมินความถูกต้องโดยพิจารณาค่าทางสถิติสำคัญ ค่าเท่ากับ 0.994 แสดงว่าแบบจำลองสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้ในระดับสูง ค่า Adjusted เท่ากับ 0.978 แสดงให้เห็นว่าไม่มีปัญหา overfitting และค่า RSD (Root Standard Deviation) เท่ากับ 2.9012 บ่งชี้ว่าแบบจำลองมีความคลาดเคลื่อนต่ำ และสามารถใช้ทำนายค่าการตอบสนองได้อย่างแม่นยำ นอกจากนี้ ค่า p-value ของ Lack of Fit มีค่ามากกว่า 0.05 แสดงว่าแบบจำลองมีความเหมาะสมและไม่มีปัญหาในการอธิบายข้อมูล

จากผลการศึกษาพบว่า สมการที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้ทำนายปริมาณ Compound D ที่สกัดได้อย่างแม่นยำ ปัจจัยที่มีอิทธิพลสูงสุดคือสารเติมแต่ง ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการสกัด ในขณะที่การใช้พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์และความเข้มข้นของเอทานอลในระดับที่สูงเกินไปอาจส่งผลให้ปริมาณสารที่สกัดได้ลดลง ความเข้าใจเชิงลึกเกี่ยวกับผลกระทบของปัจจัยเหล่านี้จะช่วยให้สามารถกำหนดสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสกัด Compound D ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

● การสร้างแบบจำลองสำหรับ DMPBD ของ Optimization Study Plan 1

การศึกษาการสกัด DMPBD ใช้การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยอาศัยการถดถอยเชิงพหุ (Multiple Regression Analysis) เพื่อพัฒนาสมการที่สามารถทำนายค่าการตอบสนองได้อย่างแม่นยำ ปัจจัยที่ถูกนำมาพิจารณาในแบบจำลองประกอบด้วย ไซโคลเด็กซ์ทรีน (X3) เวลาสกัด (X5) พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (X6) ความเข้มข้นของเอทานอล (X7) และสารเติมแต่ง (X8) รวมถึงปัจจัยเชิงกำลังสองและปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยเหล่านี้ต่อปริมาณ DMPBD ที่สกัดได้

สมการเชิงพหุนามที่ใช้พยากรณ์ค่าการตอบสนองของ DMPBD สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} Y2 = & 732.098 - 0.711352X3 + 5.2796X5 - 2.02894X6 - 0.611928X7 + 0.518613X8 - \\ & 6.95941X3^2 - 6.13299X5^2 - 7.1192X6^2 - 6.36655X7^2 - 6.79992X8^2 - \\ & 1.85383X3X5 + 1.00283X3X6 - 0.135519X3X7 + 4.65604X3X8 + \\ & 0.607928X5X6 - 4.76049X5X7 + 1.73272X5X8 + 3.68077X6X7 - \\ & 3.0771X6X8 - 3.58813X7X8 \end{aligned}$$

การวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยเชิงเส้น พบว่าเวลาสกัด (X5) มีอิทธิพลเชิงบวกอย่างมีนัยสำคัญต่อปริมาณ DMPBD ที่สกัดได้ แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มระยะเวลาการสกัดช่วยให้สารออกฤทธิ์ถูกปลดปล่อยออกมาได้มากขึ้น ในขณะที่พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (X6) และไซโคลเด็กซ์ทริน (X3) มีผลกระทบในเชิงลบต่อปริมาณ DMPBD เมื่อใช้ในระดับที่สูงเกินไป ซึ่งอาจเกิดจากการสลายตัวของสารหรือการลดประสิทธิภาพของตัวทำละลาย ความเข้มข้นของเอทานอล (X7) และสารเติมแต่ง (X8) ไม่มีผลกระทบที่มีนัยสำคัญต่อปริมาณ DMPBD ที่สกัดได้

ผลกระทบเชิงกำลังสองของปัจจัยแสดงให้เห็นว่า หากค่าของ X3, X5, X6, X7 และ X8 สูงเกินระดับที่เหมาะสม จะส่งผลให้ปริมาณ DMPBD ลดลง ซึ่งสะท้อนถึงความเป็นไปได้ของภาวะอิ่มตัวของระบบการสกัดหรือการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของสารที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการ นอกจากนี้ยังพบว่าปัจจัยปฏิสัมพันธ์มีบทบาทสำคัญต่อปริมาณ DMPBD ที่สกัดได้ โดยการทำงานร่วมกันของไซโคลเด็กซ์ทรินและสารเติมแต่ง (X3X8) มีผลเชิงบวกที่ชัดเจน แสดงว่าการใช้สารเติมแต่งร่วมกับไซโคลเด็กซ์ทรินสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดได้ ในขณะที่การปฏิสัมพันธ์ระหว่างเวลาสกัดและความเข้มข้นของเอทานอล (X5X7) มีผลกระทบเชิงลบอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งอาจเกิดจากความเข้มข้นของเอทานอลที่สูงเกินไปส่งผลต่อโครงสร้างของสารสกัดและลดประสิทธิภาพของกระบวนการแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นได้รับการประเมินคุณภาพโดยใช้ตัวชี้วัดทางสถิติสำคัญ ค่า เท่ากับ 0.998 แสดงว่าแบบจำลองสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้ในระดับสูงมาก ค่า Adjusted เท่ากับ 0.991 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองไม่มีปัญหา overfitting และค่า RSD (Root Standard Deviation) เท่ากับ 2.5105 บ่งชี้ว่าแบบจำลองมีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำ และสามารถนำไปใช้ทำนายค่าการตอบสนองได้อย่างแม่นยำ นอกจากนี้ ค่า p-value ของ Lack of Fit มีค่ามากกว่า 0.05 แสดงว่าแบบจำลองสามารถใช้อธิบายข้อมูลได้อย่างเหมาะสม

จากผลการศึกษาพบว่า สมการที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้ทำนายปริมาณ DMPBD ที่สกัดได้อย่างแม่นยำ ปัจจัยที่มีผลกระทบมากที่สุดคือเวลาสกัด ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญที่ช่วยเพิ่มปริมาณสารสกัด ในขณะที่การใช้พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์และความเข้มข้นของไซโคลเด็กซ์ทรินในระดับสูงอาจลด

ประสิทธิภาพของการสกัดลง การทำความเข้าใจเกี่ยวกับผลกระทบของปัจจัยเหล่านี้จะช่วยให้สามารถกำหนดสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกระบวนการสกัด DMPBD ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

● การสร้างแบบจำลองสำหรับ Curcuminoid ของ Optimization Study Plan 1

การศึกษาการสกัด Curcuminoid ใช้การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยอาศัยการถดถอยเชิงพหุ (Multiple Regression Analysis) เพื่อพัฒนาสมการที่สามารถทำนายค่าการตอบสนองได้อย่างแม่นยำ ปัจจัยที่ถูกนำมาพิจารณาในแบบจำลองประกอบด้วย ไซโคลเด็กซ์ทริน (X3) เวลาสกัด (X5) พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (X6) ความเข้มข้นของเอทานอล (X7) และสารเติมแต่ง (X8) รวมถึงปัจจัยเชิงกำลังสองและปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยเหล่านี้ต่อปริมาณ Curcuminoid ที่สกัดได้

สมการเชิงพหุนามที่ใช้พยากรณ์ค่าการตอบสนองของ Curcuminoid สามารถแสดงได้ดังนี้

$$Y3 = 187.127 - 0.785665X3 + 1.35517X5 - 1.27913X6 + 0.152127X7 + 1.76591X8 - 1.46841X3^2 - 1.36321X5^2 - 1.90766X6^2 - 1.75015X7^2 - 1.34156X8^2 - 0.188867X3X5 - 0.495563X3X6 - 0.609706X3X7 + 0.968893X3X8 - 0.910472X5X6 - 1.30065X5X7 - 0.384678X5X8 + 0.130338X6X7 - 0.121564X6X8 - 0.356265X7X8$$

การวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยเชิงเส้น พบว่าสารเติมแต่ง (X8) มีอิทธิพลเชิงบวกอย่างมีนัยสำคัญต่อปริมาณ Curcuminoid ที่สกัดได้ การเพิ่มสารเติมแต่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัด ในขณะที่พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (X6) มีผลกระทบทางลบอย่างมีนัยสำคัญต่อปริมาณ Curcuminoid เมื่อใช้ในระดับที่สูงเกินไป ส่วนเวลาสกัด (X5) มีแนวโน้มส่งผลในเชิงบวกต่อกระบวนการ ในขณะที่ไซโคลเด็กซ์ทริน (X3) และความเข้มข้นของเอทานอล (X7) ไม่มีผลกระทบที่มีนัยสำคัญต่อปริมาณ Curcuminoid ที่สกัดได้

ผลกระทบเชิงกำลังสองของปัจจัยแสดงให้เห็นว่า เมื่อค่าของ X3, X5, X6, X7 และ X8 สูงเกินระดับที่เหมาะสม จะทำให้ปริมาณ Curcuminoid ลดลง ซึ่งอาจเป็นผลจากการเกิดภาวะอิ่มตัวของระบบสกัด หรือการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างของสารสกัดที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการสกัด นอกจากนี้ยังพบว่าปัจจัยปฏิสัมพันธ์มีบทบาทสำคัญต่อปริมาณ Curcuminoid ที่สกัดได้ โดยการทำงานร่วมกันของไซโคลเด็กซ์ทรินและสารเติมแต่ง (X3X8) ส่งผลบวกต่อปริมาณสารสกัด ในขณะที่

การปฏิสัมพันธ์ระหว่างเวลาสกัดและความเข้มข้นของเอทานอล (X5X7) มีผลกระทบเชิงลบต่อประสิทธิภาพของกระบวนการสกัด

แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นได้รับการประเมินคุณภาพโดยใช้ตัวชี้วัดทางสถิติสำคัญ ค่า R^2 เท่ากับ 0.990 แสดงว่าแบบจำลองสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้ในระดับสูง ค่า Adjusted R^2 เท่ากับ 0.962 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองไม่มีปัญหา overfitting และค่า RSD (Root Standard Deviation) เท่ากับ 1.2819 บ่งชี้ว่าแบบจำลองมีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำ และสามารถนำไปใช้ทำนายค่าการตอบสนองได้อย่างแม่นยำ นอกจากนี้ ค่า p-value ของ Lack of Fit มีค่ามากกว่า 0.05 แสดงว่าแบบจำลองสามารถใช้อธิบายข้อมูลได้อย่างเหมาะสม

จากผลการศึกษาพบว่า สมการที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้ทำนายปริมาณ Curcuminoid ที่สกัดได้อย่างแม่นยำ ปัจจัยที่มีผลกระทบมากที่สุดคือสารเติมแต่ง ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการสกัด ในขณะที่การใช้พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ในระดับที่สูงเกินไปอาจลดประสิทธิภาพของการสกัดลง ความเข้าใจเกี่ยวกับผลกระทบของปัจจัยเหล่านี้จะช่วยให้สามารถกำหนดสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกระบวนการสกัด Curcuminoid ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

● การสร้างแบบจำลองสำหรับการตอบสนอง DPPH ของ Optimization Study Plan 1

การศึกษากการวิเคราะห์ถดถอยด้วยวิธี DPPH Assay ใช้การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยอาศัยการถดถอยเชิงพหุ (Multiple Regression Analysis) เพื่อพัฒนาสมการที่สามารถทำนายค่าการตอบสนองได้อย่างแม่นยำ ปัจจัยที่ถูกนำมาพิจารณาในแบบจำลองประกอบด้วย ไซโคลเด็กซ์ทริน (X3) เวลาสกัด (X5) พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (X6) ความเข้มข้นของเอทานอล (X7) และสารเติมแต่ง (X8) รวมถึงปัจจัยเชิงกำลังสองและปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยเหล่านี้ต่อฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH

สมการเชิงพหุนามที่พัฒนาขึ้นเพื่ออธิบายค่าการตอบสนองของ DPPH สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} Y_4 = & 813.819 - 7.94317X_3 + 12.8112X_5 - 12.6209X_6 + 2.37007X_7 + 18.6203X_8 - \\ & 13.8882X_3^2 - 13.1228X_5^2 - 18.4993X_6^2 - 17.0859X_7^2 - 12.4385X_8^2 - \\ & 1.8476X_3X_5 - 4.92535X_3X_6 - 6.49932X_3X_7 + 8.13278X_3X_8 - 10.6172X_5X_6 - \\ & 12.1934X_5X_7 - 4.03942X_5X_8 + 0.263905X_6X_7 - 0.501386X_6X_8 - \\ & 3.16468X_7X_8 \end{aligned}$$

การวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยเชิงเส้น พบว่าสารเติมแต่ง (X8) มีอิทธิพลเชิงบวกอย่างมีนัยสำคัญต่อฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH การเพิ่มสารเติมแต่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดสารต้านอนุมูลอิสระ ในขณะที่พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (X6) มีผลกระทบทางลบอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าการตอบสนอง DPPH เมื่อใช้ในระดับที่สูงเกินไป เวลาสกัด (X5) มีแนวโน้มส่งผลในเชิงบวกต่อกระบวนการ ในขณะที่ไซโคลเด็กซ์ทรีน (X3) และความเข้มข้นของเอทานอล (X7) ไม่มีผลกระทบที่มีนัยสำคัญต่อค่าการตอบสนองของ DPPH

ผลกระทบเชิงกำลังสองของปัจจัยแสดงให้เห็นว่า เมื่อค่าของ X3, X5, X6, X7 และ X8 สูงเกินระดับที่เหมาะสม จะทำให้ค่าการตอบสนอง DPPH ลดลง ซึ่งอาจเป็นผลจากการเกิดภาวะอิ่มตัวของระบบสกัด หรือการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างของสารออกฤทธิ์ที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการสกัด นอกจากนี้ยังพบว่าปัจจัยปฏิสัมพันธ์มีบทบาทสำคัญต่อฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ โดยการทำงานร่วมกันของไซโคลเด็กซ์ทรีนและสารเติมแต่ง (X3X8) ส่งผลบวกต่อฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ในขณะที่การปฏิสัมพันธ์ระหว่างเวลาสกัดและความเข้มข้นของเอทานอล (X5X7) มีผลกระทบเชิงลบต่อประสิทธิภาพของกระบวนการ

แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นได้รับการประเมินคุณภาพโดยใช้ตัวชี้วัดทางสถิติสำคัญ ค่า t เท่ากับ 0.990 แสดงว่าแบบจำลองสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้ในระดับสูง ค่า Adjusted t เท่ากับ 0.961 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองไม่มีปัญหา overfitting และค่า RSD (Root Standard Deviation) เท่ากับ 12.7313 บ่งชี้ว่าแบบจำลองมีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำ และสามารถนำไปใช้ทำนายค่าการตอบสนองได้อย่างแม่นยำ นอกจากนี้ ค่า p -value ของ Lack of Fit มีค่ามากกว่า 0.05 แสดงว่าแบบจำลองสามารถใช้อธิบายข้อมูลได้อย่างเหมาะสม

จากผลการศึกษาพบว่า สมการที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้ทำนายค่าการตอบสนองของ DPPH Assay ได้อย่างแม่นยำ ปัจจัยที่มีผลกระทบมากที่สุดคือสารเติมแต่ง ซึ่งช่วยเพิ่มฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดได้อย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่การใช้พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ในระดับที่สูงเกินไปอาจลดประสิทธิภาพของกระบวนการสกัด ความเข้าใจเกี่ยวกับผลกระทบของปัจจัยเหล่านี้จะช่วยให้สามารถกำหนดสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกระบวนการสกัดสารต้านอนุมูลอิสระโดยวิธี DPPH Assay ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

● การสร้างแบบจำลองสำหรับค่าการตอบสนอง ABTS ของ Optimization Study Plan 1

การศึกษากการวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระโดยวิธี ABTS Assay ใช้การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยอาศัยการถดถอยเชิงพหุ (Multiple Regression Analysis) เพื่อพัฒนาสมการที่สามารถทำนายค่าการตอบสนองได้อย่างแม่นยำ ปัจจัยที่ถูกนำมาพิจารณาในแบบจำลอง

ประกอบด้วย ไชโคลเด็กซ์ทริน (X3) เวลาสกัด (X5) พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (X6) ความเข้มข้นของเอทานอล (X7) และสารเติมแต่ง (X8) รวมถึงปัจจัยเชิงกำลังสองและปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยเหล่านี้ต่อฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ABTS

สมการเชิงพหุนามที่ใช้สำหรับค่าการตอบสนอง ABTS สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} Y_5 = & 867.196 - 3.55536X_3 + 10.1968X_5 - 5.42133X_6 + 7.44318X_7 + 12.8636X_8 - \\ & 12.053X_3^2 - 12.3818X_5^2 - 15.1439X_6^2 - 14.3223X_7^2 - 9.45598X_8^2 - \\ & 5.80715X_3X_5 + 3.82349X_3X_6 - 5.2431X_3X_7 - 0.912725X_3X_8 - 15.1219X_5X_6 \\ & - 7.48433X_5X_7 + 3.56497X_5X_8 + 1.2668X_6X_7 - 2.82548X_6X_8 - \\ & 7.84778X_7X_8 \end{aligned}$$

การวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยเชิงเส้น พบว่าสารเติมแต่ง (X8) มีอิทธิพลเชิงบวกอย่างมีนัยสำคัญต่อฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ABTS การเพิ่มสารเติมแต่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดสารต้านอนุมูลอิสระ ในขณะที่พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (X6) มีผลกระทบทางลบอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าการตอบสนอง ABTS เมื่อใช้ในระดับที่สูงเกินไป เวลาสกัด (X5) และความเข้มข้นของเอทานอล (X7) มีแนวโน้มส่งผลในเชิงบวกต่อกระบวนการ ในขณะที่ไชโคลเด็กซ์ทริน (X3) ไม่มีผลกระทบที่มีนัยสำคัญต่อค่าการตอบสนองของ ABTS

ผลกระทบเชิงกำลังสองของปัจจัยแสดงให้เห็นว่า เมื่อค่าของ X3, X5, X6, X7 และ X8 สูงเกินระดับที่เหมาะสม จะทำให้ค่าการตอบสนอง ABTS ลดลง ซึ่งอาจเป็นผลจากการเกิดภาวะอึดตัวของระบบสกัด หรือการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างของสารออกฤทธิ์ที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการสกัด นอกจากนี้ยังพบว่าปัจจัยปฏิสัมพันธ์มีบทบาทสำคัญต่อฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ โดยการทำงานร่วมกันของเวลาสกัดและพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (X5X6) มีผลกระทบเชิงลบอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าการตอบสนองของ ABTS ในขณะที่ปฏิสัมพันธ์ระหว่างเวลาสกัดและสารเติมแต่ง (X5X8) ส่งผลเชิงบวกต่อการเพิ่มฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ

แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นได้รับการประเมินคุณภาพโดยใช้ตัวชี้วัดทางสถิติสำคัญ ค่า เท่ากับ 0.995 แสดงว่าแบบจำลองสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้ในระดับสูง ค่า Adjusted เท่ากับ 0.979 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองไม่มีปัญหา overfitting และค่า RSD (Root Standard Deviation) เท่ากับ 7.9908 บ่งชี้ว่าแบบจำลองมีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำ และสามารถนำไปใช้ทำนายค่าการตอบสนองได้อย่างแม่นยำ นอกจากนี้ ค่า p-value ของ Lack of Fit มีค่ามากกว่า 0.05 แสดงว่าแบบจำลองสามารถใช้อธิบายข้อมูลได้อย่างเหมาะสม

จากผลการศึกษาพบว่า สมการที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้ทำนายค่าการตอบสนองของ ABTS Assay ได้อย่างแม่นยำ ปัจจัยที่มีผลกระทบมากที่สุดคือสารเติมแต่ง ซึ่งช่วยเพิ่มฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดได้อย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่การใช้พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ในระดับที่สูงเกินไปอาจลดประสิทธิภาพของกระบวนการสกัด ความเข้าใจเกี่ยวกับผลกระทบของปัจจัยเหล่านี้จะช่วยให้สามารถกำหนดสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกระบวนการสกัดสารต้านอนุมูลอิสระโดยวิธี ABTS Assay ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

● การสร้างแบบจำลองสำหรับค่าการตอบสนอง FRAP ของ Optimization Study Plan 1

การศึกษากวาระหัตถ์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระโดยวิธี FRAP Assay ใช้การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยอาศัยการถดถอยเชิงพหุ (Multiple Regression Analysis) เพื่อพัฒนาสมการที่สามารถทำนายค่าการตอบสนองได้อย่างแม่นยำ ปัจจัยที่ถูกนำมาพิจารณาในแบบจำลองประกอบด้วย ไซโคลเด็กซ์ทรีน (X3) เวลาสกัด (X5) พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (X6) ความเข้มข้นของเอทานอล (X7) และสารเติมแต่ง (X8) รวมถึงปัจจัยเชิงกำลังสองและปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยเหล่านี้ต่อฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ FRAP

สมการเชิงพหุนามที่พัฒนาขึ้นสำหรับค่าการตอบสนอง FRAP สามารถแสดงได้ดังนี้

$$Y_6 = 1402.27 - 12.391X_3 + 17.6461X_5 - 19.2491X_6 + 3.28606X_7 + 29.0008X_8 - 20.7558X_3^2 - 19.8173X_5^2 - 27.9249X_6^2 - 26.0191X_7^2 - 18.733X_8^2 - 1.67775X_3X_5 - 9.08841X_3X_6 - 9.94206X_3X_7 + 11.3328X_3X_8 - 15.9271X_5X_6 - 17.2372X_5X_7 - 7.70617X_5X_8 - 1.42753X_6X_7 + 0.958917X_6X_8 - 2.84714X_7X_8$$

การวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยเชิงเส้น พบว่าสารเติมแต่ง (X8) มีอิทธิพลเชิงบวกอย่างมีนัยสำคัญต่อฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ FRAP การเพิ่มสารเติมแต่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดสารต้านอนุมูลอิสระ ในขณะที่พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (X6) มีผลกระทบทางลบอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าการตอบสนอง FRAP เมื่อใช้ในระดับที่สูงเกินไป เวลาสกัด (X5) มีแนวโน้มส่งผลในเชิงบวกต่อกระบวนการ ในขณะที่ไซโคลเด็กซ์ทรีน (X3) และความเข้มข้นของเอทานอล (X7) ไม่มีผลกระทบที่มีนัยสำคัญต่อค่าการตอบสนองของ FRAP

ผลกระทบเชิงกำลังสองของปัจจัยแสดงให้เห็นว่า เมื่อค่าของ X3, X5, X6, X7 และ X8 สูงเกินระดับที่เหมาะสม จะทำให้ค่าการตอบสนอง FRAP ลดลง ซึ่งอาจเป็นผลจากการเกิดภาวะอิ่มตัว

ของระบบสกัด หรือการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างของสารออกฤทธิ์ที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการสกัด นอกจากนี้ยังพบว่าปัจจัยปฏิสัมพันธ์มีบทบาทสำคัญต่อฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ โดยการทำงานร่วมกันของไซโคลเด็กซ์ทรินและสารเติมแต่ง (X3X8) ส่งผลบวกต่อฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ในขณะที่การปฏิสัมพันธ์ระหว่างเวลาสกัดและพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (X5X6) มีผลกระทบเชิงลบต่อประสิทธิภาพของกระบวนการ

แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นได้รับการประเมินคุณภาพโดยใช้ตัวชี้วัดทางสถิติสำคัญ ค่า t เท่ากับ 0.994 แสดงว่าแบบจำลองสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้ในระดับสูง ค่า Adjusted t เท่ากับ 0.977 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองไม่มีปัญหา overfitting และค่า RSD (Root Standard Deviation) เท่ากับ 14.6317 บ่งชี้ว่าแบบจำลองมีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำ และสามารถนำไปใช้ทำนายค่าการตอบสนองได้อย่างแม่นยำ นอกจากนี้ ค่า p -value ของ Lack of Fit มีค่ามากกว่า 0.05 แสดงว่าแบบจำลองสามารถใช้อธิบายข้อมูลได้อย่างเหมาะสม

จากผลการศึกษาพบว่า สมการที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้ทำนายค่าการตอบสนองของ FRAP Assay ได้อย่างแม่นยำ ปัจจัยที่มีผลกระทบมากที่สุดคือสารเติมแต่ง ซึ่งช่วยเพิ่มฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดได้อย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่การใช้พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ในระดับที่สูงเกินไปอาจลดประสิทธิภาพของกระบวนการสกัด ความเข้าใจเกี่ยวกับผลกระทบของปัจจัยเหล่านี้จะช่วยให้สามารถกำหนดสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกระบวนการสกัดสารต้านอนุมูลอิสระโดยวิธี FRAP Assay ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

4.3.1.4 การวิเคราะห์ Contour Plot และ Surface Plot ในการศึกษา Optimization Study Plan 1

การวิเคราะห์ Contour Plot และ Response Surface Plot เป็นกระบวนการสำคัญในการทำความเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยอิสระที่ส่งผลต่อค่าการตอบสนองของกระบวนการสกัดสารสำคัญจากเหง้าไพล โดย Contour Plot ใช้แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าการตอบสนองเมื่อปรับระดับของปัจจัยอิสระสองตัว ในขณะที่ Response Surface Plot ใช้เพื่อแสดงผลเชิงพื้นที่สามมิติ (3D) ซึ่งช่วยให้สามารถระบุช่วงค่าของปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดได้ง่ายขึ้น การศึกษานี้ช่วยให้สามารถกำหนดเงื่อนไขที่ให้ค่าการตอบสนองสูงสุดได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในการศึกษาครั้งนี้ได้วิเคราะห์ Contour Plot และ Surface Plot ของคู่ปัจจัยที่สำคัญ ซึ่งเป็นการจับคู่ระหว่างปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกันและกันโดยตรง โดยเริ่มจากความเข้มข้นของไซโคลเด็กซ์ทริน (Conc. HPBCD) และเวลาสกัด (Time) ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการสกัดสารสำคัญอย่างมีนัยสำคัญ

ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทรีน (Conc. HPBCD) และเวลาสกัด (Time) ต่อค่าการตอบสนองใน Optimization Study Plan 1

ภาพที่ 4.35 แสดง Contour Plot และ Response Surface Plot ที่สะท้อนอิทธิพลของ Conc. HPBCD และ Time ต่อค่าการตอบสนองของ Compound D, DMPBD, Curcuminoid, DPPH, ABTS และ FRAP ซึ่งแสดงแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงค่าการตอบสนองตามระดับของทั้งสองปัจจัย

ในกรณีของ Compound D ซึ่งเป็นสารออกฤทธิ์หลักในเหง้าไพล พบว่าค่าการตอบสนองสูงสุดอยู่ที่ 297.4 $\mu\text{g/ml}$ เมื่อความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทรีนอยู่ในช่วง 16-20 mM และเวลาสกัดอยู่ระหว่าง 30-40 นาที หากความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทรีนเกินกว่าช่วงที่เหมาะสม ปริมาณ Compound D จะลดลง ซึ่งอาจเกิดจากการอิมตัวของสารสำคัญหรือการเสื่อมสลายของสารเมื่อได้รับพลังงานเป็นเวลานาน

สำหรับ DMPBD พบว่ามีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 734.1 $\mu\text{g/ml}$ เมื่อ Conc. HPBCD อยู่ระหว่าง 15-25 mM และเวลาสกัดอยู่ที่ 30-40 นาที มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่ความเข้มข้นปานกลาง แต่ลดลงเมื่อความเข้มข้นสูงเกินไป ซึ่งอาจเกิดจากข้อจำกัดของการละลายและการตรึงโมเลกุลของสารภายในไฮโคลเด็กซ์ทรีน

Curcuminoid มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 187.83 $\mu\text{g/ml}$ เมื่อ Conc. HPBCD อยู่ในช่วง 16-24 mM และเวลาสกัด 31-40 นาที ความเข้มข้นและเวลาสกัดที่มากเกินไปอาจทำให้ปริมาณที่สกัดได้ลดลงจากการอิมตัวหรือการเสื่อมสลายของสารสำคัญ

ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ได้แก่ DPPH, ABTS และ FRAP มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อ Conc. HPBCD และเวลาสกัดอยู่ในระดับที่เหมาะสม ค่า DPPH สูงสุดที่ 821 $\mu\text{M TE}$ เมื่อ Conc. HPBCD อยู่ในช่วง 16-25 mM และเวลาสกัด 31-41 นาที ค่า ABTS สูงสุดที่ 876.7 $\mu\text{M TE}$ ที่ Conc. HPBCD ระหว่าง 12-23 mM และเวลาสกัด 31-43 นาที ส่วนค่า FRAP สูงสุดที่ 1410.5 $\mu\text{M TE}$ เมื่อ Conc. HPBCD อยู่ที่ 16-25 mM และเวลาสกัด 31-40 นาที อย่างไรก็ตาม หากใช้ค่าที่สูงเกินไป ค่าการตอบสนองจะลดลง ซึ่งอาจเป็นผลจากการเสื่อมสลายของสารออกฤทธิ์หรือการเปลี่ยนแปลงของสมดุลปฏิกิริยาในระบบ

จากการวิเคราะห์ Contour Plot และ Response Surface Plot แสดงให้เห็นว่าการควบคุมความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทรีนและเวลาสกัดให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัด การใช้ค่าที่สูงเกินไปอาจส่งผลให้เกิดการอิมตัวของสารหรือการเสื่อมสลายของสารออกฤทธิ์ ซึ่งส่งผลต่อค่าการตอบสนอง ดังนั้น การเลือกค่าที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งสำคัญในการพัฒนากระบวนการสกัดสารสำคัญจากเหง้าไพล

ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทริน (Conc. HPBCD) และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (Power) ต่อค่าการตอบสนองใน Optimization Study Plan 1

การศึกษานี้วิเคราะห์ผลของความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทริน (Conc. HPBCD) และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (Power) ต่อค่าการตอบสนองของสารสำคัญ ได้แก่ Compound D, DMPBD, Curcuminoid และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH, ABTS และ FRAP โดยใช้ Contour Plot และ Response Surface Plot (ภาพที่ 4.36) เพื่อแสดงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าการตอบสนองตามระดับของทั้งสองปัจจัย

สำหรับ Compound D ซึ่งเป็นสารออกฤทธิ์หลัก พบว่าปริมาณสูงสุดอยู่ที่ 300.4 $\mu\text{g/ml}$ เมื่อความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทรินอยู่ในช่วง 15-26 mM และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์อยู่ระหว่าง 140-210 W หากใช้พลังงานสูงเกินไป อาจทำให้สารเสื่อมสลายและลดปริมาณสารที่ได้

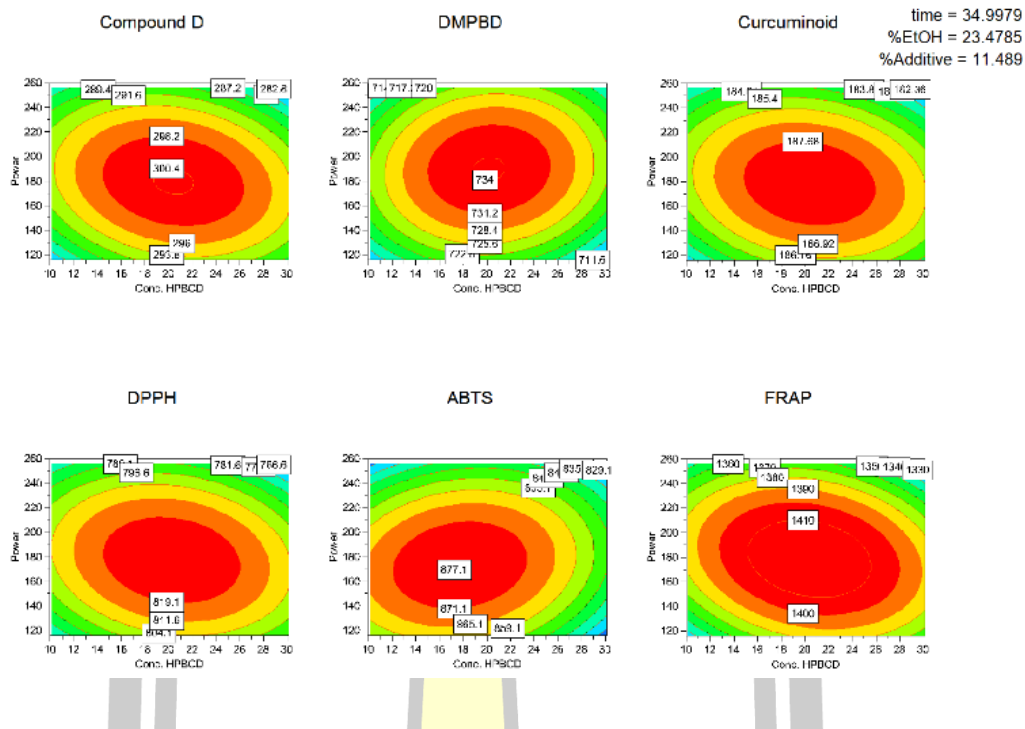
DMPBD มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 724 $\mu\text{g/ml}$ เมื่อ Conc. HPBCD อยู่ระหว่าง 15-25 mM และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ 160-220 W การเพิ่มขึ้นของค่าการตอบสนองพบได้ทั้งระดับความเข้มข้นและพลังงานปานกลาง แต่เมื่อตัวแปรเหล่านี้สูงเกินไป ปริมาณสารสกัดจะลดลง ซึ่งอาจเป็นผลจากการอึดตัวของสารสำคัญหรือการเปลี่ยนแปลงสมดุลทางเคมี

Curcuminoid มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 167.8 $\mu\text{g/ml}$ เมื่อ Conc. HPBCD อยู่ระหว่าง 15-26 mM และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ 150-210 W การใช้พลังงานสูงเกินความเหมาะสมอาจเร่งการสลายตัวของสาร ส่งผลให้ค่าการตอบสนองลดลง

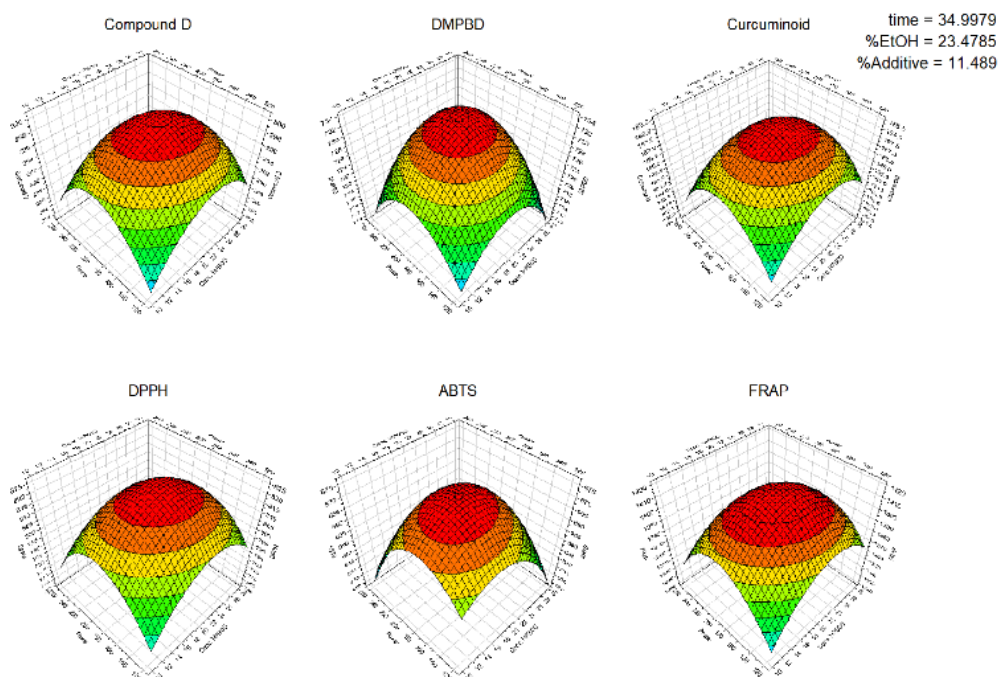
ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของ DPPH, ABTS และ FRAP เพิ่มขึ้นเมื่อ Conc. HPBCD และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์อยู่ในช่วงที่เหมาะสม ค่า DPPH สูงสุดที่ 811.9 $\mu\text{M TE}$ เมื่อ Conc. HPBCD อยู่ระหว่าง 15-26 mM และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ 140-210 W ค่า ABTS สูงสุดที่ 877.1 $\mu\text{M TE}$ ในช่วง Conc. HPBCD 12-23 mM และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ 140-210 W ส่วน FRAP มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 1410 $\mu\text{M TE}$ เมื่อ Conc. HPBCD อยู่ที่ 13-28 mM และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ 130-220 W อย่างไรก็ตาม หากค่าพลังงานสูงเกินไป อาจทำให้โครงสร้างของสารเปลี่ยนแปลงหรือเสื่อมสลาย ส่งผลให้ค่าการตอบสนองลดลง

จากการวิเคราะห์ Contour Plot และ Response Surface Plot พบว่าการควบคุมความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทรินและพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมเป็นปัจจัยสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัด การใช้ค่าที่สูงเกินไปอาจส่งผลให้เกิดการอึดตัวหรือการเสื่อมสลายของสารออกฤทธิ์ ส่งผลต่อประสิทธิภาพของสารสกัด ดังนั้นการเลือกค่าที่สมดุลของทั้งสองปัจจัยจึงมีความสำคัญต่อการพัฒนากระบวนการสกัดสารสำคัญจากเหง้าไพล

(A) Contour Plot of Optimization Study Plan 1



(B) Response Surface Plot of Optimization Study Plan 1



ภาพที่ 4.36 Contour Plot และ Surface Plot ความสัมพันธ์ระหว่าง Conc. HPBCD และ Power ในการศึกษา Optimization Study Plan 1

ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทริน (Conc. HPBCD) และความเข้มข้นของเอทานอล (%EtOH) ต่อค่าการตอบสนองใน Optimization Study Plan 1

การศึกษานี้วิเคราะห์ผลของความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทริน (Conc. HPBCD) และความเข้มข้นของเอทานอล (%EtOH) ต่อค่าการตอบสนองของสารสำคัญ ได้แก่ Compound D, DMPBD, Curcuminoid และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH, ABTS และ FRAP โดยใช้ Contour Plot และ Response Surface Plot (ภาพที่ 4.37) เพื่อแสดงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าการตอบสนองตามระดับของทั้งสองปัจจัย

สำหรับ Compound D พบว่าค่าการตอบสนองสูงสุดอยู่ที่ 296.5 $\mu\text{g/ml}$ เมื่อความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทรินอยู่ในช่วง 14-26 mM และ %EtOH อยู่ระหว่าง 22-27% หากระดับเอทานอลสูงเกินไป อาจส่งผลให้การละลายของสารเปลี่ยนแปลงและทำให้ปริมาณสารที่สกัดได้ลดลง

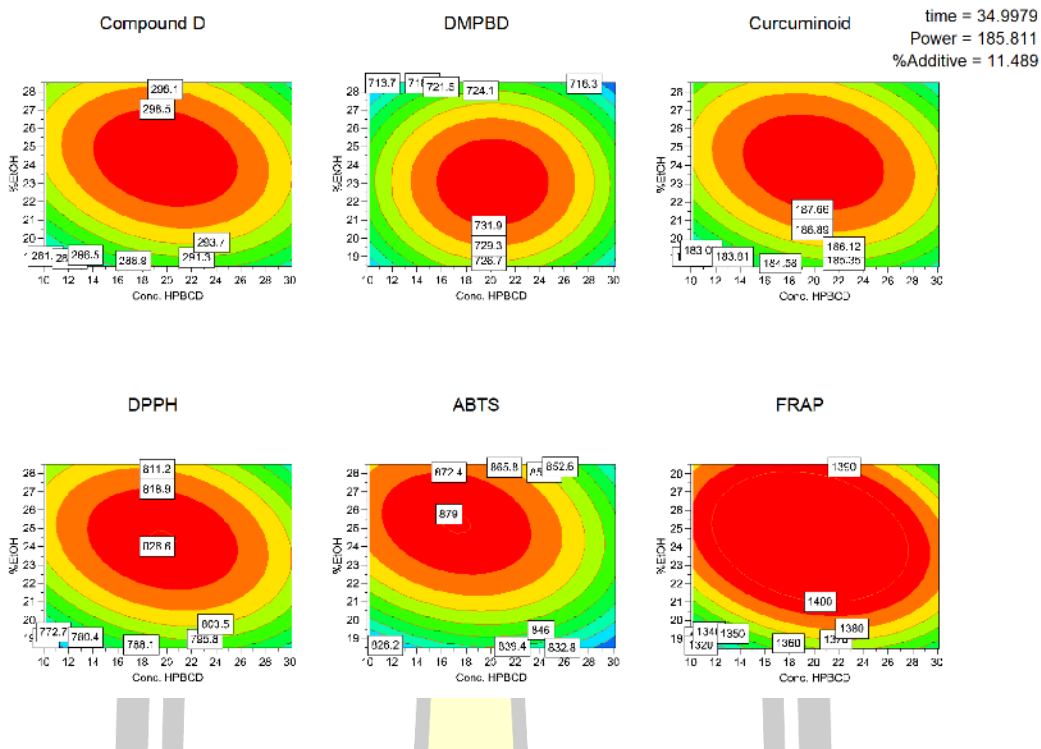
DMPBD มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 724.1 $\mu\text{g/ml}$ เมื่อ Conc. HPBCD อยู่ระหว่าง 16-24 mM และ %EtOH ในช่วง 21-25% ค่าการตอบสนองเพิ่มขึ้นที่ระดับความเข้มข้นปานกลางของเอทานอล แต่เมื่อใช้ความเข้มข้นสูงเกินไป อาจเกิดการอิ่มตัวของสารสำคัญและลดประสิทธิภาพของกระบวนการสกัด

Curcuminoid มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 187.6 $\mu\text{g/ml}$ เมื่อ Conc. HPBCD อยู่ในช่วง 14-25 mM และ %EtOH อยู่ระหว่าง 22-26% เอทานอลในระดับที่เหมาะสมสามารถช่วยเพิ่มการละลายของสารสำคัญได้ แต่หากใช้ในปริมาณมากเกินไป อาจลดประสิทธิภาพของการตรึงโมเลกุลภายในไฮโคลเด็กซ์ทริน

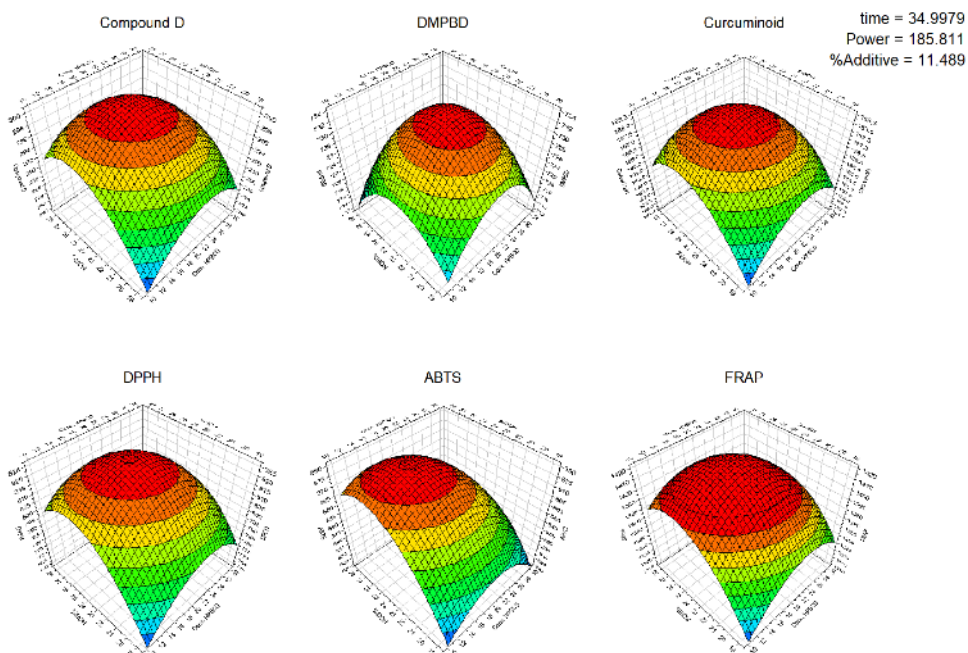
ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของ DPPH, ABTS และ FRAP เพิ่มขึ้นเมื่อ Conc. HPBCD และ %EtOH อยู่ในระดับที่เหมาะสม ค่า DPPH สูงสุดที่ 819.8 $\mu\text{M TE}$ เมื่อ Conc. HPBCD อยู่ระหว่าง 14-26 mM และ %EtOH 22-27% ค่า ABTS สูงสุดที่ 879.0 $\mu\text{M TE}$ ในช่วง Conc. HPBCD 11-23 mM และ %EtOH 23-28% ส่วน FRAP มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 1390 $\mu\text{M TE}$ เมื่อ Conc. HPBCD อยู่ที่ 10-29 mM และ %EtOH 20-28% อย่างไรก็ตาม หากใช้เอทานอลในปริมาณสูงเกินไป อาจทำให้โครงสร้างของสารเปลี่ยนแปลงหรือเสื่อมสลาย ส่งผลให้ค่าการตอบสนองลดลง

จากการวิเคราะห์ Contour Plot และ Response Surface Plot พบว่าการควบคุมความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทรินและระดับเอทานอลให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมเป็นปัจจัยสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัด การใช้ค่าที่สูงเกินไปอาจส่งผลให้เกิดการอิ่มตัวของสารสำคัญหรือการเปลี่ยนแปลงของสมดุลของปฏิกิริยา ดังนั้นการเลือกค่าที่สมดุลของทั้งสองปัจจัยจึงมีความสำคัญต่อการพัฒนากระบวนการสกัดสารสำคัญจากเหง้าไพล

(A) Contour Plot of Optimization Study Plan 1



(B) Response Surface Plot of Optimization Study Plan 1



ภาพที่ 4.37 Contour Plot และ Surface Plot ความสัมพันธ์ระหว่าง Conc. HPBCD และ %EtOH ในการศึกษา Optimization Study Plan 1

ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทรีน (Conc. HPBCD) และความเข้มข้นของสารเติมแต่ง (%Additive) ต่อค่าการตอบสนองใน Optimization Study Plan 1

การศึกษานี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์อิทธิพลของความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทรีน (Conc. HPBCD) และสารเติมแต่ง (%Additive) ต่อค่าการตอบสนองของสารสำคัญ ได้แก่ Compound D, DMPBD, Curcuminoid รวมถึงฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH, ABTS และ FRAP โดยใช้ Contour Plot และ Response Surface Plot (ภาพที่ 4.38) เพื่อแสดงแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงค่าการตอบสนองตามระดับของทั้งสองปัจจัย

สำหรับ Compound D พบว่าค่าการตอบสนองสูงสุดอยู่ที่ 306.8 $\mu\text{g/ml}$ เมื่อความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทรีนอยู่ในช่วง 15-26 mM และ %Additive อยู่ระหว่าง 9-15% การใช้สารเติมแต่งในระดับที่เหมาะสมช่วยเพิ่มปริมาณสารสกัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม หากปริมาณสารเติมแต่งเกินช่วงที่เหมาะสม อาจส่งผลให้สมดุลของระบบเปลี่ยนแปลงและลดปริมาณสารที่สกัดได้

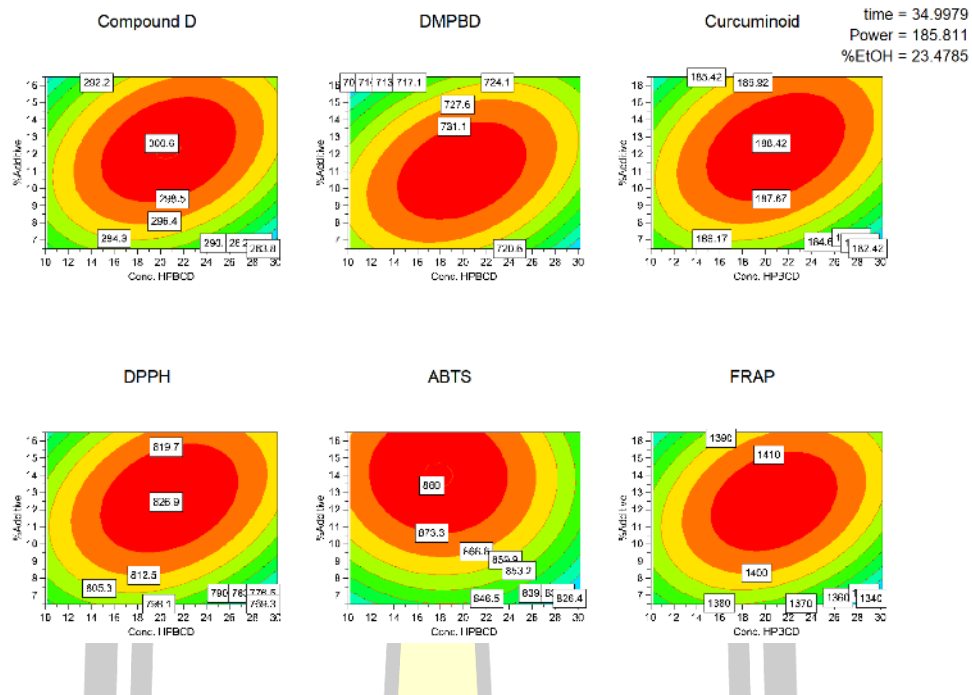
DMPBD มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 731.8 $\mu\text{g/ml}$ เมื่อ Conc. HPBCD อยู่ระหว่าง 14-25 mM และ %Additive ในช่วง 8-14% ระดับความเข้มข้นปานกลางของสารเติมแต่งช่วยเสริมกระบวนการสกัดได้ดี แต่หากมีปริมาณสูงเกินไป อาจเกิดการอึดตัวและลดประสิทธิภาพการตรึงโมเลกุลของสารสำคัญภายในไฮโคลเด็กซ์ทรีน

Curcuminoid มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 188.4 $\mu\text{g/ml}$ เมื่อ Conc. HPBCD อยู่ระหว่าง 15-26 mM และ %Additive อยู่ที่ 9-15% การเติมสารในปริมาณที่เหมาะสมช่วยเพิ่มความสามารถในการละลายของสารสำคัญ แต่หากใช้ในระดับที่สูงเกินไป อาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างทางเคมีและลดประสิทธิภาพของสารที่สกัดได้

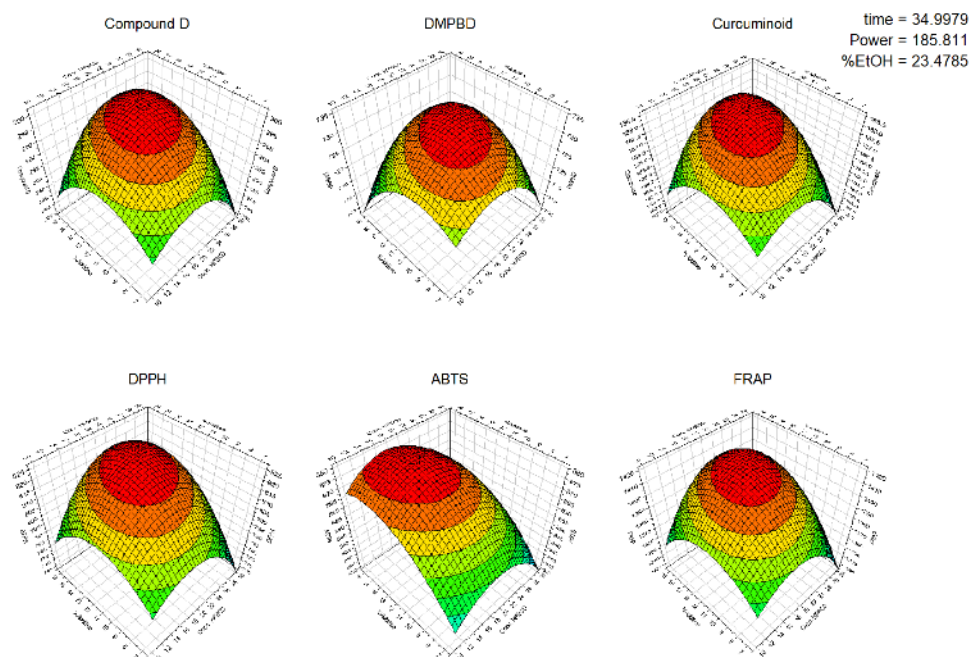
ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของ DPPH, ABTS และ FRAP มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อ Conc. HPBCD และ %Additive อยู่ในช่วงที่เหมาะสม ค่า DPPH สูงสุดที่ 819.7 $\mu\text{M TE}$ เมื่อ Conc. HPBCD อยู่ระหว่าง 15-26 mM และ %Additive 9-16% ค่า ABTS สูงสุดที่ 890.0 $\mu\text{M TE}$ ในช่วง Conc. HPBCD 12-24 mM และ %Additive 11-16% ส่วน FRAP มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 1410 $\mu\text{M TE}$ เมื่อ Conc. HPBCD อยู่ที่ 15-25 mM และ %Additive 9-15% การใช้สารเติมแต่งที่มากเกินไป อาจส่งผลต่อปฏิสัมพันธ์ระหว่างไฮโคลเด็กซ์ทรีนและสารสำคัญ ทำให้ค่าการตอบสนองลดลง

จากการวิเคราะห์ Contour Plot และ Response Surface Plot พบว่าการควบคุมปริมาณของไฮโคลเด็กซ์ทรีนและสารเติมแต่งให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมเป็นปัจจัยสำคัญต่อประสิทธิภาพของกระบวนการสกัด หากใช้ในระดับที่เกินพอดี อาจทำให้เกิดการอึดตัวของสารสำคัญหรือเปลี่ยนแปลงสมดุลของปฏิกิริยา ดังนั้น การกำหนดค่าที่เหมาะสมของทั้งสองปัจจัยเป็นสิ่งจำเป็นในการพัฒนากระบวนการสกัดสารออกฤทธิ์จากเหง้าไพล

(A) Contour Plot of Optimization Study Plan 1



(B) Response Surface Plot of Optimization Study Plan 1



ภาพที่ 4.38 Contour Plot และ Surface Plot ความสัมพันธ์ระหว่าง Conc. HPBCD และ %Additive ในการศึกษา Optimization Study Plan 1

ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาสกัด (Time) และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (Power) ต่อค่าการตอบสนองใน Optimization Study Plan 1

การศึกษานี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์อิทธิพลของเวลาสกัดและพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ต่อประสิทธิภาพการสกัดสารสำคัญ ได้แก่ Compound D, DMPBD, Curcuminoid และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของ DPPH, ABTS และ FRAP การใช้ Contour Plot และ Response Surface Plot (ภาพที่ 4.39) ช่วยแสดงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าการตอบสนองภายใต้ระดับปัจจัยที่แตกต่าง

Compound D มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 298.5 $\mu\text{g/ml}$ เมื่อเวลาสกัดอยู่ระหว่าง 30-41 นาที และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์อยู่ที่ 140-210 W ซึ่งเป็นช่วงที่ส่งเสริมการสกัดสารได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม การใช้พลังงานหรือระยะเวลาสกัดที่มากเกินไปอาจทำให้สารเสื่อมสลายและลดปริมาณสารสกัดที่ได้

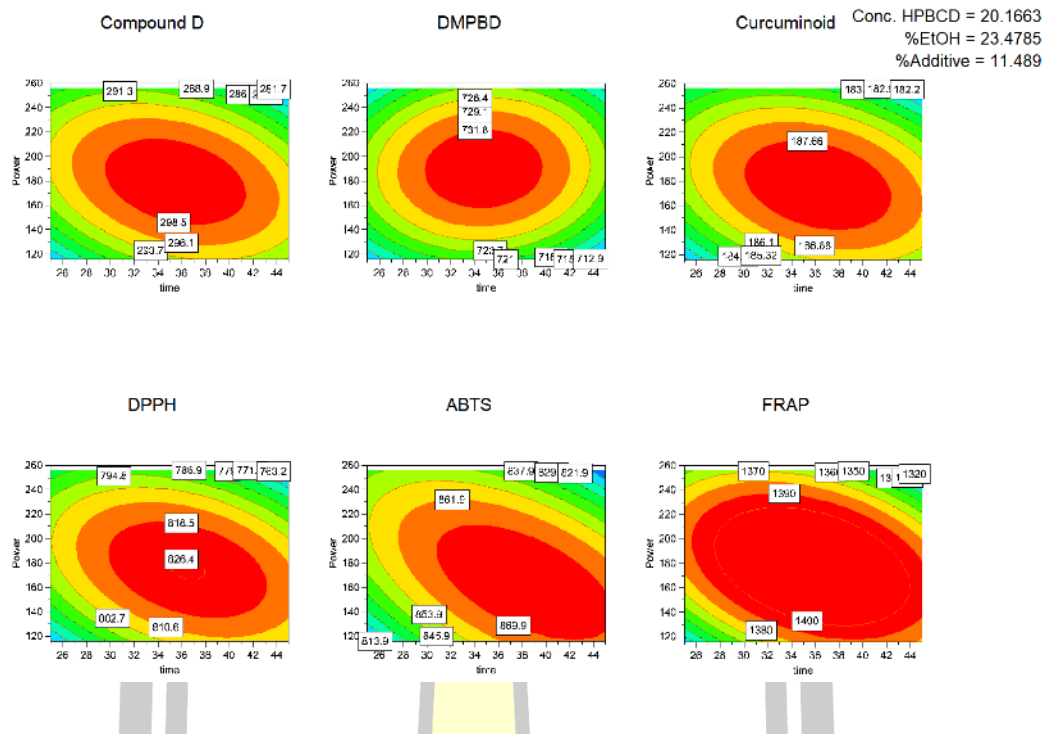
DMPBD มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 731.8 $\mu\text{g/ml}$ เมื่อเวลาสกัดอยู่ที่ 30-40 นาที และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์อยู่ที่ 160-220 W หากเวลาสกัดนานเกินไปหรือได้รับพลังงานสูง อาจส่งผลให้สารสำคัญบางส่วนสลายตัวและลดปริมาณสารสกัด

Curcuminoid มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 187.66 $\mu\text{g/ml}$ เมื่อเวลาสกัดอยู่ระหว่าง 30-42 นาที และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์อยู่ที่ 140-210 W การใช้พลังงานสูงเกินไปอาจเร่งกระบวนการสลายตัวของสารสำคัญ ทำให้ปริมาณสารสกัดลดลง

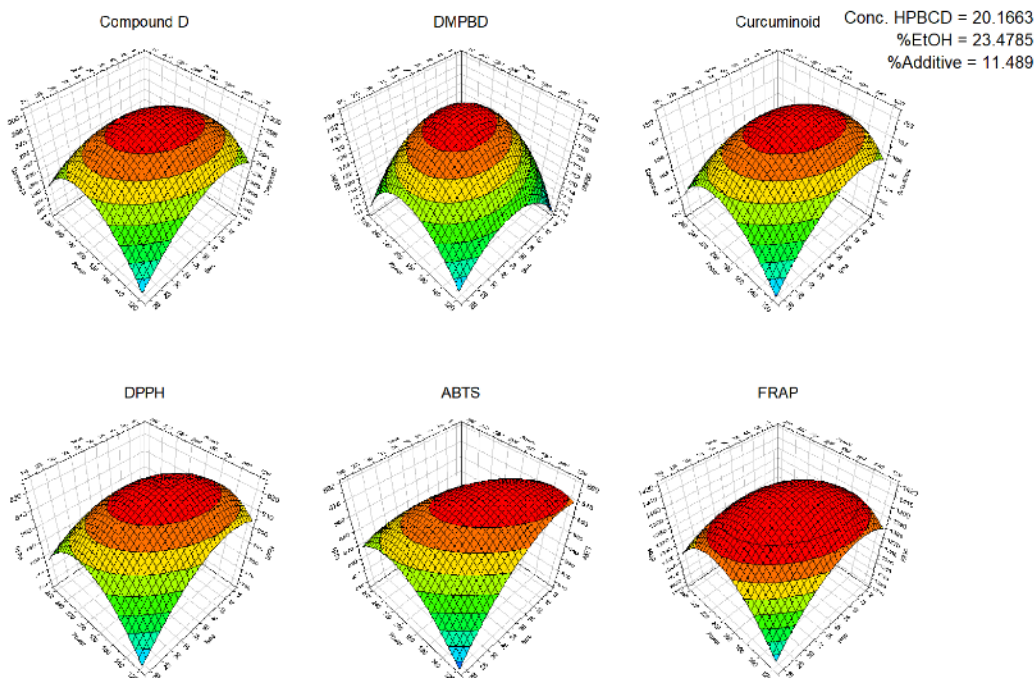
ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาสกัดและพลังงานที่ใช้ DPPH มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 826.4 $\mu\text{M TE}$ เมื่อเวลาสกัดอยู่ที่ 30-43 นาที และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์อยู่ที่ 140-210 W ABTS มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 869.9 $\mu\text{M TE}$ ในช่วงเวลาสกัด 31-45 นาที และพลังงานที่ 120-210 W ขณะที่ FRAP มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 1400 $\mu\text{M TE}$ เมื่อเวลาสกัดอยู่ที่ 28-43 นาที และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์อยู่ที่ 130-230 W

จากการวิเคราะห์ Contour Plot และ Response Surface Plot พบว่าการควบคุมระยะเวลาสกัดและพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมมีบทบาทสำคัญต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการสกัด หากใช้ค่าปัจจัยที่สูงเกินไป อาจทำให้สารสำคัญเกิดการสลายตัวหรือเปลี่ยนแปลงสมดุลของระบบ การเลือกค่าที่เหมาะสมของทั้งสองปัจจัยจึงมีความจำเป็นต่อการพัฒนากระบวนการสกัดสารออกฤทธิ์จากเหง้าโพล

(A) Contour Plot of Optimization Study Plan 1



(B) Response Surface Plot of Optimization Study Plan 1



ภาพที่ 4.39 Contour Plot และ Surface Plot ความสัมพันธ์ระหว่าง Time และ Power ใน
การศึกษา Optimization Study Plan 1

ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาสกัด (Time) และความเข้มข้นของเอทานอล (%EtOH) ต่อค่าการตอบสนองใน Optimization Study Plan 1

การศึกษานี้วิเคราะห์ผลของระยะเวลาสกัดและปริมาณสารเติมแต่งต่อค่าการตอบสนองของสารสำคัญ ได้แก่ Compound D, DMPBD, Curcuminoid และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของ DPPH, ABTS และ FRAP โดยใช้ Contour Plot และ Response Surface Plot (ภาพที่ 4.41) เพื่อติดตามแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าการตอบสนองภายใต้ระดับของทั้งสองปัจจัย

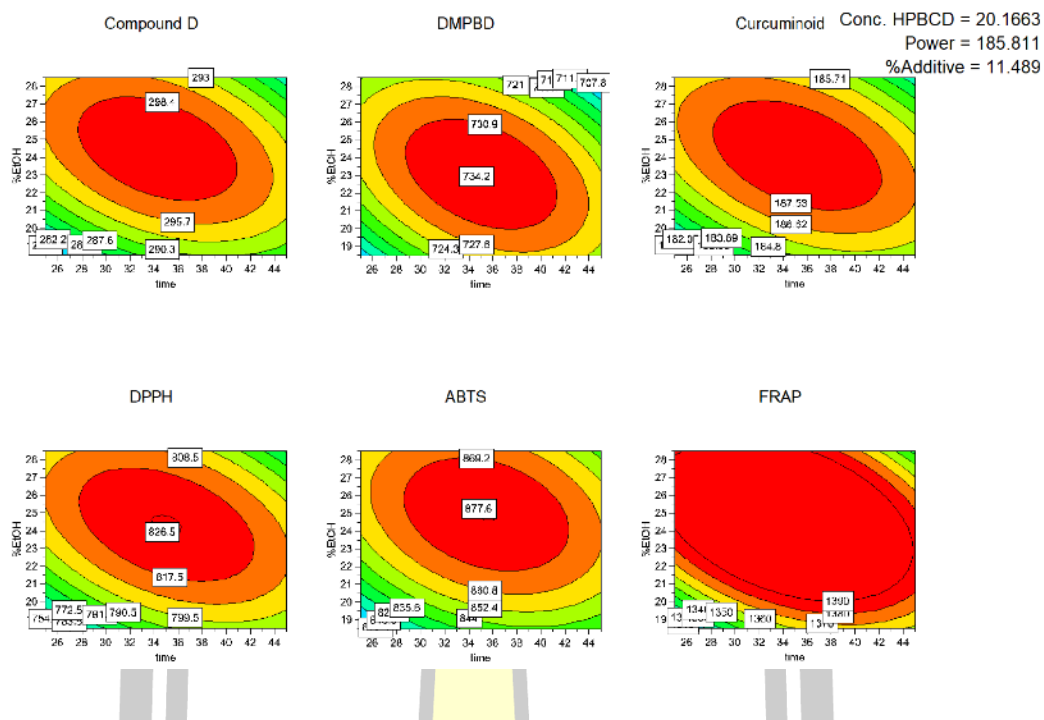
ผลการวิเคราะห์พบว่า Compound D มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 298.8 $\mu\text{g/ml}$ เมื่อเวลาสกัดอยู่ในช่วง 30-40 นาที และปริมาณสารเติมแต่งอยู่ที่ 9-15% ซึ่งเป็นช่วงที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดได้อย่างเหมาะสม อย่างไรก็ตาม หากใช้สารเติมแต่งในระดับที่สูงเกินไป อาจทำให้เกิดภาวะอิมัตว์และลดประสิทธิภาพการละลายของสารสำคัญ DMPBD มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 733.9 $\mu\text{g/ml}$ ในช่วงเวลาสกัด 29-40 นาที และปริมาณสารเติมแต่ง 8-14% หากเวลาสกัดนานเกินไปหรือใช้สารเติมแต่งมากเกินไปในระดับที่เหมาะสม อาจทำให้เกิดการสลายตัวของสารออกฤทธิ์สำคัญ

Curcuminoid มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 187.76 $\mu\text{g/ml}$ เมื่อเวลาสกัดอยู่ที่ 30-40 นาที และปริมาณสารเติมแต่ง 10-15% ซึ่งเป็นระดับที่ช่วยกระตุ้นการละลายของสารออกฤทธิ์ แต่หากใช้สารเติมแต่งเข้มข้นเกินไป อาจส่งผลให้เกิดการแยกตัวของสารสกัดและลดประสิทธิภาพการสกัด

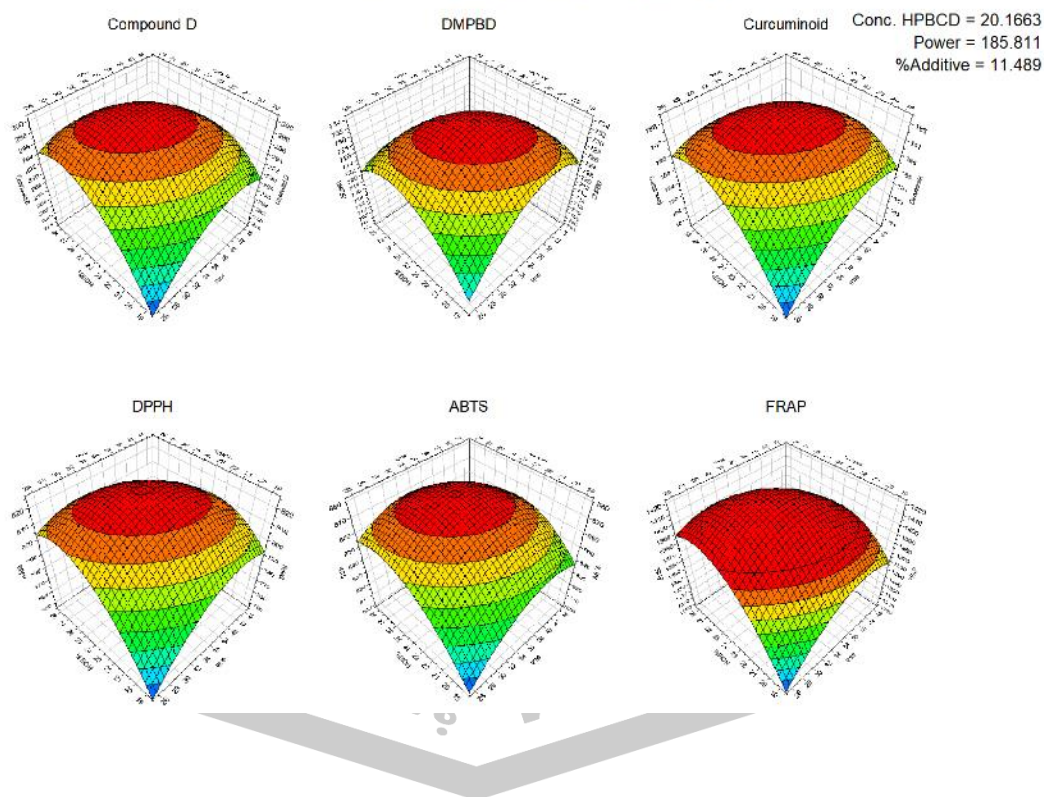
สำหรับฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัด พบว่าค่าการตอบสนองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาสกัดและปริมาณสารเติมแต่งอยู่ในระดับที่เหมาะสม ค่า DPPH สูงสุดที่ 820.4 $\mu\text{M TE}$ เมื่อเวลาสกัดอยู่ที่ 30-40 นาที และปริมาณสารเติมแต่ง 10-15% ส่วนค่า ABTS สูงสุดที่ 874.4 $\mu\text{M TE}$ ในช่วงเวลาสกัด 32-42 นาที และปริมาณสารเติมแต่ง 11-17% ขณะที่ FRAP มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 1409.7 $\mu\text{M TE}$ เมื่อเวลาสกัดอยู่ที่ 29-40 นาที และปริมาณสารเติมแต่ง 10-15%

จากการวิเคราะห์ Contour Plot และ Response Surface Plot พบว่าการควบคุมเวลาสกัดและปริมาณสารเติมแต่งให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม มีบทบาทสำคัญต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการสกัด หากใช้สารเติมแต่งในระดับที่สูงเกินไป อาจทำให้เกิดการสลายตัวของสารสำคัญหรือเกิดภาวะอิมัตว์ที่ลดประสิทธิภาพของกระบวนการสกัด ดังนั้น การเลือกค่าที่สมดุลของทั้งสองปัจจัยจึงเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการพัฒนากระบวนการสกัดสารออกฤทธิ์จากเหง้าไพล

(A) Contour Plot of Optimization Study Plan 1



(B) Response Surface Plot of Optimization Study Plan 1



ภาพที่ 4.40 Contour Plot และ Surface Plot ความสัมพันธ์ระหว่าง Time และ %EtOH ใน
การศึกษา Optimization Study Plan 1

ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาสกัด (Time) และความเข้มข้นของสารเติมแต่ง (% Additive) ต่อค่าการตอบสนองใน Optimization Study Plan 1

การศึกษานี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์ผลของระยะเวลาสกัดและปริมาณสารเติมแต่ง (%Additive) ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการสกัดสารสำคัญจากเหง้าไพล โดยใช้ Optimization Study Plan 1 ซึ่งออกแบบตามหลักการของ Response Surface Methodology (RSM) เพื่อระบุเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการสกัด

ภาพที่ 4.41 นำเสนอ Contour Plot และ Response Surface Plot ซึ่งช่วยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ ได้แก่ เวลาสกัดและปริมาณสารเติมแต่ง กับค่าการตอบสนองของสารสำคัญ ได้แก่ Compound D, DMPBD, Curcuminoid, DPPH, ABTS และ FRAP

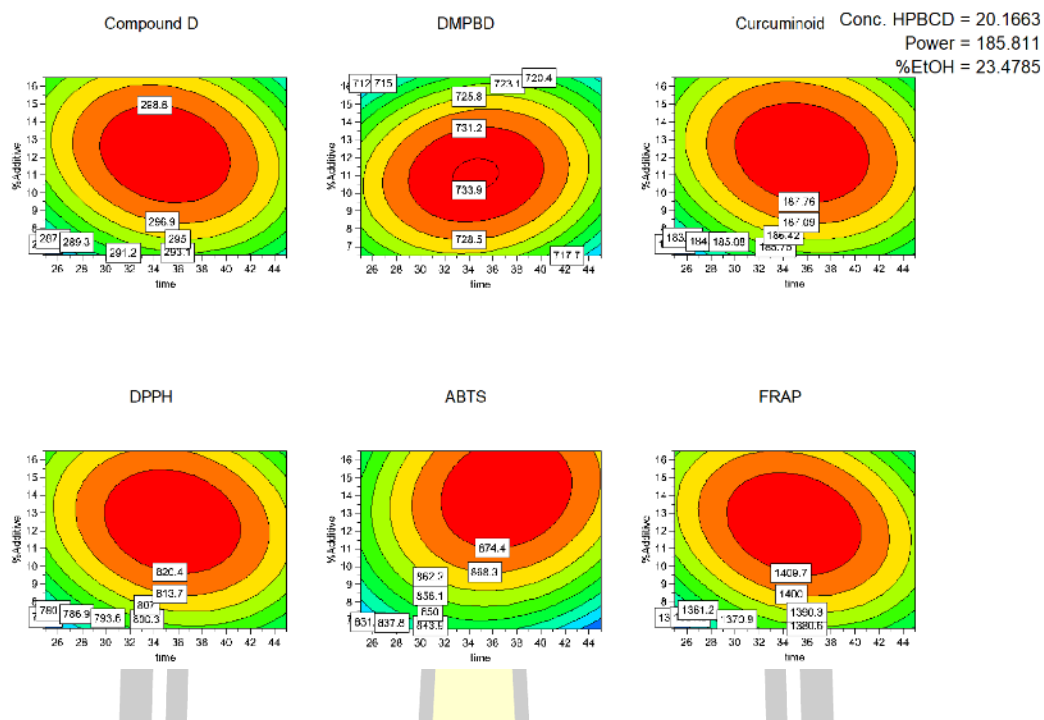
จาก Contour Plot พบว่า Compound D มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 288.8 $\mu\text{g/ml}$ เมื่อใช้เวลาสกัด 30-40 นาที และปริมาณสารเติมแต่ง 9-15% ในขณะที่ DMPBD มีค่าการตอบสนองสูงสุด 733.9 $\mu\text{g/ml}$ ภายใต้เงื่อนไขเวลาสกัด 29-40 นาที และปริมาณสารเติมแต่ง 8-14% ส่วน Curcuminoid ให้ค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 187.76 $\mu\text{g/ml}$ เมื่อใช้เวลาสกัด 30-40 นาที และปริมาณสารเติมแต่ง 10-15%

สำหรับสารที่เกี่ยวข้องกับฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ค่าการตอบสนองสูงสุดของ DPPH อยู่ที่ 820.4 $\mu\text{M TE}$ เมื่อเวลาสกัดอยู่ระหว่าง 30-40 นาที และปริมาณสารเติมแต่ง 10-15% ในขณะที่ ABTS มีค่าสูงสุดที่ 874.4 $\mu\text{M TE}$ ภายใต้เงื่อนไขเวลาสกัด 32-42 นาที และปริมาณสารเติมแต่ง 11-17% ส่วน FRAP มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 1409.7 $\mu\text{M TE}$ ในช่วงเวลาสกัด 29-40 นาที และปริมาณสารเติมแต่ง 10-15%

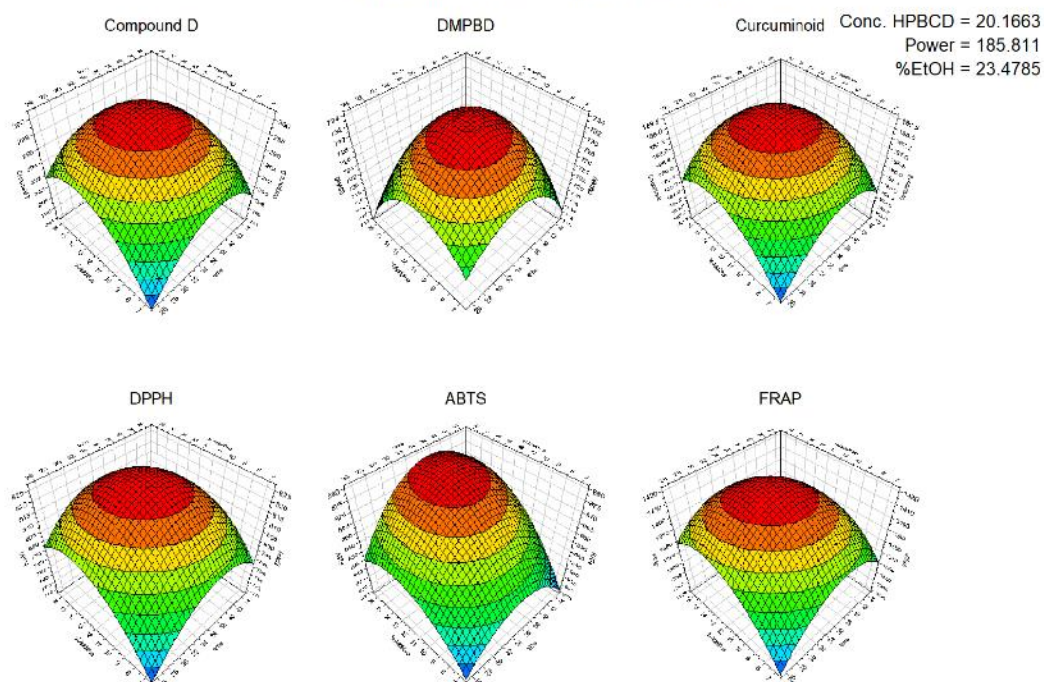
Response Surface Plot แสดงให้เห็นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าการตอบสนองตามตัวแปรอิสระ ซึ่งช่วยยืนยันว่าช่วงเวลาสกัดและปริมาณสารเติมแต่งที่ระบุเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพการสกัด

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า การเลือกใช้เวลาสกัดและปริมาณสารเติมแต่งที่เหมาะสมเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัดสารสำคัญจากเหง้าไพล ข้อมูลที่ได้จากการศึกษานี้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาและปรับปรุงกระบวนการสกัด เพื่อให้ได้สารออกฤทธิ์ในปริมาณสูงสุด

(A) Contour Plot of Optimization Study Plan 1



(B) Response Surface Plot of Optimization Study Plan 1



ภาพที่ 4.41 Contour Plot และ Surface Plot ความสัมพันธ์ระหว่าง Time และ %Additive
ในการศึกษา Optimization Study Plan 1

ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (Power) และความเข้มข้นของเอทานอล (%EtOH) ต่อค่าการตอบสนองใน Optimization Study Plan 1

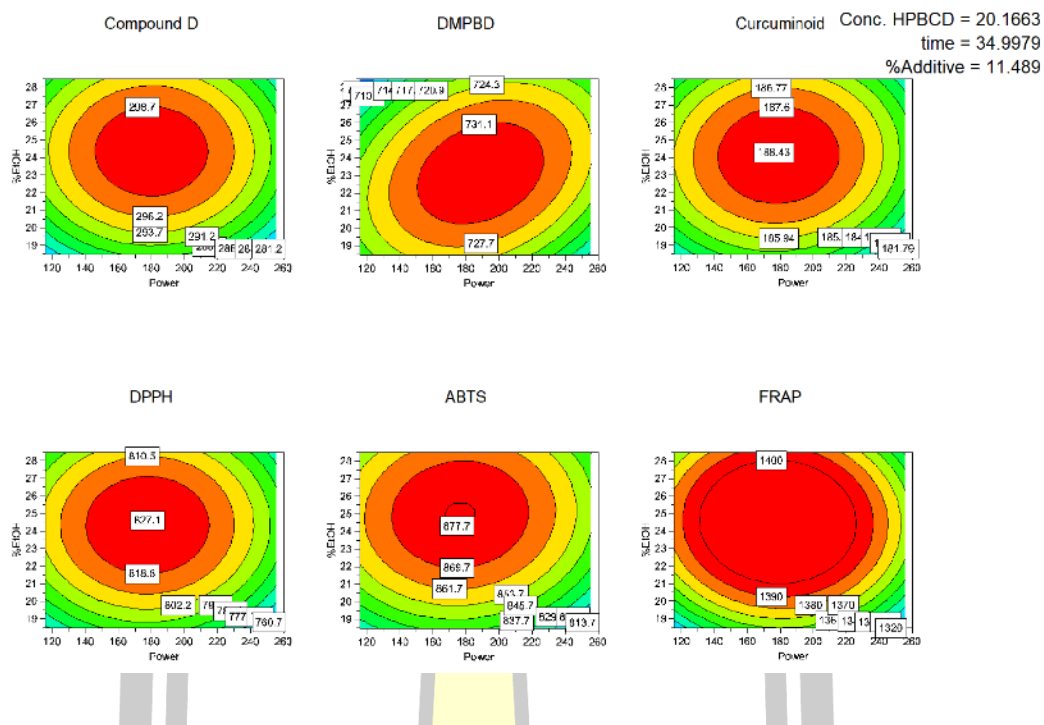
การศึกษานี้วิเคราะห์ผลของพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์และความเข้มข้นของเอทานอลที่มีผลต่อค่าการตอบสนองของสารสำคัญ ได้แก่ Compound D, DMPBD, Curcuminoid และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของ DPPH, ABTS และ FRAP โดยใช้ Contour Plot และ Response Surface Plot (รูปที่ 4.42) เพื่อติดตามแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงค่าการตอบสนองภายใต้ระดับของทั้งสองปัจจัย

จากการวิเคราะห์ Contour Plot พบว่า Compound D มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 298.7 $\mu\text{g/ml}$ เมื่อพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์อยู่ในช่วง 150-210 W และความเข้มข้นของเอทานอลอยู่ที่ 22-27% ซึ่งเป็นช่วงที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดได้อย่างเหมาะสม อย่างไรก็ตาม การใช้ความเข้มข้นของเอทานอลที่สูงเกินไปอาจทำให้เกิดภาวะอิมิตัวและลดปริมาณสารที่สกัดได้ DMPBD มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 731.1 $\mu\text{g/ml}$ ในช่วงพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ 150-220 W และความเข้มข้นของเอทานอลอยู่ที่ 21-26% หากพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์มากเกินไปหรือความเข้มข้นของเอทานอลเกินระดับที่เหมาะสม อาจทำให้เกิดการสลายตัวของสารสำคัญ Curcuminoid มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 187.6 $\mu\text{g/ml}$ เมื่อพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์อยู่ที่ 140-210 W และความเข้มข้นของเอทานอลอยู่ที่ 21-27% ซึ่งเป็นระดับที่ช่วยกระตุ้นการละลายของสารสำคัญ แต่หากใช้เอทานอลเข้มข้นเกินไป อาจส่งผลให้เกิดการแยกตัวของสารสกัดและลดประสิทธิภาพการสกัดลง

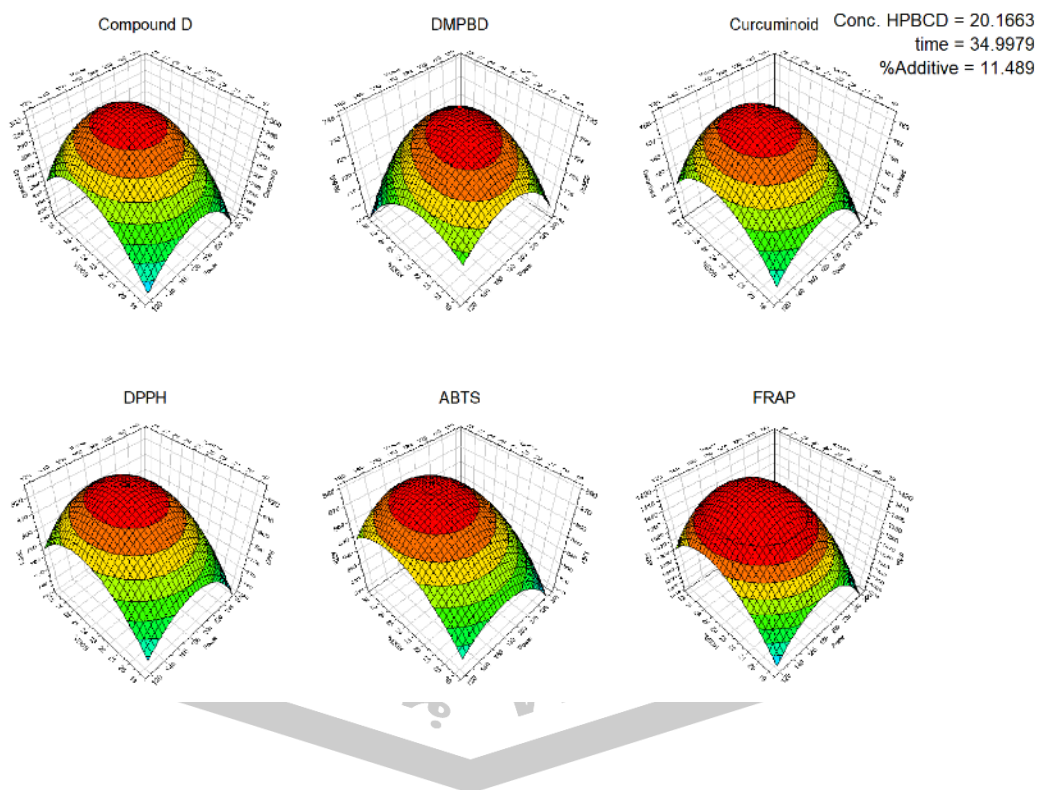
สำหรับฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัด พบว่าค่าการตอบสนองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์และความเข้มข้นของเอทานอลอยู่ในระดับที่เหมาะสม ค่า DPPH สูงสุดที่ 827.1 $\mu\text{M TE}$ เมื่อพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์อยู่ที่ 140-220 W และความเข้มข้นของเอทานอลอยู่ที่ 22-27% ส่วนค่า ABTS สูงสุดที่ 877.7 $\mu\text{M TE}$ ในช่วงพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ 140-220 W และความเข้มข้นของเอทานอลอยู่ที่ 22-28% ขณะที่ FRAP มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 1400 $\mu\text{M TE}$ เมื่อพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์อยู่ที่ 130-220 W และความเข้มข้นของเอทานอลอยู่ที่ 21-28%

จากการวิเคราะห์ Contour Plot และ Response Surface Plot พบว่าการควบคุมพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์และความเข้มข้นของเอทานอลให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมมีบทบาทสำคัญต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการสกัด หากใช้ความเข้มข้นของเอทานอลในระดับที่สูงเกินไป อาจทำให้เกิดการสลายตัวของสารสำคัญหรือเกิดภาวะอิมิตัวที่ลดประสิทธิภาพของกระบวนการสกัด การเลือกค่าที่เหมาะสมของทั้งสองปัจจัยจึงเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการพัฒนากระบวนการสกัดสารออกฤทธิ์จากเหง้าไพล

(A) Contour Plot of Optimization Study Plan 1



(B) Response Surface Plot of Optimization Study Plan 1



ภาพที่ 4.42 Contour Plot และ Surface Plot ความสัมพันธ์ระหว่าง Power และ %EtOH
ในการศึกษา Optimization Study Plan 1

ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (Power) และความเข้มข้นของสารเติมแต่ง (%Additive) ต่อค่าการตอบสนองใน Optimization Study Plan 1

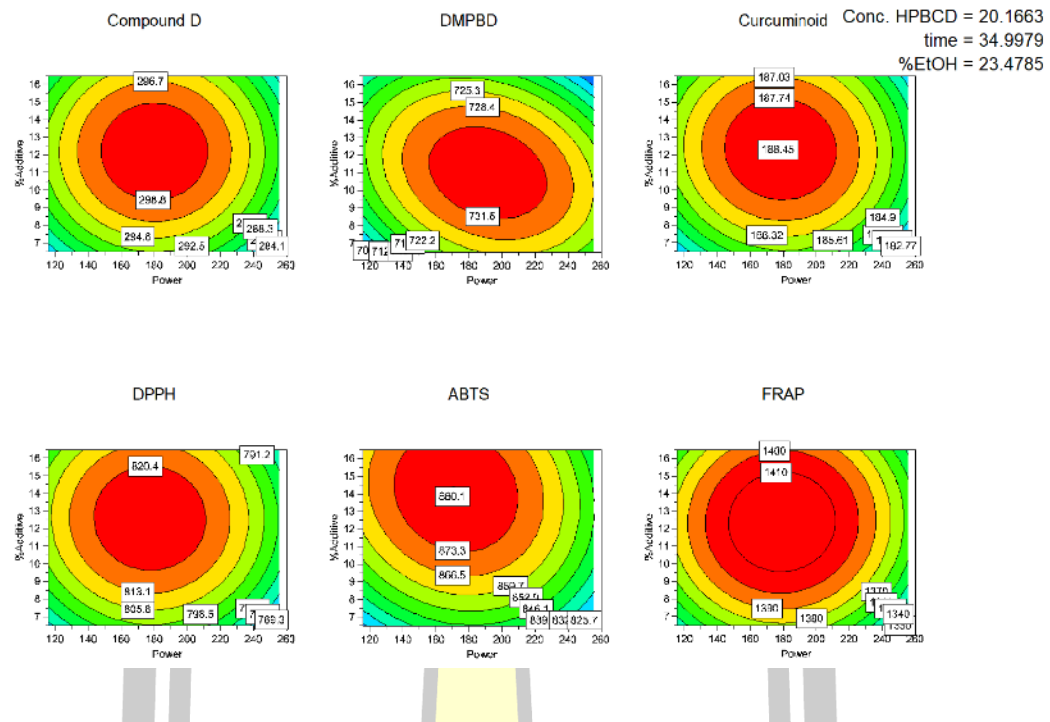
การศึกษานี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์ผลของพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์และความเข้มข้นของสารเติมแต่งที่มีผลต่อค่าการตอบสนองของสารสำคัญ ได้แก่ Compound D, DMPBD, Curcuminoid และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของ DPPH, ABTS และ FRAP โดยใช้ Contour Plot และ Response Surface Plot (รูปที่ 4.43) เพื่อติดตามแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงค่าการตอบสนองภายใต้ระดับของทั้งสองปัจจัย

จากการวิเคราะห์ Contour Plot พบว่า Compound D มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 296.7 $\mu\text{g/ml}$ เมื่อพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์อยู่ในช่วง 160-210 W และความเข้มข้นของสารเติมแต่งอยู่ที่ 10-15% ซึ่งเป็นช่วงที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดได้อย่างเหมาะสม อย่างไรก็ตาม การใช้ความเข้มข้นของสารเติมแต่งที่สูงเกินไปอาจทำให้เกิดภาวะอิมัตว์และลดปริมาณสารที่สกัดได้ DMPBD มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 731.5 $\mu\text{g/ml}$ ในช่วงพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ 150-220 W และความเข้มข้นของสารเติมแต่งอยู่ที่ 8-13% หากพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์มากเกินไปหรือความเข้มข้นของสารเติมแต่งเกินระดับที่เหมาะสม อาจทำให้เกิดการสลายตัวของสารสำคัญ Curcuminoid มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 188.45 $\mu\text{g/ml}$ เมื่อพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์อยู่ที่ 140-210 W และความเข้มข้นของสารเติมแต่งอยู่ที่ 9-15% ซึ่งเป็นระดับที่ช่วยกระตุ้นการละลายของสารสำคัญ แต่หากใช้สารเติมแต่งเข้มข้นเกินไป อาจส่งผลให้เกิดการแยกตัวของสารสกัดและลดประสิทธิภาพการสกัดลง

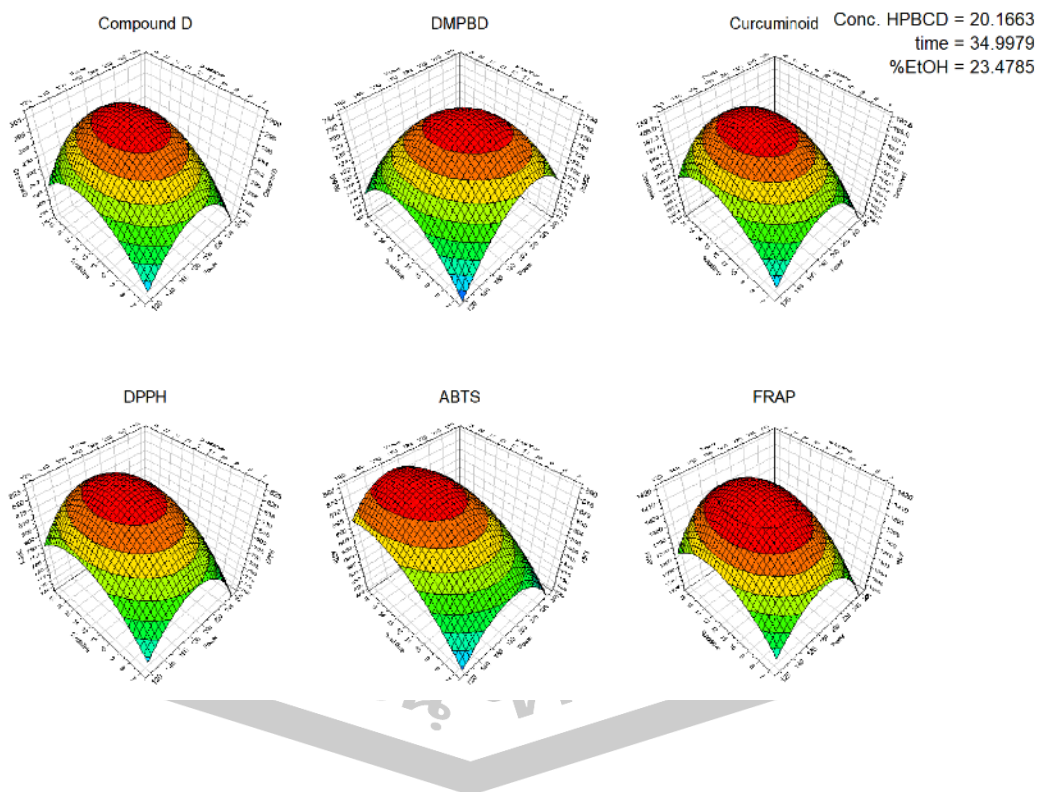
สำหรับฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัด พบว่าค่าการตอบสนองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์และความเข้มข้นของสารเติมแต่งอยู่ในระดับที่เหมาะสม ค่า DPPH สูงสุดที่ 820.4 $\mu\text{M TE}$ เมื่อพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์อยู่ที่ 140-210 W และความเข้มข้นของสารเติมแต่งอยู่ที่ 10-15% ส่วนค่า ABTS สูงสุดที่ 880.1 $\mu\text{M TE}$ ในช่วงพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ 150-210 W และความเข้มข้นของสารเติมแต่งอยู่ที่ 11-16% ขณะที่ FRAP มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 1410 $\mu\text{M TE}$ เมื่อพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์อยู่ที่ 130-220 W และความเข้มข้นของสารเติมแต่งอยู่ที่ 10-15%

จากการวิเคราะห์ Contour Plot และ Response Surface Plot พบว่าการควบคุมพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์และความเข้มข้นของสารเติมแต่งให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมมีบทบาทสำคัญต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการสกัด หากใช้สารเติมแต่งในระดับที่สูงเกินไป อาจทำให้เกิดการสลายตัวของสารสำคัญหรือเกิดภาวะอิมัตว์ที่ลดประสิทธิภาพของกระบวนการสกัด การเลือกค่าที่สมดุลของทั้งสองปัจจัยจึงเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการพัฒนากระบวนการสกัดสารออกฤทธิ์จากเหง้าโพล

(A) Contour Plot of Optimization Study Plan 1



(B) Response Surface Plot of Optimization Study Plan 1



ภาพที่ 4.43 Contour Plot และ Surface Plot ความสัมพันธ์ระหว่าง Power และ %Additive ในการศึกษา Optimization Study Plan 1

ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเอทานอล (%EtOH) และความเข้มข้นของสารเติมแต่ง (%Additive) ต่อค่าการตอบสนองใน Optimization Study Plan 1

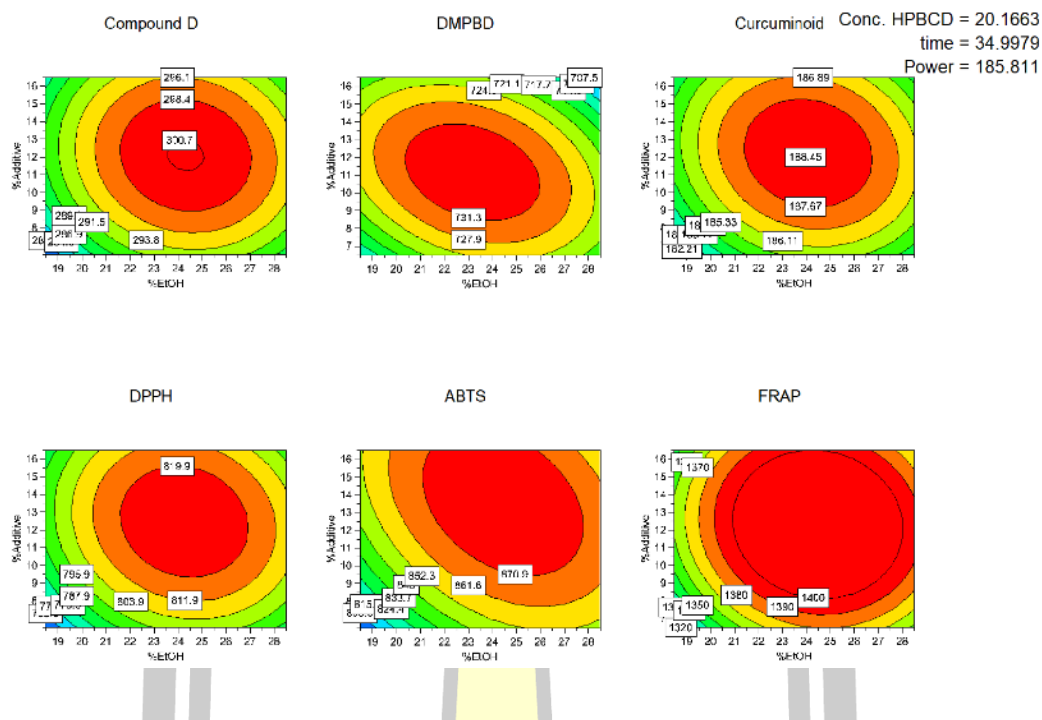
การศึกษานี้วิเคราะห์ผลของความเข้มข้นของเอทานอลและสารเติมแต่งที่มีต่อค่าการตอบสนองของสารสำคัญ ได้แก่ Compound D, DMPBD, Curcuminoid และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของ DPPH, ABTS และ FRAP โดยใช้ Contour Plot และ Response Surface Plot (รูปที่ 4.44) เพื่อติดตามแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงค่าการตอบสนองภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด

ผลการวิเคราะห์พบว่า Compound D มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 300.7 $\mu\text{g/ml}$ เมื่อความเข้มข้นของเอทานอลอยู่ในช่วง 22-27% และความเข้มข้นของสารเติมแต่งอยู่ที่ 9-15% ซึ่งเป็นช่วงที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดได้สูงสุด อย่างไรก็ตาม ความเข้มข้นของเอทานอลที่มากเกินไปอาจทำให้เกิดภาวะอิมิตัว ส่งผลให้ประสิทธิภาพการสกัดลดลง DMPBD มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 731.3 $\mu\text{g/ml}$ เมื่อความเข้มข้นของเอทานอลอยู่ระหว่าง 20-26% และความเข้มข้นของสารเติมแต่งอยู่ที่ 8-14% หากใช้ความเข้มข้นของเอทานอลและสารเติมแต่งเกินขอบเขตที่เหมาะสม อาจทำให้สารสำคัญเกิดการสลายตัว Curcuminoid มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 188.45 $\mu\text{g/ml}$ ในช่วงความเข้มข้นของเอทานอล 21-27% และสารเติมแต่ง 9-15% ซึ่งช่วยกระตุ้นการละลายของสารสำคัญ แต่หากใช้ความเข้มข้นของสารเติมแต่งสูงเกินไป อาจลดประสิทธิภาพการสกัด

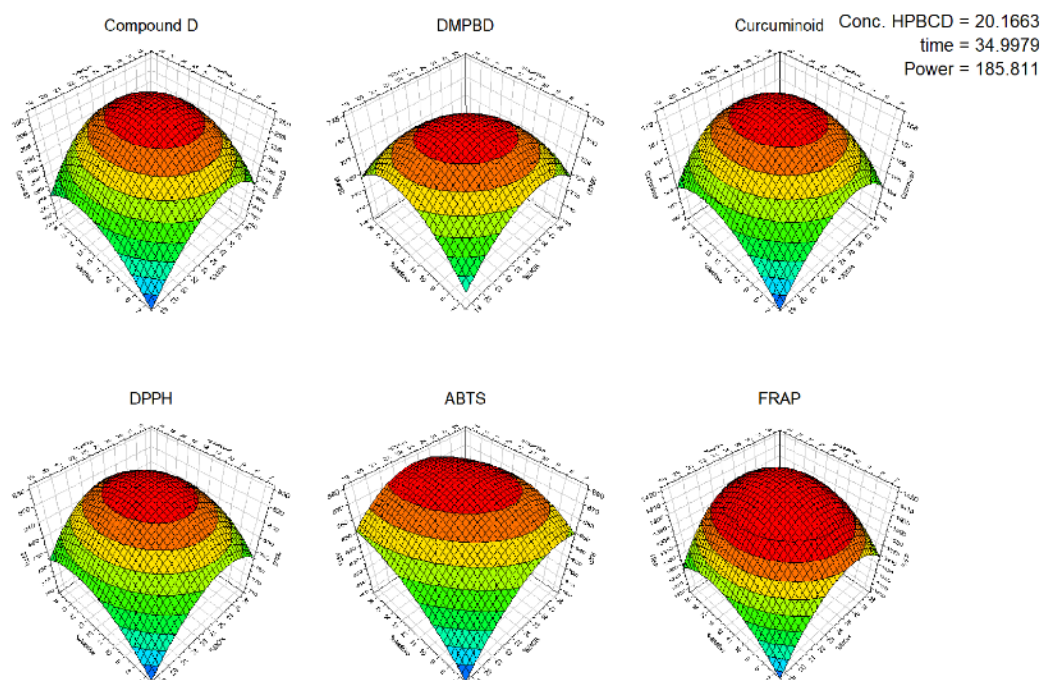
สำหรับฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ พบว่าค่าการตอบสนองเพิ่มขึ้นภายใต้ระดับความเข้มข้นของเอทานอลและสารเติมแต่งที่เหมาะสม ค่า DPPH สูงสุดที่ 819.9 $\mu\text{M TE}$ เมื่อความเข้มข้นของเอทานอลอยู่ที่ 22-27% และสารเติมแต่งที่ 9-15% ส่วนค่า ABTS สูงสุดที่ 870.9 $\mu\text{M TE}$ ในช่วงความเข้มข้นของเอทานอล 21-28% และสารเติมแต่ง 9-16% ในขณะที่ FRAP มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 1370 $\mu\text{M TE}$ เมื่อความเข้มข้นของเอทานอลอยู่ที่ 21-28% และสารเติมแต่งที่ 8-16%

จากผลการวิเคราะห์ Contour Plot และ Response Surface Plot การปรับค่าความเข้มข้นของเอทานอลและสารเติมแต่งให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสกัด การใช้สารเติมแต่งในปริมาณที่มากเกินไปอาจทำให้สารสำคัญเกิดการสลายตัวหรือภาวะอิมิตัว ซึ่งจะลดประสิทธิภาพของกระบวนการสกัด ดังนั้น การควบคุมและเลือกใช้ความเข้มข้นที่สมดุลของทั้งสองปัจจัยจึงมีความสำคัญต่อการพัฒนากระบวนการสกัดสารออกฤทธิ์จากเหง้าไพล

(A) Contour Plot of Optimization Study Plan 1



(B) Response Surface Plot of Optimization Study Plan 1



ภาพที่ 4.44 Contour Plot และ Surface Plot ความสัมพันธ์ระหว่าง %EtOH และ %Additive ในการศึกษา Optimization Study Plan 1

บทสรุปการวิเคราะห์ Contour Plot และ Surface Plot ใน Optimization Study

Plan 1

การศึกษานี้ได้ทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อค่าการตอบสนองของกระบวนการสกัดสารสำคัญจากเหง้าไพล โดยใช้ Contour Plot และ Response Surface Plot เพื่อระบุแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงค่าการตอบสนองภายใต้เงื่อนไขที่แตกต่างกัน ปัจจัยที่ถูกนำมาวิเคราะห์ ได้แก่ ความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทรีน (Conc. HPBCD), เวลาสกัด (Time), พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (Power), ความเข้มข้นของเอทานอล (%EtOH) และความเข้มข้นของสารเติมแต่ง (%Additive) ซึ่งทั้งหมดส่งผลต่อปริมาณสารสำคัญที่สกัดได้ รวมถึงฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของ DPPH, ABTS และ FRAP

จากการวิเคราะห์พบว่า

ความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทรีนมีบทบาทสำคัญต่อการเพิ่มปริมาณสารสำคัญที่สกัดได้ โดยเฉพาะเมื่อใช้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม อย่างไรก็ตาม ความเข้มข้นที่สูงเกินไปอาจทำให้เกิดการอุดตันตัวของสารสำคัญและลดประสิทธิภาพของการสกัด

เวลาสกัดมีผลโดยตรงต่อปริมาณสารที่ได้ โดยช่วงเวลาที่เหมาะสมสามารถช่วยเพิ่มการสกัดของสารออกฤทธิ์ได้สูงสุด แต่หากเวลาสกัดนานเกินไป อาจทำให้สารเสื่อมสลายได้

พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ช่วยเร่งกระบวนการสกัด แต่หากใช้พลังงานสูงเกินไป อาจทำให้เกิดการสลายตัวของสารออกฤทธิ์ได้

ความเข้มข้นของเอทานอลและสารเติมแต่งมีผลต่อการละลายและตรึงโมเลกุลของสารสำคัญในไฮโคลเด็กซ์ทรีน หากใช้ในระดับที่เหมาะสม จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัด แต่หากใช้มากเกินไป อาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมดุลของระบบและลดประสิทธิภาพของสารสกัด

การใช้ Contour Plot และ Response Surface Plot ช่วยให้เราสามารถระบุช่วงค่าที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยได้อย่างชัดเจน โดยค่าที่เหมาะสมสำหรับการสกัดสารสำคัญจากเหง้าไพลมีแนวโน้มอยู่ในช่วงค่าปานกลางของแต่ละตัวแปร ซึ่งช่วยให้ได้ปริมาณสารออกฤทธิ์สูงสุดและคงประสิทธิภาพของฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ

ดังนั้น การควบคุมและเลือกใช้ปัจจัยที่เหมาะสมเป็นสิ่งสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัด การใช้ค่าปัจจัยที่สูงหรือต่ำเกินไปอาจลดประสิทธิภาพของกระบวนการและทำให้เกิดการสลายตัวของสารออกฤทธิ์ การศึกษานี้สามารถใช้เป็นแนวทางสำหรับการพัฒนาและปรับปรุงกระบวนการสกัดสารออกฤทธิ์จากเหง้าไพลให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

4.3.1.5 การระบุจุดที่เหมาะสม (Optimization) ใน Optimization Study Plan 1

การศึกษาการระบุจุดที่เหมาะสมใน Optimization Study Plan 1 มีเป้าหมายเพื่อหาสถานะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการสกัดสารออกฤทธิ์จากไพล โดยผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ค่าการตอบสนองภายใต้สถานะที่เหมาะสมแสดงในตารางที่ 4.7) ให้เห็นว่า ค่า Compound D สูงสุดอยู่ที่ 300.551 $\mu\text{g/ml}$, ค่า DMPBD สูงสุดที่ 736.095 $\mu\text{g/ml}$, ค่า Curcuminoid สูงสุดที่ 188.193 $\mu\text{g/ml}$, ค่าการต้านอนุมูลอิสระ DPPH สูงสุดที่ 826.057 $\mu\text{M TE}$, ABTS สูงสุดที่ 876.559 $\mu\text{M TE}$, และ FRAP สูงสุดที่ 1,421.64 $\mu\text{M TE}$ ซึ่งบ่งชี้ว่าการปรับค่าปัจจัยให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดได้อย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าเป้าหมายของการเพิ่มประสิทธิภาพของตัวแปรตอบสนองใน Optimization Study Plan 5 จากโปรแกรม MODDE 7.0

Response Variable	Optimization Objective	Weight	Predicted Minimum Value	Predicted Maximum Value
Compound D	Maximize	1	294.884	300.551
DMPBD	Maximize	1	728.425	736.095
Curcuminoid	Maximize	1	186.248	188.193
DPPH	Maximize	1	806.921	826.057
ABTS	Maximize	1	860.091	876.559
FRAP	Maximize	1	1,393.23	1,421.64

เมื่อทำการวิเคราะห์แนวโน้มของค่าที่เหมาะสมโดยใช้ข้อมูลจากการทดลอง (ตารางที่ 4.8) พบว่าค่าความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทรีนอยู่ที่ 19.9-20.2 mM, เวลาสกัดที่ 34.5-35.2 นาที, กำลังคลื่นอัลตราซาวด์ที่ 182-188 W, ความเข้มข้นของเอทานอลอยู่ที่ 23.3-23.7% และความเข้มข้นของสารเติมแต่งอยู่ที่ 11.1-11.5% ให้ค่าการตอบสนองของสารออกฤทธิ์ในระดับสูงสุด แนวโน้มของข้อมูลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทรีนในระดับปานกลาง ร่วมกับเวลาสกัดที่ยาวขึ้นและกำลังคลื่นอัลตราซาวด์ในระดับกลางถึงสูง เป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการสกัด

ตารางที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์ค่าที่เหมาะสมของปัจจัยและค่าการตอบสนองใน Optimization Study Plan 1 จากโปรแกรม MODDE 7.0

No.	X3 (mM)	X5 (min)	X6 (W)	X7 (%EtOH)	X8 (%Add)	Y1 ($\mu\text{g/ml}$)	Y2 ($\mu\text{g/ml}$)	Y3 ($\mu\text{g/ml}$)	Y4 (μM TE)	Y5 (μM TE)	Y6 (μM TE)
1	20.1663	34.9979	185.811	23.4785	11.489	300.539	734.163	188.361	825.968	875.582	1418.23
2	20.0721	35.1927	182.995	23.3825	11.4077	300.5	734.133	188.362	825.947	875.498	1418.02
3	19.9404	34.8319	187.551	23.4695	11.3073	300.413	734.252	188.308	825.374	874.895	1417.49
4	20.2334	34.5395	188.339	23.7225	11.1448	300.439	734.229	188.293	825.243	874.622	1417.62
5	20.2835	34.811	187.564	23.45	11.405	300.442	734.23	188.32	825.489	874.866	1417.64
6	20.2835	34.811	187.564	23.45	11.405	300.442	734.23	188.32	825.489	874.866	1417.64
7	20.2835	34.811	187.564	23.45	11.405	300.442	734.23	188.32	825.489	874.866	1417.64
8	20.2835	34.811	187.564	23.45	11.405	300.442	734.23	188.32	825.489	874.866	1417.64

ผลการวิเคราะห์ยังแสดงให้เห็นถึงบทบาทของ ความเข้มข้นของเอทานอลและสารเติมแต่ง ที่มีอิทธิพลต่อค่าการตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ โดยพบว่าค่าการตอบสนองของ DPPH และ ABTS มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความเข้มข้นของเอทานอลเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นไปตามสมมติฐานที่ว่า เอทานอลสามารถช่วยในการสกัดสารออกฤทธิ์ที่มีขั้วปานกลาง และเพิ่มความสามารถในการละลายของสารออกฤทธิ์ที่อยู่ในโครงสร้างพืช อย่างไรก็ตาม ค่า DPPH มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยหากค่าความเข้มข้นของเอทานอลเพิ่มขึ้นเกินช่วง 23-24% ซึ่งอาจเป็นผลมาจากปฏิกิริยาของเอทานอลที่มีต่อสารประกอบฟีนอลิกในสารสกัด สำหรับความเข้มข้นของสารเติมแต่ง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อความเข้มข้นของสารเติมแต่งเพิ่มขึ้นในช่วง 11-12% ค่าการตอบสนองของสารต้านอนุมูลอิสระ ABTS และ FRAP มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากผลของสารเติมแต่งที่ช่วยเพิ่มความสามารถในการละลายของสารออกฤทธิ์ อย่างไรก็ตาม ความเข้มข้นที่สูงเกินไปอาจไม่ส่งผลดีเสมอไป เนื่องจากอาจส่งผลกระทบต่อสมดุลของสารสกัดและประสิทธิภาพของการสกัดโดยรวม

ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าจุดที่เหมาะสมที่สุดของกระบวนการสกัดใน Optimization Study Plan 1 อยู่ที่ ค่าความเข้มข้นของโซโคเลเด็กซ์ทรีน 19.9-20.2 mM, เวลาสกัด 34.5-35.2 นาที, กำลังคลื่นอัลตราซาวด์ 182-188 W, ความเข้มข้นของเอทานอล 23.3-23.7% และความเข้มข้นของสารเติมแต่ง 11.1-11.5% ภายใต้เงื่อนไขดังกล่าว ค่าการตอบสนองของสารออกฤทธิ์และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสามารถเพิ่มขึ้นสู่ค่าที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งบ่งชี้ว่าการควบคุมค่าปัจจัยเหล่านี้ให้อยู่

ในช่วงที่กำหนดสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดได้อย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ ยังสามารถนำข้อมูลดังกล่าวไปใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาและปรับปรุงกระบวนการสกัดสำหรับการประยุกต์ใช้ในเชิงพาณิชย์ต่อไป

4.3.1.6 การตรวจสอบความถูกต้องของค่าคาดการณ์ใน Optimization Study Plan 1

การตรวจสอบความถูกต้องของค่าคาดการณ์เป็นกระบวนการสำคัญที่ใช้ประเมินความแม่นยำของแบบจำลองที่ใช้ทำนายผลลัพธ์ของกระบวนการสกัด ใน Optimization Study Plan 1 โดยมีการกำหนดเงื่อนไขของการทดลอง ได้แก่ ความเข้มข้นของ HPBCD 20 mM, เวลาสกัด 35 นาที, กำลังของคลื่นอัลตราซาวด์ 186 วัตต์ (W), ความเข้มข้นของเอทานอล 23% (v/v), การเติมสารเพิ่มประสิทธิภาพ 11%

ตารางที่ 4.9 แสดงการเปรียบเทียบค่าคาดการณ์และค่าตรวจสอบ (Verification) ใน Optimization Study Plan 1

Compound	Prediction (Mean)	Prediction (Lower)	Prediction (Upper)	Verification (1)	Verification (2)	Verification (3)	ค่าเฉลี่ย
Compound D (µg/ml)	299.932	296.967	302.898	301.253	303.256	297.265	300.591
DMPBD (µg/ml)	734.257	731.69	736.823	740.256	735.622	733.621	736.500
Curcuminoid (µg/ml)	188.169	186.859	189.479	189.254	190.65	192.385	190.763
DPPH (µM TE)	823.728	810.714	836.742	825.329	825.49	840.325	830.381
ABTS (µM TE)	872.425	864.257	880.593	885.235	872.328	865.342	874.302
FRAP (µM TE)	1414.79	1399.84	1429.75	1423.256	1446.359	1412.369	1427.328

เพื่อประเมินความถูกต้องของค่าคาดการณ์จากแบบจำลอง ได้ทำการตรวจสอบค่าคาดการณ์ของสารสำคัญ ได้แก่ Compound D, DMPBD, Curcuminoid และค่าการทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ได้แก่ DPPH, ABTS และ FRAP เปรียบเทียบกับค่าทดลองที่ได้จากการตรวจสอบจริงในรูปแบบ Verification Triplicate ซึ่งเป็นการทดลองซ้ำสามครั้ง โดยผลลัพธ์ของการเปรียบเทียบค่าคาดการณ์และค่าตรวจสอบแสดงในตารางที่ 4.9 ในการตรวจสอบค่าคาดการณ์ ได้มีการนำค่าคาดการณ์ที่ได้จากแบบจำลองมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองจริงในรูปแบบ Verification

Triplicate โดยพิจารณาทั้งช่วงความเชื่อมั่นของค่าคาดการณ์ และการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (% Relative Error, %RE) ซึ่งหากค่าคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง $\leq 5\%$ ถือว่าค่าคาดการณ์มีความแม่นยำเพียงพอ

จากการวิเคราะห์พบว่า ค่าของ Compound D มีค่าคาดการณ์เฉลี่ยอยู่ที่ 299.932 $\mu\text{g/ml}$ ขณะที่ค่าตรวจสอบจริงเฉลี่ยอยู่ที่ 300.591 $\mu\text{g/ml}$ ส่งผลให้ค่า %RE เท่ากับ 0.22% ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำมาก แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถทำนายผลของสารประกอบนี้ได้อย่างแม่นยำ โดยค่าที่ตรวจสอบได้จริงทั้งหมดอยู่ในช่วงค่าคาดการณ์ที่กำหนดไว้ระหว่าง 296.967 – 302.898 $\mu\text{g/ml}$

สำหรับ DMPBD ค่าคาดการณ์เฉลี่ยอยู่ที่ 734.257 $\mu\text{g/ml}$ โดยค่าตรวจสอบจริงเฉลี่ยอยู่ที่ 736.500 $\mu\text{g/ml}$ ส่งผลให้ค่า %RE เท่ากับ 0.31% ซึ่งต่ำมากและสามารถยอมรับได้ ค่าที่ตรวจสอบได้จริงทั้งหมดอยู่ในช่วงค่าคาดการณ์ที่กำหนดไว้ระหว่าง 731.690 – 736.823 $\mu\text{g/ml}$ แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองมีประสิทธิภาพสูงในการทำนายค่าของสารนี้

ในส่วนของ Curcuminoid ซึ่งเป็นสารสำคัญที่ต้องการศึกษาและมีหน่วยเป็น $\mu\text{g/ml}$ ค่าคาดการณ์เฉลี่ยที่ได้อยู่ที่ 188.169 $\mu\text{g/ml}$ ขณะที่ค่าตรวจสอบจริงเฉลี่ยอยู่ที่ 190.763 $\mu\text{g/ml}$ ส่งผลให้ค่า %RE เท่ากับ 1.38% แม้ว่าค่าคลาดเคลื่อนจะสูงกว่าสารตัวอื่น แต่ยังคงอยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้ โดยค่าที่ตรวจสอบได้จริงทั้งหมดอยู่ในช่วงค่าคาดการณ์ที่กำหนดไว้ระหว่าง 186.859 – 189.479 $\mu\text{g/ml}$ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถใช้ทำนายค่าของสารประกอบกลุ่มเคอร์คูมินอยด์ได้อย่างแม่นยำ

เมื่อพิจารณาค่าผลลัพธ์ของ DPPH พบว่าค่าคาดการณ์เฉลี่ยอยู่ที่ 823.728 $\mu\text{M TE}$ ขณะที่ค่าตรวจสอบจริงเฉลี่ยอยู่ที่ 830.381 $\mu\text{M TE}$ ส่งผลให้ค่า %RE เท่ากับ 0.81% ซึ่งอยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้ โดยค่าที่ตรวจสอบได้จริงทั้งหมดอยู่ในช่วงค่าคาดการณ์ที่กำหนดไว้ระหว่าง 810.714 – 836.742 $\mu\text{M TE}$ แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองมีความแม่นยำสูงในการพยากรณ์ค่าของสารต้านอนุมูลอิสระ DPPH

สำหรับค่าการทดสอบ ABTS ค่าคาดการณ์เฉลี่ยอยู่ที่ 872.425 $\mu\text{M TE}$ ขณะที่ค่าตรวจสอบจริงเฉลี่ยอยู่ที่ 874.302 $\mu\text{M TE}$ ส่งผลให้ค่า %RE เท่ากับ 0.22% ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำมาก แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถพยากรณ์ค่าการทดสอบ ABTS ได้อย่างแม่นยำ โดยค่าที่ตรวจสอบได้จริงทั้งหมดอยู่ในช่วงค่าคาดการณ์ที่กำหนดไว้ระหว่าง 864.257 – 880.593 $\mu\text{M TE}$

สุดท้ายคือค่าการทดสอบ FRAP ค่าคาดการณ์เฉลี่ยอยู่ที่ 1414.790 $\mu\text{M TE}$ ขณะที่ค่าตรวจสอบจริงเฉลี่ยอยู่ที่ 1427.328 $\mu\text{M TE}$ ส่งผลให้ค่า %RE เท่ากับ 0.89% ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำมาก โดยค่าที่ตรวจสอบได้จริงทั้งหมดอยู่ในช่วงค่าคาดการณ์ที่กำหนดไว้ระหว่าง 1399.840 – 1429.750 $\mu\text{M TE}$ สะท้อนว่าแบบจำลองสามารถพยากรณ์ค่าของสารต้านอนุมูลอิสระ FRAP ได้อย่างแม่นยำ

จากผลการวิเคราะห์ทั้งหมดพบว่า ค่าคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (%RE) ของสารส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 0.22% - 1.38% ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์ 5% ที่กำหนดไว้ในเกณฑ์การยอมรับของแบบจำลอง ซึ่งค่า Curcuminoid ที่มีค่าคลาดเคลื่อนสูงกว่าสารตัวอื่นเล็กน้อย แต่ยังอยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า แบบจำลองที่ใช้มีความแม่นยำสูงและสามารถใช้เป็นแนวทางในการพยากรณ์ผลลัพธ์ของกระบวนการสกัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม ค่าคลาดเคลื่อนของสารบางชนิด เช่น Curcuminoid ที่มีค่า %RE สูงกว่า 1% อาจเป็นข้อบ่งชี้ถึงความจำเป็นในการปรับปรุงแบบจำลองให้เหมาะสมยิ่งขึ้นในอนาคต เพื่อเพิ่มความแม่นยำของการทำนายสำหรับตัวแปรเหล่านี้

4.3.1.7 บทสรุปผลการศึกษาการปรับสภาวะการสกัด Optimization Study Plan 1

การศึกษาขั้นตอน Optimization Study Plan 1 ดำเนินการโดยใช้ Central Composite Design (CCD) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการสกัดสารออกฤทธิ์จากเหง้าไพล โดยมุ่งเน้นการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการสกัด ได้แก่ ความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทรีน เวลาสกัด พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ ความเข้มข้นของเอทานอล และความเข้มข้นของสารเติมแต่ง ซึ่งส่งผลต่อปริมาณสารสำคัญที่ได้จากการสกัด รวมถึงฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดที่ได้

จากการศึกษาพบว่า พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์และความเข้มข้นของเอทานอลเป็นปัจจัยที่มีผลกระทบอย่างมากต่อค่าการตอบสนองของกระบวนการสกัด หากใช้พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์หรือความเข้มข้นของเอทานอลในระดับสูงเกินไป อาจทำให้ปริมาณสารสำคัญที่สกัดได้ลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากการสลายตัวของสารออกฤทธิ์ภายใต้สภาวะที่ไม่เหมาะสม อย่างไรก็ตาม การควบคุมค่าของปัจจัยเหล่านี้ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดได้อย่างมีนัยสำคัญ

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าภายใต้สภาวะที่เหมาะสม ปริมาณ Compound D ที่สกัดได้จริงเฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่ 300.591 $\mu\text{g/ml}$ ปริมาณ DMPBD สูงสุดที่ 736.500 $\mu\text{g/ml}$ และปริมาณ Curcuminoid สูงสุดที่ 190.763 $\mu\text{g/ml}$ นอกจากนี้ สารสกัดยังแสดงฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระที่ดี โดยค่าการตอบสนองของ DPPH assay อยู่ที่ 830.381 $\mu\text{M TE}$, ABTS assay ที่ 874.302 $\mu\text{M TE}$ และ FRAP assay ที่ 1427.328 $\mu\text{M TE}$ ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงประสิทธิภาพของสารสกัดในการต้านอนุมูลอิสระ

การวิเคราะห์แบบจำลองเชิงสถิติพบว่าค่า R^2 ซึ่งใช้วัดความสามารถของแบบจำลองในการอธิบายความแปรปรวนของข้อมูล อยู่ในช่วง 0.9898 – 0.9976 บ่งบอกว่าแบบจำลองที่ใช้มีความแม่นยำสูง ในขณะที่ค่า Q^2 ซึ่งสะท้อนถึงความสามารถในการพยากรณ์ อยู่ในช่วง 0.7758 – 0.8205 แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการคาดการณ์ผลลัพธ์ที่ดี

ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าจุดที่เหมาะสมที่สุดของกระบวนการสกัดใน Optimization Study Plan 1 อยู่ที่ ค่าความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทรีน 19.9-20.2 mM, เวลาสกัด 34.5-35.2

นาที, กำลังคลื่นอัลตราซาวด์ 182-188 W, ความเข้มข้นของเอทานอล 23.3-23.7% และความเข้มข้นของสารเติมแต่ง 11.1-11.5% ภายใต้เงื่อนไขดังกล่าว ค่าการตอบสนองของสารออกฤทธิ์และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสามารถเพิ่มขึ้นสู่ค่าที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งบ่งชี้ว่าการควบคุมค่าปัจจัยเหล่านี้ให้อยู่ในช่วงที่กำหนดสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดได้อย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ ยังสามารถนำข้อมูลดังกล่าวไปใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาและปรับปรุงกระบวนการสกัดสำหรับการประยุกต์ใช้ในเชิงพาณิชย์ต่อไป

โดยสรุป การศึกษานี้เน้นให้เห็นถึงความสำคัญของการควบคุมค่าพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์และความเข้มข้นของเอทานอลในกระบวนการสกัดสารสำคัญจากเหง้าไพล การใช้สารเติมแต่งในปริมาณที่เหมาะสมยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดและเสริมฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัด อย่างไรก็ตาม การเลือกใช้สภาวะการสกัดที่เหมาะสมมีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากหากใช้ค่าปัจจัยสูงเกินไป อาจทำให้ปริมาณสารสำคัญที่ได้อาจลดลงแทนที่จะเพิ่มขึ้น

ผลการศึกษานำไปใช้เป็นแนวทางในการพัฒนากระบวนการสกัดสารจากเหง้าไพลให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ทั้งในแง่ของปริมาณสารสำคัญที่สกัดได้และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ซึ่งอาจเป็นประโยชน์ต่อการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์เสริมอาหารและเครื่องสำอางในอนาคต การใช้ Response Surface Methodology (RSM) ถือเป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพในการพัฒนากระบวนการสกัดและช่วยเพิ่มคุณภาพของสารสกัดที่ได้อย่างเป็นระบบและแม่นยำ



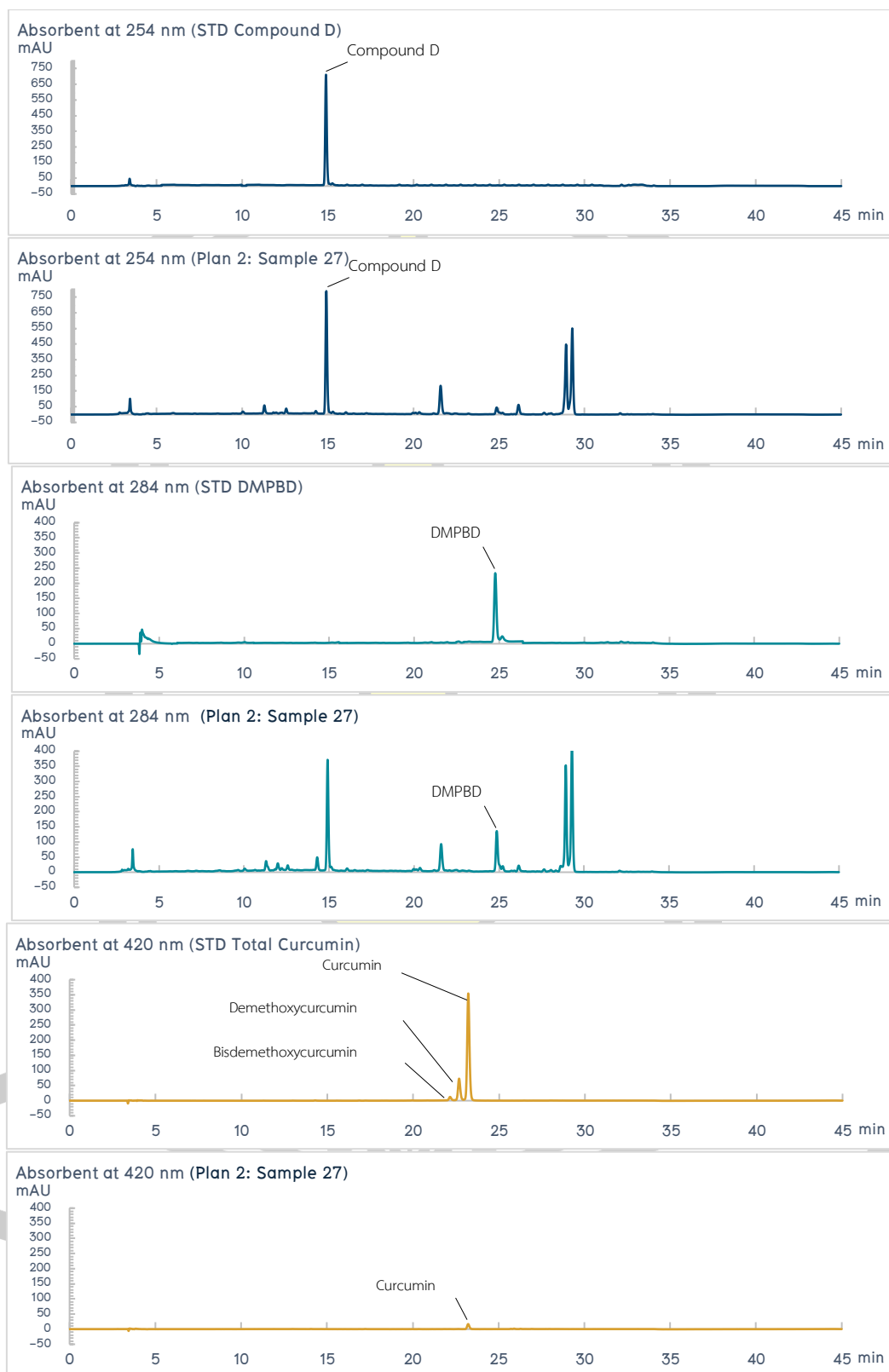
4.3.2 ผลการวิเคราะห์ Optimization study Plan 2

การทดลองใน Plan 2 ได้รับการออกแบบโดยใช้ Central Composite Design (CCD) เช่นเดียวกับ Plan 1 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีต่อประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดสารสำคัญจากเหง้าไพล และเพื่อกำหนดสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเพิ่มปริมาณสารออกฤทธิ์และฤทธิ์ด้านอนุมูลอิสระของสารสกัด โดยเฉพาะการศึกษาผลของการใช้ HPBCD ร่วมกับเอทานอล ต่อกระบวนการสกัด ซึ่งเป็นระบบตัวทำละลายร่วมที่มีบทบาทสำคัญในการเพิ่มการละลายของสารสำคัญ จากผลการศึกษาใน Screening Study พบว่า HPBCD และ น้ำหนักของสมุนไพร เป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการสกัด ดังนั้น ในขั้นตอน Optimization Study Plan 2 จึงเน้นไปที่การศึกษาอิทธิพลของ HPBCD ร่วมกับเอทานอล ในการเพิ่มประสิทธิภาพของการละลายและกักเก็บสารออกฤทธิ์ โดยประเมินว่าสภาวะที่ใช้ HPBCD สามารถช่วยปรับปรุงกระบวนการสกัดเมื่อไม่มีการใช้สารช่วยอื่น ๆ ได้อย่างไร ซึ่ง HPBCD ทำหน้าที่หลักในการสร้าง Inclusion Complex กับสารสำคัญของไพล ซึ่งช่วยเพิ่มการละลายและลดการเสื่อมสภาพของสาร ขณะที่เอทานอลทำหน้าที่เป็นตัวทำละลายร่วมที่ช่วยเพิ่มความสามารถในการดึงสารออกฤทธิ์จากเนื้อเยื่อพืช รวมถึงช่วยลดความหนืดของระบบ ทำให้กระบวนการสกัดมีประสิทธิภาพสูงขึ้น เพื่อให้ได้ข้อมูลที่สามารถนำไปกำหนดสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสกัด ปัจจัยกระบวนการ (Process Factors) ที่ศึกษาในแผนนี้ ได้แก่ X3, X5, X6 และ X7 ซึ่งเป็นตัวแปรที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ในการเพิ่มประสิทธิภาพของการสกัดสารออกฤทธิ์ ข้อมูลรายละเอียดของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองแสดงใน ตารางที่ 4.10

การวิเคราะห์โครมาโตแกรมของตัวอย่างสารสกัดจากเหง้าไพลใน Plan 2 (ภาพที่ 4.45) ได้รับการดำเนินการโดยใช้เครื่อง HPLC (High-Performance Liquid Chromatography) เพื่อแยกและตรวจวัดปริมาณของสารสำคัญ โครมาโตแกรมที่ได้แสดงให้เห็นพีคของสารสำคัญ เช่น Curcumin, Demethoxycurcumin (DMC), Bisdemethoxycurcumin (BDMC) และสารเฉพาะในเหง้าไพลอย่าง Compound D และ DMPBD ซึ่งลักษณะพีคของสารเหล่านี้มีความชัดเจนและไม่มีการซ้อนทับกันมากนัก ทำให้สามารถคำนวณค่าปริมาณของสารสำคัญได้อย่างแม่นยำ เมื่อพิจารณาพื้นที่ใต้กราฟ (Area Under the Curve, AUC) ของแต่ละพีค พบว่าค่าที่ได้มีความสอดคล้องกับค่าการตอบสนองที่ระบุในตารางผลลัพธ์

ตารางที่ 4.10 แสดงผลการศึกษาการสกัดสารสำคัญจากเหง้าไพลชั้นตอน Optimization study
Plan 2

DESIGN POINT	PROCESS FACTOR				RESPONSE					
	X3 (mM)	X5 (min)	X6 (W)	X7 (%EtOH)	Y1 (µg/ml)	Y2 (µg/ml)	Y3 (µg/ml)	Y4 (µM TE)	Y5 (µM TE)	Y6 (µM TE)
N1	10 (-1)	20 (-1)	140 (-1)	20 (-1)	248.755	442.475	19.761	132.995	204.420	77.500
N2	30 (1)	20 (-1)	140 (-1)	20 (-1)	254.520	472.980	21.254	157.045	303.685	188.500
N3	10 (-1)	40 (1)	140 (-1)	20 (-1)	252.570	464.900	20.329	128.900	259.910	157.500
N4	30 (1)	40 (1)	140 (-1)	20 (-1)	254.675	483.135	22.417	192.415	307.180	221.000
N5	10 (-1)	20 (-1)	280 (1)	20 (-1)	256.150	484.530	22.577	197.290	340.255	224.500
N6	30 (1)	20 (-1)	280 (1)	20 (-1)	254.095	476.350	21.640	168.775	294.100	207.500
N7	10 (-1)	40 (1)	280 (1)	20 (-1)	256.685	492.120	22.874	206.310	352.180	267.500
N8	30 (1)	40 (1)	280 (1)	20 (-1)	255.355	485.255	22.660	199.815	322.415	241.500
N9	10 (-1)	20 (-1)	140 (-1)	30 (1)	257.255	497.585	24.072	242.760	364.970	299.000
N10	30 (1)	20 (-1)	140 (-1)	30 (1)	255.245	480.235	22.085	182.310	319.940	243.500
N11	10 (-1)	40 (1)	140 (-1)	30 (1)	260.035	506.885	25.137	275.165	427.390	400.000
N12	30 (1)	40 (1)	140 (-1)	30 (1)	256.135	497.205	24.028	241.440	339.940	301.500
N13	10 (-1)	20 (-1)	280 (1)	30 (1)	272.670	595.570	35.293	584.155	725.655	910.000
N14	30 (1)	20 (-1)	280 (1)	30 (1)	264.785	548.960	29.955	421.755	533.790	579.000
N15	10 (-1)	40 (1)	280 (1)	30 (1)	278.265	626.075	38.787	640.435	836.045	1005.500
N16	30 (1)	40 (1)	280 (1)	30 (1)	267.535	558.140	31.007	453.750	595.445	654.000
N17	10 (-1)	30 (0)	210 (0)	25 (0)	274.525	591.240	34.957	547.730	667.635	745.500
N18	30 (1)	30 (0)	210 (0)	25 (0)	271.025	565.605	31.862	479.755	595.265	642.000
N19	20 (0)	20 (-1)	210 (0)	25 (0)	272.120	555.880	30.175	448.455	586.160	612.500
N20	20 (0)	40 (1)	210 (0)	25 (0)	273.390	567.460	32.074	486.210	614.660	666.000
N21	20 (0)	30 (0)	140 (-1)	25 (0)	269.505	546.310	29.652	412.535	538.775	572.000
N22	20 (0)	30 (0)	280 (1)	25 (0)	277.565	597.240	35.484	589.960	708.260	859.500
N23	20 (0)	30 (0)	210 (0)	20 (-1)	265.025	542.655	29.233	399.795	539.180	547.000
N24	20 (0)	30 (0)	210 (0)	30 (1)	277.255	598.285	36.267	632.370	813.385	925.500
N25	20 (0)	30 (0)	210 (0)	25 (0)	276.900	589.825	34.635	564.135	693.345	747.500
N26	20 (0)	30 (0)	210 (0)	25 (0)	278.320	595.765	35.315	584.830	725.180	761.500
N27	20 (0)	30 (0)	210 (0)	25 (0)	274.795	604.350	36.299	610.855	745.800	814.500



ภาพที่ 4.45 โครมาโทแกรมของตัวอย่างสารสกัดจากเหง้าโพลในขั้นตอน Optimization study Plan 2 และสารมาตรฐานวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC

4.3.2.1 การวิเคราะห์ความสอดคล้องของแบบจำลอง (Model Adequacy Check)

ผลการวิเคราะห์ในขั้นตอน Optimization Study Plan 2 ได้รับการประเมินความสอดคล้องของแบบจำลองผ่านตัวชี้วัดสำคัญ ได้แก่ ค่า R^2 , Adjusted R^2 , ค่า Q^2 , ค่า Residual Standard Deviation (RSD), ค่า Model Validity และ Reproducibility เพื่อยืนยันความเหมาะสมและเสถียรภาพของแบบจำลองในการอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลและความสามารถในการพยากรณ์ผลลัพธ์ของกระบวนการสกัด

ตารางที่ 4.11 แสดง Model Validation Summary ของขั้นตอน Optimization study Plan 2

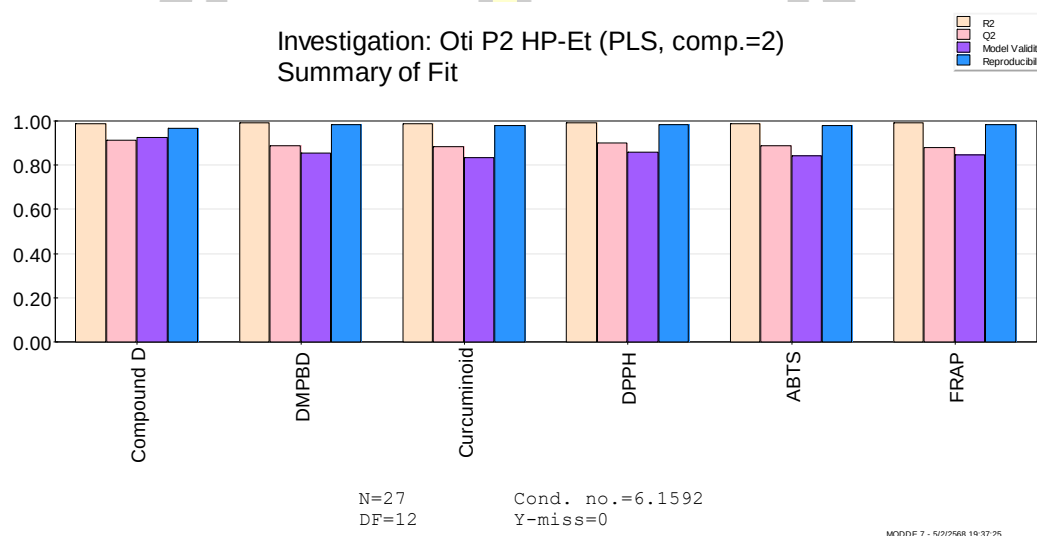
Parameters	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6
N	27	27	27	27	27	27
R^2	0.989334	0.990649	0.989203	0.991735	0.989474	0.991479
R^2 Adj.	0.976891	0.979739	0.976607	0.982093	0.977194	0.981537
Q^2	0.913996	0.886145	0.883591	0.901113	0.886445	0.877811
RSD	1.48629	7.63313	0.92813	24.1468	28.8083	37.9113

ตารางที่ 4.11 แสดง Model Validation Summary ของขั้นตอน Optimization Study Plan 2 ซึ่งใช้ข้อมูลจากการทดลอง 27 ชุด ($N = 27$) ค่าความสามารถของแบบจำลอง (R^2) สำหรับค่าการตอบสนอง Y1 ถึง Y6 มีค่าตั้งแต่ 0.989203 ถึง 0.991735 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้อย่างแม่นยำสูง โดยค่าที่สูงที่สุดพบใน Y4 (DPPH) ซึ่งมีค่า $R^2 = 0.991735$ บ่งชี้ว่าแบบจำลองสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้อย่างสมบูรณ์ใกล้เคียง 100%

ค่า Adjusted R^2 ซึ่งเป็นค่าที่ปรับปรุงจากค่า R^2 โดยคำนึงถึงจำนวนตัวแปรในแบบจำลอง พบว่ามีค่าตั้งแต่ 0.976607 ถึง 0.982093 โดยเฉพาะค่าการตอบสนอง Y4 (DPPH) และ Y6 (FRAP) มีค่า Adjusted R^2 สูงสุดที่ 0.982093 และ 0.981537 ตามลำดับ ซึ่งบ่งชี้ว่าแบบจำลองมีเสถียรภาพสูงหลังจากปรับค่าตามจำนวนตัวแปรอิสระ

ค่า Q^2 ใช้ประเมินความสามารถของแบบจำลองในการพยากรณ์ผลของข้อมูลใหม่ ซึ่งค่าที่มากกว่า 0.5 แสดงถึงความสามารถในการพยากรณ์ที่ดี จากผลการวิเคราะห์ ค่า Q^2 ของค่าการตอบสนอง Y1 ถึง Y6 มีค่าตั้งแต่ 0.877811 ถึง 0.913996 โดยค่าที่สูงที่สุดพบใน Y1 (Compound D) ซึ่งมีค่า Q^2 เท่ากับ 0.913996 แสดงว่าแบบจำลองมีศักยภาพสูงในการพยากรณ์ค่าการตอบสนองนี้

ในด้านของค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานหรือ Residual Standard Deviation (RSD) ซึ่งใช้ในการประเมินความแม่นยำของแบบจำลอง พบว่ามีค่าตั้งแต่ 6.06828 ถึง 37.9113 โดยค่าที่ต่ำสุดพบใน Y3 (Curcuminoid) มีค่า RSD เท่ากับ 6.06828 แสดงว่าแบบจำลองสามารถพยากรณ์ค่าการตอบสนองของสาร Curcuminoid ได้อย่างแม่นยำสูง ขณะที่ค่าที่สูงที่สุดพบใน Y6 (FRAP) ซึ่งมีค่า RSD เท่ากับ 37.9113 ซึ่งอาจเกิดจากความแปรปรวนที่สูงในกระบวนการทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ



ภาพที่ 4.46 กราฟ Summary of Fit แสดงผลค่า R² และ Q² สำหรับแต่ละตัวแปรของ ขั้นตอน Optimization study Plan 2

จากภาพที่ 4.46 ซึ่งเป็น Summary of Fit แสดงให้เห็นถึงความสามารถของแบบจำลองในแต่ละค่าการตอบสนอง ค่า R² และ Q² มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันในทุกค่าการตอบสนอง ซึ่งหมายความว่าแบบจำลองสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลและสามารถพยากรณ์ผลลัพธ์ได้ดี นอกจากนี้ ค่า Model Validity ของค่าการตอบสนองทุกตัวอยู่ในระดับสูงกว่า 0.83 สะท้อนให้เห็นว่าแบบจำลองไม่มีความเบี่ยงเบนที่สำคัญระหว่างค่าจริงและค่าคาดการณ์

ค่า Reproducibility ซึ่งแสดงถึงความสามารถของแบบจำลองในการให้ผลลัพธ์ซ้ำได้ภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน พบว่าค่าการตอบสนอง Y1 ถึง Y6 มีค่าตั้งแต่ 0.967094 ถึง 0.983955 ซึ่งสูงกว่า 0.9 ในทุกตัวแปร แสดงว่าแบบจำลองมีความเสถียรสูงและให้ผลลัพธ์ที่สามารถทำซ้ำได้

ผลการวิเคราะห์ความสอดคล้องของแบบจำลองใน Optimization Study Plan 2 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นมีความเหมาะสมและมีความสามารถสูงในการอธิบายความแปรปรวนของข้อมูล ค่าทางสถิติ เช่น R², Adjusted R², Q², Model Validity และ Reproducibility ต่างอยู่

ในระดับสูง และค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานที่ต่ำในบางค่าการตอบสนองสนับสนุนว่าแบบจำลองมีความแม่นยำสูง เหมาะสมสำหรับนำไปใช้ในการวิเคราะห์และพยากรณ์ค่าการตอบสนองของกระบวนการสกัดสารสำคัญ

4.3.2.2 การวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัย (Effect Analysis)

ในการศึกษาขั้นตอน Optimization Study Plan 2 ซึ่งใช้ Central Composite Design (CCD) ได้ทำการวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีต่อค่าการตอบสนอง (Y1 - Y6) เพื่อทำความเข้าใจถึงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยอิสระที่ใช้ในการสกัดสารสำคัญและผลลัพธ์ที่ได้ การศึกษานี้มุ่งเน้นไปที่ การวิเคราะห์ผลกระทบหลัก (Main Effects Analysis), การวิเคราะห์ผลกระทบของการปฏิสัมพันธ์ (Interaction Effects Analysis), ผลกระทบเชิงกำลังสอง (Quadratic Effects) (ภาพที่ 4.47), และการวิเคราะห์ Contour Plot และ Surface Plot เพื่อให้สามารถกำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดของกระบวนการสกัด



ภาพที่ 4.47 ผลการวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยต่อค่าการตอบสนองใน Optimization Study Plan 2

การวิเคราะห์ผลกระทบหลัก (Main Effects Analysis) ของ Optimization Study Plan 2

การวิเคราะห์ผลกระทบหลักในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาผลของปัจจัยเดียวที่มีต่อกระบวนการสกัดสารสำคัญ โดยไม่พิจารณาปฏิสัมพันธ์หรือผลเชิงกำลังสองของตัวแปร การประเมินผลกระทบดำเนินการโดยพิจารณาค่าผลกระทบ (Effect) และช่วงความเชื่อมั่น (Confidence Interval) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วยความเข้มข้นของ HPBCD หรือ X3, เวลาที่ใช้ในการสกัด (X5), พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (X6) และความเข้มข้นของเอทานอล (X7) ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าปัจจัย X7 และ X6 มีอิทธิพลเชิงบวกที่สำคัญต่อทุกค่าการตอบสนอง ขณะที่ปัจจัย X3 แสดงแนวโน้มเชิงลบในหลายกรณี

ในการศึกษาผลกระทบของ Compound D พบว่าความเข้มข้นของเอทานอล (X7) มีผลกระทบเชิงบวกสูงสุด โดยให้ค่า Effect เท่ากับ 10.1658 รองลงมาคือพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (X6) ที่มีค่า Effect เท่ากับ 8.18825 ขณะที่เวลาที่ใช้ในการสกัด (X5) มีผลกระทบในระดับต่ำกว่าที่ 1.93855 และความเข้มข้นของ HPBCD (X3) ส่งผลกระทบเชิงลบที่ -2.5986

สำหรับ DMPBD ปัจจัย X7 และ X6 ยังคงมีอิทธิพลเชิงบวกที่โดดเด่น โดยให้ค่า Effect เท่ากับ 63.5284 และ 51.1635 ตามลำดับ ในขณะที่เวลาที่ใช้ในการสกัด (X5) มีผลกระทบระดับปานกลางที่ 12.1099 ส่วนความเข้มข้นของ HPBCD (X3) ส่งผลกระทบเชิงลบที่ -16.2399 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า HPBCD อาจมีผลลดทอนประสิทธิภาพของสารสำคัญในกระบวนการนี้

ในกรณีของ Curcuminoid พบว่าความเข้มข้นของเอทานอล (X7) และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (X6) ยังคงเป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลสูง โดยให้ค่า Effect เท่ากับ 7.1579 และ 5.76474 ตามลำดับ ขณะที่เวลาที่ใช้ในการสกัด (X5) มีผลกระทบเชิงบวกเล็กน้อยที่ 1.36447 ส่วนความเข้มข้นของ HPBCD (X3) ส่งผลเชิงลบที่ -1.82979

ค่าการตอบสนองของ DPPH, ABTS และ FRAP แสดงแนวโน้มสอดคล้องกัน โดยปัจจัย X7 และ X6 เป็นตัวแปรที่ส่งผลกระทบเชิงบวกอย่างมีนัยสำคัญ โดยให้ค่า Effect สูงสุดในทุกการตอบสนอง ซึ่งบ่งชี้ว่าทั้งความเข้มข้นของเอทานอลและพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์เป็นปัจจัยสำคัญในการกระตุ้นประสิทธิภาพของกระบวนการสกัด ขณะที่เวลาที่ใช้ในการสกัด (X5) มีผลกระทบในระดับปานกลาง ส่วนความเข้มข้นของ HPBCD (X3) แสดงผลกระทบเชิงลบอย่างต่อเนื่องในทุกค่าการตอบสนอง

จากผลการวิเคราะห์สามารถสรุปได้ว่า ความเข้มข้นของเอทานอล (X7) และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (X6) เป็นปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลเชิงบวกต่อกระบวนการสกัด ซึ่งอาจเกิดจากความสามารถของเอทานอลในการละลายสารสำคัญ และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ที่ช่วยเพิ่มการปลดปล่อยสาร

ออกฤทธิ์จากโครงสร้างพีช ขณะที่ความเข้มข้นของ HPBCD (X3) มีแนวโน้มส่งผลกระทบต่อค่าการตอบสนองหลายค่า อาจเนื่องจากกลไกการจับกับสารเป้าหมายที่อาจลดการสกัดในบางเงื่อนไข การศึกษานี้ช่วยให้สามารถกำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดต่อไป

การวิเคราะห์ผลกระทบของการปฏิสัมพันธ์ (Interaction Effects Analysis) ใน Optimization Study Plan 2

การวิเคราะห์ผลกระทบของการปฏิสัมพันธ์ในงานวิจัยนี้มีเป้าหมายเพื่อทำความเข้าใจการทำงานร่วมกันของปัจจัยสองตัวที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดสารสำคัญ โดยพิจารณาจากค่าผลกระทบ (Effect) และช่วงความเชื่อมั่น (Confidence Interval) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วยความเข้มข้นของ HPBCD หรือ X3, เวลาที่ใช้ในการสกัด (X5), พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (X6) และความเข้มข้นของเอทานอล (X7) ผลการวิเคราะห์มีดังนี้

สำหรับ Compound D พบว่าปฏิสัมพันธ์ระหว่างพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (X6) และความเข้มข้นของเอทานอล (X7) ให้ผลกระทบเชิงบวกที่ 5.74251 แสดงให้เห็นว่าการทำงานร่วมกันของสองปัจจัยนี้ช่วยเสริมการสกัดสารสำคัญ ในขณะที่ปฏิสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ HPBCD (X3) กับเอทานอล (X7) และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (X6) ส่งผลเชิงลบที่ -3.42475 และ -2.75954 ตามลำดับ ซึ่งบ่งชี้ว่า HPBCD อาจรบกวนประสิทธิภาพของการสกัดเมื่อมีการใช้เอทานอลหรืออัลตราซาวด์ร่วมด้วย

ในกรณีของ DMPBD ปัจจัย X6X7 ยังคงมีผลกระทบเชิงบวกสูงสุดที่ 35.8954 ขณะที่ X3X7 และ X3X6 แสดงผลกระทบเชิงลบที่ -21.4011 และ -17.2408 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า HPBCD อาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการสกัดเมื่อใช้ร่วมกับตัวทำละลายและพลังงานคลื่นเสียง ส่วน X5X7 และ X5X6 มีผลกระทบเล็กน้อยที่ 4.0637 และ 0.753185 ตามลำดับ

สำหรับ Curcuminoid ผลการวิเคราะห์พบว่าปัจจัย X6X7 มีผลกระทบเชิงบวกที่ 4.0444 สะท้อนให้เห็นว่าการใช้เอทานอลร่วมกับพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์อาจช่วยเพิ่มปริมาณสารสำคัญที่สกัดได้ อย่างไรก็ตาม ปฏิสัมพันธ์ระหว่าง HPBCD และเอทานอล (X3X7) รวมถึง HPBCD และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (X3X6) แสดงผลกระทบเชิงลบที่ -2.41132 และ -1.94258 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า HPBCD อาจไม่ส่งเสริมการสกัดสารกลุ่มนี้เมื่อใช้ร่วมกับปัจจัยอื่น

ค่าการตอบสนองของ DPPH และ ABTS แสดงให้เห็นแนวโน้มคล้ายกัน โดยปัจจัย X6X7 ส่งผลกระทบเชิงบวกสูงสุดที่ 117.103 และ 128.677 ตามลำดับ ส่วน X3X7 และ X3X6 แสดงผลกระทบเชิงลบในระดับสูง ซึ่งอาจเกิดจากการที่ HPBCD มีบทบาทจำกัดในการเพิ่มความสามารถใน

การสกัดสารต้านอนุมูลอิสระภายใต้เงื่อนไขที่ใช้ร่วมกับเอทานอลและพลังงานคลื่นเสียง ส่วนปัจจัย X5X7 และ X5X6 มีผลกระทบเล็กน้อยในทุกกรณี

สำหรับ FRAP ปัจจัย X6X7 มีผลกระทบเชิงบวกสูงสุดที่ 198.382 แสดงให้เห็นว่าการใช้พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ร่วมกับเอทานอลช่วยเสริมประสิทธิภาพของการสกัดสารต้านอนุมูลอิสระอย่างมีนัยสำคัญ ขณะที่ปัจจัย X3X7 และ X3X6 แสดงผลกระทบเชิงลบที่ -118.26 และ -95.2622 ตามลำดับ บ่งชี้ว่า HPBCD อาจมีผลลดทอนประสิทธิภาพของการสกัดภายใต้เงื่อนไขดังกล่าว

ผลการวิเคราะห์ชี้ให้เห็นว่าปฏิสัมพันธ์ระหว่าง X6X7 เป็นปัจจัยสำคัญที่มีแนวโน้มส่งเสริมประสิทธิภาพการสกัดในทุกค่าการตอบสนอง ขณะที่ X3X7 และ X3X6 มักส่งผลกระทบเชิงลบ ซึ่งอาจเกิดจากกลไกที่ HPBCD เข้าจับสารสำคัญและลดความสามารถในการละลายของสารเป้าหมายในสารละลาย การศึกษานี้ให้ข้อมูลสำคัญในการกำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการสกัด โดยแนะนำให้ควบคุมปริมาณ HPBCD เมื่อใช้ร่วมกับเอทานอลและพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์เพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบเชิงลบ และเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดให้สูงขึ้น

การวิเคราะห์ผลกระทบเชิงกำลังสอง (Quadratic Effects Analysis) ใน Optimization Study Plan 2

การศึกษานี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยเชิงกำลังสองที่ส่งผลต่อกระบวนการสกัดสารสำคัญ โดยพิจารณาถึงแนวโน้มของผลลัพธ์ที่อาจไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งมีความสำคัญต่อการกำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสม ผลการวิเคราะห์ชี้ให้เห็นว่าการเพิ่มค่าปัจจัยเกินขอบเขตที่เหมาะสมอาจส่งผลเชิงลบต่อค่าการตอบสนองของระบบ

ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วยความเข้มข้นของ HPBCD หรือ X3, เวลาที่ใช้ในการสกัด หรือ X5, พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ หรือ X6 และความเข้มข้นของเอทานอล หรือ X7 ผลการวิเคราะห์พบว่าปัจจัยเชิงกำลังสอง X5X5, X6X6, X3X3 และ X7X7 มีแนวโน้มส่งผลกระทบเชิงลบต่อทุกค่าการตอบสนอง ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าการเพิ่มระดับของตัวแปรเหล่านี้เกินขีดจำกัดอาจลดประสิทธิภาพของกระบวนการสกัด

สำหรับ Compound D พบว่าปัจจัย X5X5, X6X6, X3X3 และ X7X7 มีค่าผลกระทบเชิงลบ โดยเฉพาะ X5X5 ซึ่งมีค่าผลกระทบที่ -10.0063 และ X6X6 ที่ -8.73253 ซึ่งบ่งชี้ว่าการใช้เวลาสกัดหรือพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ที่มากเกินไปอาจทำให้สารสำคัญเสื่อมสภาพหรือเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้าง

ในกรณีของ DMPBD ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าปัจจัย X5X5 มีผลกระทบเชิงลบสูงสุดที่ -50.4344 รองลงมาคือ X6X6 และ X3X3 ซึ่งมีผลกระทบที่ -42.2551 และ -40.6107 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มระดับพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์และระยะเวลาการสกัดที่มากเกินไปอาจทำให้

ประสิทธิภาพของกระบวนการลดลง เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของสารสำคัญ เช่น การเกิดออกซิเดชันหรือการเสื่อมสภาพของสารออกฤทธิ์

สำหรับ Curcuminoid พบว่าผลกระทบเชิงกำลังสองของ X5X5 และ X6X6 มีแนวโน้มลดทอนค่าการตอบสนอง โดยค่าผลกระทบอยู่ที่ -5.72027 และ -4.79938 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการใช้เวลาสกัดที่มากเกินไปอาจทำให้เกิดการสลายตัวของสารสำคัญ หรือพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ที่มากเกินไปอาจรบกวนสมดุลของระบบสกัด

ค่าการตอบสนองของ DPPH และ ABTS มีแนวโน้มคล้ายกัน โดยค่าผลกระทบของ X5X5 และ X6X6 มีค่าเชิงลบสูงสุดสำหรับ DPPH และ ABTS ตามลำดับ ซึ่งสะท้อนถึงข้อจำกัดของการใช้เวลาสกัดและพลังงานสูงเกินไป ส่วน X3X3 และ X7X7 ก็แสดงค่าผลกระทบเชิงลบที่สอดคล้องกัน ซึ่งอาจเกิดจากการที่ความเข้มข้นของ HPBCD และเอทานอลสูงเกินไปไม่ได้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัด แต่กลับทำให้สมดุลของสารละลายเปลี่ยนแปลง ส่งผลให้เกิดการตกตะกอนหรือการเปลี่ยนแปลงทางเคมีก่อนที่สารสำคัญจะถูกนำออกมาได้อย่างมีประสิทธิภาพ

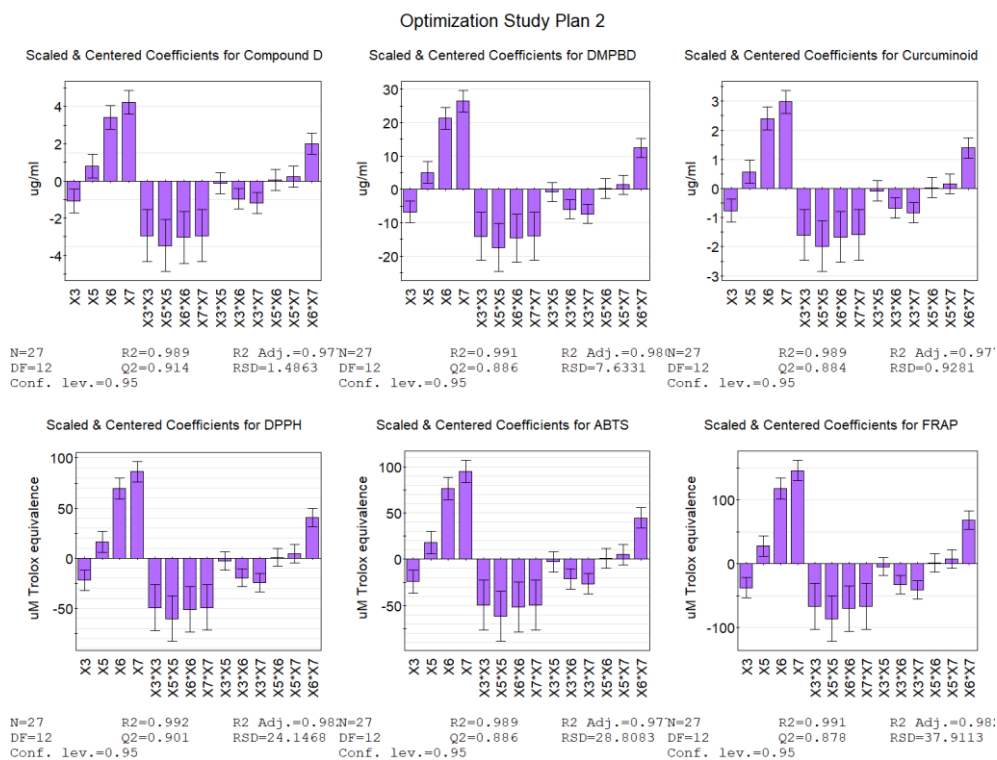
สำหรับ FRAP พบว่าผลกระทบของ X5X5 สูงสุดอยู่ที่ -247.624 ตามมาด้วย X6X6, X3X3 และ X7X7 ซึ่งส่งผลลบในลักษณะเดียวกัน การใช้ค่าปัจจัยที่มากเกินไปอาจเร่งให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารต้านอนุมูลอิสระ ซึ่งทำให้ค่าการตอบสนองลดลง

จากผลการวิเคราะห์สามารถสรุปได้ว่าปัจจัยเชิงกำลังสองของตัวแปรทั้งหมดส่งผลเชิงลบต่อค่าการตอบสนอง การเพิ่มระดับของปัจจัยเหล่านี้เกินค่าที่เหมาะสมอาจทำให้ประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดลดลง ดังนั้นการเลือกค่าปัจจัยให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งสำคัญเพื่อให้เกิดสมดุลที่ดีของกระบวนการ การใช้พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ควรอยู่ในระดับที่เพียงพอต่อการช่วยเพิ่มการสกัดโดยไม่ก่อให้เกิดการเสื่อมสภาพของสารสำคัญ เวลาการสกัดควรได้รับการควบคุมให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมเพื่อลดการสูญเสียของสารเป้าหมาย และความเข้มข้นของ HPBCD และเอทานอลควรอยู่ในระดับที่ไม่ก่อให้เกิดภาวะอิ่มตัวหรือรบกวนสมดุลของระบบสกัด การปรับแต่งค่าปัจจัยเหล่านี้ให้เหมาะสมจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดและลดผลกระทบเชิงลบที่อาจเกิดขึ้น

4.3.2.3 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Model Building) ใน Optimization Study Plan 2

ในการศึกษาการปรับสภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการสกัดสารสำคัญจากเหง้าโพลใน Optimization Study Plan 2 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นกระบวนการสำคัญที่ช่วยให้สามารถเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ใช้ควบคุมกระบวนการสกัดและค่าการตอบสนองได้อย่างเป็นระบบ

ผลการวิเคราะห์จาก Scaled & Centered Coefficients (ภาพที่ 4.48) แสดงให้เห็นว่า ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าการตอบสนองมากที่สุด ได้แก่ X3 (ความเข้มข้นของไซโคลเด็กซ์ทรีน), X5 (เวลาสกัด), X6 (พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์) และ X7 (ความเข้มข้นของเอทานอล) ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการควบคุมทั้งปริมาณสารสำคัญที่สกัดได้และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดจากเหง้าไพล



ภาพที่ 4.48 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของปัจจัยที่มีผลต่อค่าการตอบสนองใน Optimization Study Plan 2

● การสร้างแบบจำลองสำหรับ Compound D ของ Optimization Study Plan 2

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในงานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ใช้ในกระบวนการสกัดสารสำคัญกับค่าการตอบสนองของ Compound D โดยใช้แบบจำลองการถดถอยพหุคูณ (Multiple Regression Analysis) แบบพหุนามกำลังสอง ซึ่งช่วยให้สามารถทำนายค่าการตอบสนองและกำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสมของตัวแปรได้อย่างแม่นยำ นอกจากนี้ แบบจำลองนี้ยังช่วยให้สามารถวิเคราะห์ผลกระทบของตัวแปรหลักและปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ ได้อย่างเป็นระบบ เพื่อให้เกิดการปรับปรุงกระบวนการสกัดที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

สมการแบบจำลองที่ได้สามารถแสดงในรูปแบบต่อไปนี้

$$Y_1 = 276.9 - 1.08108X_3 + 0.806487X_5 + 3.40652X_6 + 4.22923X_7 - 2.93424X_3^2 - 3.46371X_5^2 - 3.0228X_6^2 - 2.93094X_7^2 - 0.124838X_3X_5 - 0.955224X_3X_6 - 1.18549X_3X_7 + 0.0422123X_5X_6 + 0.225474X_5X_7 + 1.98779X_6X_7$$

จากผลการวิเคราะห์ พบว่าปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อค่าการตอบสนองของ Compound D อย่างมีนัยสำคัญ ได้แก่ ความเข้มข้นของเอทานอล (X7) และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (X6) โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ 4.22923 และ 3.40652 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มค่าของตัวแปรเหล่านี้ช่วยเพิ่มค่าการตอบสนองของ Compound D ได้อย่างมีนัยสำคัญ ขณะที่ความเข้มข้นของ HPBCD (X3) มีค่าสัมประสิทธิ์เชิงลบที่ -1.08108 แสดงให้เห็นว่าอาจมีผลลดทอนประสิทธิภาพของกระบวนการเมื่อใช้ในระดับสูง ส่วนเวลาที่ใช้ในการสกัด (X5) มีค่าสัมประสิทธิ์ 0.806487 ซึ่งเป็นผลกระทบเชิงบวก แต่มีค่าน้อยกว่าปัจจัยอื่น ๆ

ผลกระทบเชิงกำลังสองของตัวแปรทุกตัวแสดงแนวโน้มเชิงลบ โดยเฉพาะ X_5^2 และ X_3^2 ที่มีค่าสัมประสิทธิ์ -3.46371 และ -2.93424 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มเวลาสกัดและความเข้มข้นของ HPBCD เกินระดับที่เหมาะสมอาจลดประสิทธิภาพของกระบวนการสกัด ผลกระทบของ X_6^2 และ X_7^2 ที่มีค่าสัมประสิทธิ์ -3.0228 และ -2.93094 แสดงให้เห็นว่าการใช้พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์และความเข้มข้นของเอทานอลในระดับที่สูงเกินไปอาจส่งผลเสียต่อการสกัด แสดงถึงความจำเป็นในการควบคุมค่าของตัวแปรให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม

การศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรแสดงให้เห็นว่า พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (X6) และความเข้มข้นของเอทานอล (X7) มีผลกระทบเชิงบวกอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ 1.98779 ซึ่งแสดงว่าการใช้ X6 และ X7 ร่วมกันในระดับที่เหมาะสมสามารถเพิ่มค่าการตอบสนองของ Compound D ได้ดี ในขณะที่ปฏิสัมพันธ์ระหว่าง HPBCD (X3) กับพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (X6) และ HPBCD กับเอทานอล (X7) มีค่าสัมประสิทธิ์เชิงลบที่ -0.955224 และ -1.18549 ตามลำดับ แสดงว่าความเข้มข้นของ HPBCD อาจรบกวนการทำงานของตัวแปรเหล่านี้และลดประสิทธิภาพของกระบวนการ

ผลการวิเคราะห์นี้ชี้ให้เห็นว่าความเข้มข้นของเอทานอลและพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์เป็นปัจจัยที่ส่งผลดีต่อการสกัด Compound D ในขณะที่ความเข้มข้นของ HPBCD และเวลาสกัดต้องได้รับการควบคุมอย่างเหมาะสมเพื่อลดผลกระทบเชิงลบ นอกจากนี้ การกำหนดค่าตัวแปรให้อยู่ในช่วงที่สมดุลจะช่วยให้เกิดการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการโดยลดการใช้พลังงานและตัวทำละลายที่เกินความจำเป็น การใช้แบบจำลองนี้สามารถช่วยกำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสมและสามารถ

นำไปใช้ทำนายผลลัพธ์ของการสกัดในสถานการณ์อื่น ๆ ได้โดยไม่ต้องดำเนินการทดลองเพิ่มเติม ลดระยะเวลาและต้นทุนในการพัฒนาเทคนิคการสกัดที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

● การสร้างแบบจำลองสำหรับ DMPBD ของ Optimization Study Plan 2

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับ DMPBD มีจุดมุ่งหมายเพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยสำคัญในกระบวนการสกัดกับค่าการตอบสนองที่ได้ โดยใช้การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณแบบพหุนามกำลังสอง ซึ่งช่วยให้สามารถทำนายผลลัพธ์และกำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสมของตัวแปรได้อย่างแม่นยำ แบบจำลองนี้พัฒนาขึ้นจากข้อมูลการทดลองใน Optimization Study Plan 2 ซึ่งใช้ตัวแปรอิสระ เพื่อศึกษาผลกระทบของตัวแปรเหล่านี้ต่อประสิทธิภาพของกระบวนการสกัด

สมการแบบจำลองที่ได้สามารถแสดงในรูปแบบต่อไปนี้

$$Y2 = 593.75 - 6.75622X3 + 5.03803X5 + 21.2853X6 + 26.4294X7 - 14.0575X3^2 - 17.458X5^2 - 14.6268X6^2 - 14.0205X7^2 - 0.777068X3X5 - 5.96798X3X6 - 7.40809X3X7 + 0.260718X5X6 + 1.40667X5X7 + 12.4253X6X7$$

จากผลการวิเคราะห์ พบว่าค่าการตอบสนองของ DMPBD ได้รับอิทธิพลจากตัวแปรหลักได้แก่ พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (X6) และความเข้มข้นของเอทานอล (X7) ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์ 21.2853 และ 26.4294 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มค่าของตัวแปรทั้งสองนี้ช่วยเพิ่มค่าการตอบสนองของ DMPBD อย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ความเข้มข้นของ HPBCD (X3) มีค่าสัมประสิทธิ์เชิงลบที่ -6.75622 ซึ่งบ่งชี้ว่าการเพิ่ม HPBCD อาจลดประสิทธิภาพของกระบวนการสกัด DMPBD ส่วนเวลาที่ใช้ในการสกัด (X5) มีค่าสัมประสิทธิ์ 5.03803 ซึ่งเป็นผลกระทบเชิงบวก แต่มีค่าน้อยกว่าตัวแปรอื่น ๆ

ผลกระทบเชิงกำลังสองของตัวแปรทุกตัวมีแนวโน้มเชิงลบ โดยเฉพาะ $X5^2$ และ $X3^2$ ที่มีค่าสัมประสิทธิ์ -17.458 และ -14.0575 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มเวลาสกัดและความเข้มข้นของ HPBCD เกินระดับที่เหมาะสมอาจลดประสิทธิภาพของกระบวนการสกัด เช่นเดียวกับ $X6^2$ และ $X7^2$ ที่มีค่าผลกระทบ -14.6268 และ -14.0205 ซึ่งสะท้อนว่าการใช้พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์และความเข้มข้นของเอทานอลในระดับสูงเกินไปอาจส่งผลเชิงลบต่อกระบวนการ

การศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรพบว่าการใช้พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (X6) และความเข้มข้นของเอทานอล (X7) ร่วมกันมีผลกระทบเชิงบวกที่มีนัยสำคัญ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ 12.4253 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้ X6 และ X7 ในระดับที่เหมาะสมสามารถเพิ่มค่าการตอบสนองของ DMPBD

ได้ดี อย่างไรก็ตาม ปฏิสัมพันธ์ระหว่าง HPBCD (X3) กับพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (X6) และ HPBCD กับเอทานอล (X7) มีค่าสัมประสิทธิ์เชิงลบที่ -5.96798 และ -7.40809 ตามลำดับ ซึ่งบ่งชี้ว่า HPBCD อาจรบกวนการทำงานของตัวแปรเหล่านี้และลดประสิทธิภาพของกระบวนการ

จากผลการวิเคราะห์นี้สามารถสรุปได้ว่า การใช้ความเข้มข้นของเอทานอลและพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ที่เหมาะสมเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัด DMPBD ในขณะที่ความเข้มข้นของ HPBCD และเวลาสกัดควรอยู่ในช่วงที่เหมาะสมเพื่อลดผลกระทบเชิงลบ นอกจากนี้ การควบคุมค่าตัวแปรให้อยู่ในช่วงที่สมดุลจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการ ลดการใช้พลังงานและตัวทำละลายเกินความจำเป็น การใช้แบบจำลองนี้สามารถช่วยกำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสมและสามารถนำไปใช้ทำนายผลลัพธ์ของการสกัดในสถานการณ์อื่น ๆ ได้โดยไม่ต้องดำเนินการทดลองเพิ่มเติม ลดระยะเวลาและต้นทุนในการพัฒนาเทคนิคการสกัดที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

● การสร้างแบบจำลองสำหรับ Curcuminoid ของ Optimization Study Plan 2

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับ Curcuminoid มีจุดมุ่งหมายเพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการสกัด โดยใช้การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณแบบพหุนามกำลังสอง ซึ่งช่วยให้สามารถพัฒนาแบบจำลองเพื่อทำนายค่าการตอบสนองและกำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสมของตัวแปรที่เกี่ยวข้อง

สมการแบบจำลองที่ได้สามารถแสดงในรูปแบบต่อไปนี้

$$Y_3 = 35.0909 - 0.761239X_3 + 0.567653X_5 + 2.39828X_6 + 2.97787X_7 - 1.59724X_3^2 - 1.98009X_5^2 - 1.66132X_6^2 - 1.59312X_7^2 - 0.0875638X_3X_5 - 0.672432X_3X_6 - 0.834689X_3X_7 + 0.0293853X_5X_6 + 0.1585X_5X_7 + 1.39998X_6X_7$$

จากผลการวิเคราะห์ พบว่าตัวแปรหลักที่มีอิทธิพลต่อค่าการตอบสนองของ Curcuminoid อย่างมีนัยสำคัญ ได้แก่ พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (X6) และความเข้มข้นของเอทานอล (X7) ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์ 2.39828 และ 2.97787 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มค่าของตัวแปรเหล่านี้สามารถช่วยเพิ่มค่าการตอบสนองของ Curcuminoid ได้อย่างมีนัยสำคัญ ขณะที่ความเข้มข้นของ HPBCD (X3) มีค่าสัมประสิทธิ์เชิงลบที่ -0.761239 ซึ่งบ่งชี้ว่าการใช้ HPBCD ในระดับที่สูงอาจลด

ประสิทธิภาพของกระบวนการสกัด ส่วนเวลาที่ใช้ในการสกัด (X5) มีค่าสัมประสิทธิ์ 0.567653 ซึ่งเป็นผลกระทบเชิงบวกแต่มีน้อยกว่าตัวแปรอื่น ๆ

ผลกระทบเชิงกำลังสองของตัวแปรทุกตัวมีแนวโน้มเชิงลบ โดยเฉพาะ $X5^2$ และ $X3^2$ ที่มีค่าสัมประสิทธิ์ -1.98009 และ -1.59724 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มเวลาสกัดและความเข้มข้นของ HPBCD เกินระดับที่เหมาะสมอาจลดประสิทธิภาพของกระบวนการสกัด เช่นเดียวกับ $X6^2$ และ $X7^2$ ที่มีค่าผลกระทบ -1.66132 และ -1.59312 ซึ่งสะท้อนว่า การใช้พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์และความเข้มข้นของเอทานอลในระดับสูงเกินไปอาจส่งผลเชิงลบต่อกระบวนการ

การศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรพบว่าการใช้พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (X6) และความเข้มข้นของเอทานอล (X7) ร่วมกันมีผลกระทบเชิงบวกที่มีนัยสำคัญ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ 1.39998 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้ X6 และ X7 ในระดับที่เหมาะสมสามารถเพิ่มค่าการตอบสนองของ Curcuminoid ได้ดี อย่างไรก็ตาม ปฏิสัมพันธ์ระหว่าง HPBCD (X3) กับพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (X6) และ HPBCD กับเอทานอล (X7) มีค่าสัมประสิทธิ์เชิงลบที่ -0.672432 และ -0.834689 ตามลำดับ ซึ่งบ่งชี้ว่า HPBCD อาจรบกวนการทำงานของตัวแปรเหล่านี้และลดประสิทธิภาพของกระบวนการ

จากผลการวิเคราะห์นี้สามารถสรุปได้ว่า การใช้ความเข้มข้นของเอทานอลและพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ที่เหมาะสมเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัด Curcuminoid ในขณะที่ความเข้มข้นของ HPBCD และเวลาสกัดควรอยู่ในช่วงที่เหมาะสมเพื่อลดผลกระทบเชิงลบ นอกจากนี้ การควบคุมค่าตัวแปรให้อยู่ในช่วงที่สมดุลจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการ ลดการใช้พลังงานและตัวทำละลายเกินความจำเป็น การใช้แบบจำลองนี้สามารถช่วยกำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสมและสามารถนำไปใช้ทำนายผลลัพธ์ของการสกัดในสถานการณ์อื่น ๆ ได้โดยไม่ต้องดำเนินการทดลองเพิ่มเติม ลดระยะเวลาและต้นทุนในการพัฒนาเทคนิคการสกัดที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

● การสร้างแบบจำลองสำหรับค่าการตอบสนอง DPPH ของ Optimization Study Plan 2

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับ DPPH มีจุดมุ่งหมายเพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการสกัด โดยใช้การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณแบบพหุนามกำลังสอง ซึ่งช่วยให้สามารถพัฒนาแบบจำลองเพื่อทำนายค่าการตอบสนองและกำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสมของตัวแปรที่เกี่ยวข้อง

สมการแบบจำลองที่ได้สามารถแสดงในรูปแบบต่อไปนี้

$$Y_4 = 579.057 - 22.0422X_3 + 16.4383X_5 + 69.4464X_6 + 86.227X_7 - 49.2391X_3^2 - 60.261X_5^2 - 51.0837X_6^2 - 49.1312X_7^2 - 2.53764X_3X_5 - 19.4719X_3X_6 - 24.1694X_3X_7 + 0.85303X_5X_6 + 4.59118X_5X_7 + 40.5357X_6X_7$$

จากผลการวิเคราะห์ พบว่าตัวแปรหลักที่มีอิทธิพลต่อค่าการตอบสนองของ DPPH อย่างมีนัยสำคัญ ได้แก่ พลังงานคลื่นอัลตราชาวด์ (X6) และความเข้มข้นของเอทานอล (X7) ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์ 69.4464 และ 86.227 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มค่าของตัวแปรเหล่านี้ช่วยเพิ่มค่าการตอบสนองของ DPPH อย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ความเข้มข้นของ HPBCD (X3) มีค่าสัมประสิทธิ์เชิงลบที่ -22.0422 บ่งชี้ว่าการเพิ่ม HPBCD อาจลดประสิทธิภาพของกระบวนการสกัด DPPH ส่วนเวลาที่ใช้ในการสกัด (X5) มีค่าสัมประสิทธิ์ 16.4383 ซึ่งเป็นผลกระทบเชิงบวก แต่มีค่าน้อยกว่าตัวแปรอื่น ๆ

ผลกระทบเชิงกำลังสองของตัวแปรทุกตัวมีแนวโน้มเชิงลบ โดยเฉพาะ X_5^2 และ X_3^2 ที่มีค่าสัมประสิทธิ์ -60.261 และ -49.2391 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มเวลาสกัดและความเข้มข้นของ HPBCD เกินระดับที่เหมาะสมอาจลดประสิทธิภาพของกระบวนการสกัด เช่นเดียวกับ X_6^2 และ X_7^2 ที่มีค่าผลกระทบ -51.0837 และ -49.1312 ซึ่งสะท้อนว่าการใช้พลังงานคลื่นอัลตราชาวด์และความเข้มข้นของเอทานอลในระดับสูงเกินไปอาจส่งผลเชิงลบต่อกระบวนการ

การศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรพบว่าการใช้พลังงานคลื่นอัลตราชาวด์ (X6) และความเข้มข้นของเอทานอล (X7) ร่วมกันมีผลกระทบเชิงบวกที่มีนัยสำคัญ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ 40.5357 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้ X6 และ X7 ในระดับที่เหมาะสมสามารถเพิ่มค่าการตอบสนองของ DPPH ได้ดี อย่างไรก็ตาม ปฏิสัมพันธ์ระหว่าง HPBCD (X3) กับพลังงานคลื่นอัลตราชาวด์ (X6) และ HPBCD กับเอทานอล (X7) มีค่าสัมประสิทธิ์เชิงลบที่ -19.4719 และ -24.1694 ตามลำดับ ซึ่งบ่งชี้ว่า HPBCD อาจรบกวนการทำงานของตัวแปรเหล่านี้และลดประสิทธิภาพของกระบวนการ

จากผลการวิเคราะห์นี้สามารถสรุปได้ว่า การใช้ความเข้มข้นของเอทานอลและพลังงานคลื่นอัลตราชาวด์ที่เหมาะสมเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัด DPPH ในขณะที่ความเข้มข้นของ HPBCD และเวลาสกัดควรอยู่ในช่วงที่เหมาะสมเพื่อลดผลกระทบเชิงลบ นอกจากนี้ การควบคุมค่าตัวแปรให้อยู่ในช่วงที่สมดุลจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการ ลดการใช้พลังงานและตัวทำละลายเกินความจำเป็น การใช้แบบจำลองนี้สามารถช่วยกำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสมและสามารถนำไปใช้ทำนายผลลัพธ์ของการสกัดในสถานการณ์อื่น ๆ ได้โดยไม่ต้องดำเนินการทดลองเพิ่มเติม ลดระยะเวลาและต้นทุนในการพัฒนาเทคนิคการสกัดที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

● การสร้างแบบจำลองสำหรับค่าการตอบสนอง ABTS ของ Optimization Study Plan 2

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับ ABTS มีจุดมุ่งหมายเพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการสกัด โดยใช้การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณแบบพหุนามกำลังสอง ซึ่งช่วยให้สามารถพัฒนาแบบจำลองเพื่อทำนายค่าการตอบสนองและกำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสมของตัวแปรที่เกี่ยวข้อง

สมการแบบจำลองที่ได้สามารถแสดงในรูปแบบต่อไปนี้

$$Y5 = 713.376 - 24.2192X3 + 18.0595X5 + 76.3012X6 + 94.7421X7 - 49.4145X3^2 - 61.6253X5^2 - 51.4586X6^2 - 49.278X7^2 - 2.78487X3X5 - 21.3932X3X6 - 26.5559X3X7 + 0.933899X5X6 + 5.04197X5X7 + 44.5421X6X7$$

จากผลการวิเคราะห์ พบว่าตัวแปรหลักที่มีอิทธิพลต่อค่าการตอบสนองของ ABTS อย่างมีนัยสำคัญ ได้แก่ พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ ($X6$) และความเข้มข้นของเอทานอล ($X7$) ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์ 76.3012 และ 94.7421 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มค่าของตัวแปรเหล่านี้ช่วยเพิ่มค่าการตอบสนองของ ABTS อย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ความเข้มข้นของ HPBCD ($X3$) มีค่าสัมประสิทธิ์เชิงลบที่ -24.2192 บ่งชี้ว่าการเพิ่ม HPBCD อาจลดประสิทธิภาพของกระบวนการสกัด ABTS ส่วนเวลาที่ใช้ในการสกัด ($X5$) มีค่าสัมประสิทธิ์ 18.0595 ซึ่งเป็นผลกระทบเชิงบวก แต่มีค่าน้อยกว่าตัวแปรอื่น ๆ

ผลกระทบเชิงกำลังสองของตัวแปรทุกตัวมีแนวโน้มเชิงลบ โดยเฉพาะ $X5^2$ และ $X3^2$ ที่มีค่าสัมประสิทธิ์ -61.6253 และ -49.4145 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มเวลาสกัดและความเข้มข้นของ HPBCD เกินระดับที่เหมาะสมอาจลดประสิทธิภาพของกระบวนการสกัด เช่นเดียวกับ $X6^2$ และ $X7^2$ ที่มีค่าผลกระทบ -51.4586 และ -49.278 ซึ่งสะท้อนว่าการใช้พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์และความเข้มข้นของเอทานอลในระดับสูงเกินไปอาจส่งผลเชิงลบต่อกระบวนการ

การศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรพบว่าการใช้พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ ($X6$) และความเข้มข้นของเอทานอล ($X7$) ร่วมกันมีผลกระทบเชิงบวกที่มีนัยสำคัญ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ 44.5421 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้ $X6$ และ $X7$ ในระดับที่เหมาะสมสามารถเพิ่มค่าการตอบสนองของ ABTS ได้ดี อย่างไรก็ตาม ปฏิสัมพันธ์ระหว่าง HPBCD ($X3$) กับพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ ($X6$) และ HPBCD กับเอทานอล ($X7$) มีค่าสัมประสิทธิ์เชิงลบที่ -21.3932 และ -26.5559 ตามลำดับ ซึ่งบ่งชี้ว่า HPBCD อาจรบกวนการทำงานของตัวแปรเหล่านี้และลดประสิทธิภาพของกระบวนการ

จากผลการวิเคราะห์นี้สามารถสรุปได้ว่า การใช้ความเข้มข้นของเอทานอลและพลังงาน คลื่นอัลตราซาวด์ที่เหมาะสมเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัด ABTS ในขณะที่ความเข้มข้นของ HPBCD และเวลาสกัดควรอยู่ในช่วงที่เหมาะสมเพื่อลดผลกระทบเชิงลบ นอกจากนี้ การควบคุมค่าตัวแปรให้อยู่ในช่วงที่สมมูลจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการ ลดการใช้พลังงานและตัวทำละลายเกินความจำเป็น การใช้แบบจำลองนี้สามารถช่วยกำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสมและสามารถนำไปใช้ทำนายผลลัพธ์ของการสกัดในสถานการณ์อื่น ๆ ได้โดยไม่ต้องดำเนินการทดลองเพิ่มเติม ลดระยะเวลาและต้นทุนในการพัฒนาเทคนิคการสกัดที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

● การสร้างแบบจำลองสำหรับค่าการตอบสนอง FRAP ของ Optimization Study Plan 2

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับ FRAP มีจุดมุ่งหมายเพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการสกัด โดยใช้การวิเคราะห์การถดถอย พหุคูณแบบพหุนามกำลังสอง ซึ่งช่วยให้สามารถพัฒนาแบบจำลองเพื่อทำนายค่าการตอบสนองและกำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสมของตัวแปรที่เกี่ยวข้อง

สมการแบบจำลองที่ได้สามารถแสดงในรูปแบบต่อไปนี้

$$Y = 791.79 - 37.3356X_3 + 27.8353X_5 + 117.615X_6 + 146.049X_7 - 66.6895X_3^2 - 85.7162X_5^2 - 69.8754X_6^2 - 66.4426X_7^2 - 4.28619X_3X_5 - 32.9754X_3X_6 - 40.9363X_3X_7 + 1.43283X_5X_6 + 7.76714X_5X_7 + 68.6707X_6X_7$$

จากผลการวิเคราะห์ พบว่าตัวแปรหลักที่มีอิทธิพลต่อค่าการตอบสนองของ FRAP อย่างมีนัยสำคัญ ได้แก่ พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (X_6) และความเข้มข้นของเอทานอล (X_7) ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์ 117.615 และ 146.049 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มค่าของตัวแปรเหล่านี้ช่วยเพิ่มค่าการตอบสนองของ FRAP อย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ความเข้มข้นของ HPBCD (X_3) มีค่าสัมประสิทธิ์เชิงลบที่ -37.3356 บ่งชี้ว่าการเพิ่ม HPBCD อาจลดประสิทธิภาพของกระบวนการสกัด FRAP ส่วนเวลาที่ใช้ในการสกัด (X_5) มีค่าสัมประสิทธิ์ 27.8353 ซึ่งเป็นผลกระทบเชิงบวก แต่มีค่าน้อยกว่าตัวแปรอื่น ๆ

ผลกระทบเชิงกำลังสองของตัวแปรทุกตัวมีแนวโน้มเชิงลบ โดยเฉพาะ X_5^2 และ X_3^2 ที่มีค่าสัมประสิทธิ์ -85.7162 และ -66.6895 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มเวลาสกัดและความเข้มข้นของ HPBCD เกินระดับที่เหมาะสมอาจลดประสิทธิภาพของกระบวนการสกัด เช่นเดียวกับ X_6^2 และ

$X7^2$ ที่มีค่าผลกระทบ -69.8754 และ -66.4426 ซึ่งสะท้อนว่าการใช้พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์และความเข้มข้นของเอทานอลในระดับสูงเกินไปอาจส่งผลเชิงลบต่อกระบวนการ

การศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรพบว่าการใช้พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ ($X6$) และความเข้มข้นของเอทานอล ($X7$) ร่วมกันมีผลกระทบเชิงบวกที่มีนัยสำคัญ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ 68.6707 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้ $X6$ และ $X7$ ในระดับที่เหมาะสมสามารถเพิ่มค่าการตอบสนองของ FRAP ได้ดี อย่างไรก็ตาม ปฏิสัมพันธ์ระหว่าง HPBCD ($X3$) กับพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ ($X6$) และ HPBCD กับเอทานอล ($X7$) มีค่าสัมประสิทธิ์เชิงลบที่ -32.9754 และ -40.9363 ตามลำดับ ซึ่งบ่งชี้ว่า HPBCD อาจรบกวนการทำงานของตัวแปรเหล่านี้และลดประสิทธิภาพของกระบวนการ

จากผลการวิเคราะห์นี้สามารถสรุปได้ว่า การใช้ความเข้มข้นของเอทานอลและพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ที่เหมาะสมเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัด FRAP ในขณะที่ความเข้มข้นของ HPBCD และเวลาสกัดควรอยู่ในช่วงที่เหมาะสมเพื่อลดผลกระทบเชิงลบ นอกจากนี้ การควบคุมค่าตัวแปรให้อยู่ในช่วงที่สมดุลจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการ ลดการใช้พลังงานและตัวทำละลายเกินความจำเป็น การใช้แบบจำลองนี้สามารถช่วยกำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสมและสามารถนำไปใช้ทำนายผลลัพธ์ของการสกัดในสถานการณ์อื่น ๆ ได้โดยไม่ต้องดำเนินการทดลองเพิ่มเติม ลดระยะเวลาและต้นทุนในการพัฒนาเทคนิคการสกัดที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

4.3.2.4 การวิเคราะห์ Contour Plot และ Surface Plot ในการศึกษา Optimization Study Plan 2

การใช้ Contour Plot และ Surface Plot ในการศึกษา Optimization Study Plan 2 ช่วยให้เข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยอิสระ (Independent Variables) และค่าการตอบสนอง (Response Variables) ได้อย่างเป็นระบบ การวิเคราะห์แผนภูมิเหล่านี้เป็นเครื่องมือสำคัญในการกำหนดช่วงค่าของตัวแปรที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกระบวนการสกัดสารออกฤทธิ์จากเหง้าไพล Contour Plot เป็นกราฟแสดงเส้นระดับ (Contour Lines) ที่เชื่อมโยงค่าการตอบสนองที่เท่ากันในสองมิติ ทำให้สามารถสังเกตแนวโน้มและอิทธิพลของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าการตอบสนองได้อย่างชัดเจน ในขณะที่ Surface Plot เป็นกราฟสามมิติที่ช่วยให้เห็นภาพรวมของการเปลี่ยนแปลงค่าการตอบสนองตามตัวแปรที่ศึกษา ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างมากในการวิเคราะห์แนวโน้มเชิงลึก

ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทริน (Conc. HPBCD) และเวลาสกัด (Time) ต่อค่าการตอบสนองใน Optimization Study Plan 2

Contour Plot และ Surface Plot เป็นเครื่องมือสำคัญในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยอิสระและค่าการตอบสนองในการศึกษา Optimization Study Plan 2 ซึ่งช่วยให้สามารถระบุช่วงค่าของตัวแปรที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกระบวนการสกัดสารออกฤทธิ์จากเหง้าไพล Contour Plot แสดงผลในรูปแบบของเส้นระดับที่เชื่อมโยงค่าการตอบสนองที่เท่ากันในสองมิติ ทำให้สามารถสังเกตแนวโน้มและอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ได้อย่างชัดเจน ขณะที่ Surface Plot เป็นกราฟสามมิติที่ช่วยให้เข้าใจการเปลี่ยนแปลงของค่าการตอบสนองเมื่อค่าของตัวแปรเปลี่ยนไป

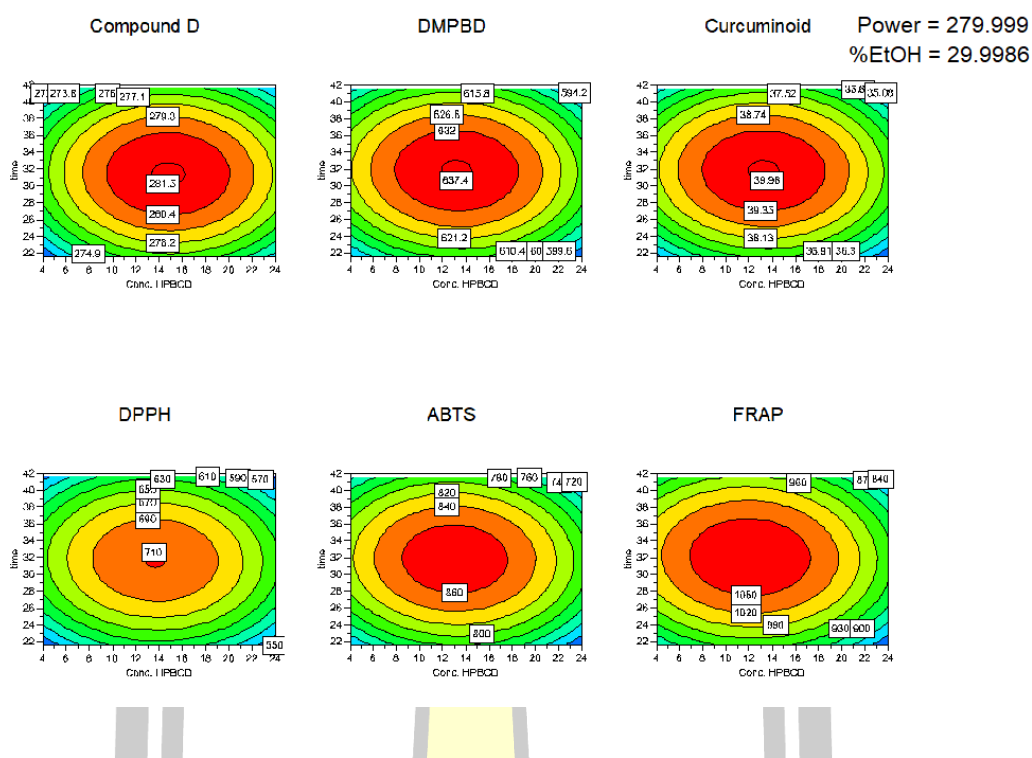
จากการศึกษา Optimization Study Plan 2 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทริน (Conc. HPBCD) และเวลาสกัด (Time) ต่อค่าการตอบสนองไม่ได้เป็นเชิงเส้น โดยตรง Contour Plot (ภาพที่ 4.49A) แสดงให้เห็นว่าโซนสีแดง ซึ่งเป็นบริเวณที่ให้ค่าการตอบสนองสูงสุด มีลักษณะเฉพาะในแต่ละตัวแปร โดย Compound D มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 281.5 µg/ml ภายใต้ช่วงความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทริน 10-20 และช่วงเวลาสกัด 27-35 นาที DMPBD มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 837.4 µg/ml ในช่วงความเข้มข้น 8-18 และเวลาสกัด 27-36 นาที ขณะที่ Curcuminoid มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 39.96 µg/ml ในช่วงความเข้มข้น 8-18 และเวลาสกัด 28-35 นาที

สำหรับค่าการตอบสนองที่เกี่ยวข้องกับฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 710 µM TE ในช่วงความเข้มข้น 13-15 และเวลาสกัด 31-33 นาที ABTS มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 860 µM TE ในช่วงความเข้มข้น 9-17 และเวลาสกัด 27-35 นาที ส่วน FRAP มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 1,050 µM TE ในช่วงความเข้มข้น 7-17 และเวลาสกัด 28-36 นาที

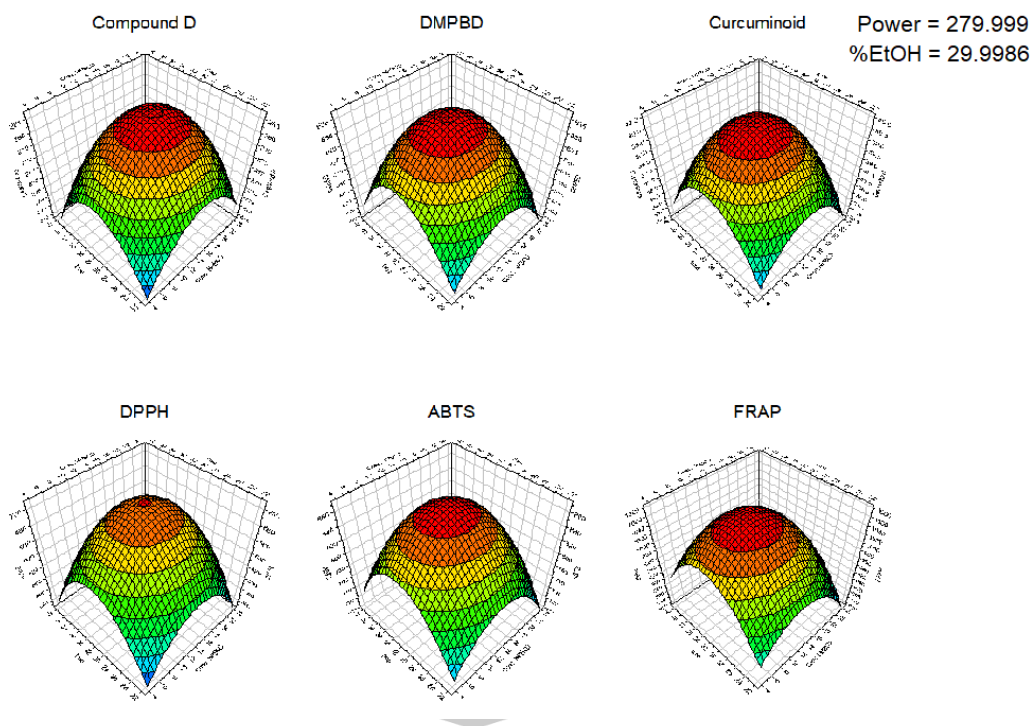
Response Surface Plot (ภาพที่ 4.49B) สะท้อนให้เห็นถึงอิทธิพลเชิงกำลังสองของ Conc. HPBCD และ Time โดยค่าการตอบสนองสูงสุดมักอยู่ในช่วงค่ากลางของตัวแปรที่ศึกษา ซึ่งสอดคล้องกับผลที่พบจาก Contour Plot อย่างไรก็ตาม หากค่าของ Conc. HPBCD และ Time เกินกว่าช่วงที่เหมาะสม อาจทำให้ค่าการตอบสนองลดลง เนื่องจากภาวะอิ่มตัวของไฮโคลเด็กซ์ทรินหรือการเสื่อมสลายของสารสำคัญเมื่อเวลาสกัดนานเกินไป

การศึกษานี้ยืนยันว่าความสัมพันธ์ระหว่าง Conc. HPBCD และ Time ต่อค่าการตอบสนองใน Optimization Study Plan 2 มีลักษณะเป็นแบบไม่เชิงเส้น โดยช่วงค่าที่เหมาะสมที่สุดอยู่ในระดับปานกลางของตัวแปรที่ศึกษา การควบคุมความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทรินและเวลาสกัดให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดและให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดสำหรับสารสำคัญที่ต้องการ

(A) Contour Plot of Optimization Study Plan 2



(B) Response Surface Plot of Optimization Study Plan 2



ภาพที่ 4.49 Contour Plot และ Surface Plot ความสัมพันธ์ระหว่าง Conc. HPBCD และ Time ในการศึกษา Optimization Study Plan 2

ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทริน (Conc. HPBCD) และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (Power) ต่อค่าการตอบสนองใน Optimization Study Plan 2

การศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทริน (Conc. HPBCD) และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (Power) ต่อค่าการตอบสนองใน Optimization Study Plan 2 มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการทำความเข้าใจกลไกของกระบวนการสกัดสารออกฤทธิ์จากเหง้าไพล Contour Plot และ Response Surface Plot ถูกนำมาใช้เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเหล่านี้กับค่าการตอบสนอง โดยสามารถระบุแนวโน้มของปัจจัยที่ส่งผลให้ได้ค่าการตอบสนองสูงสุด

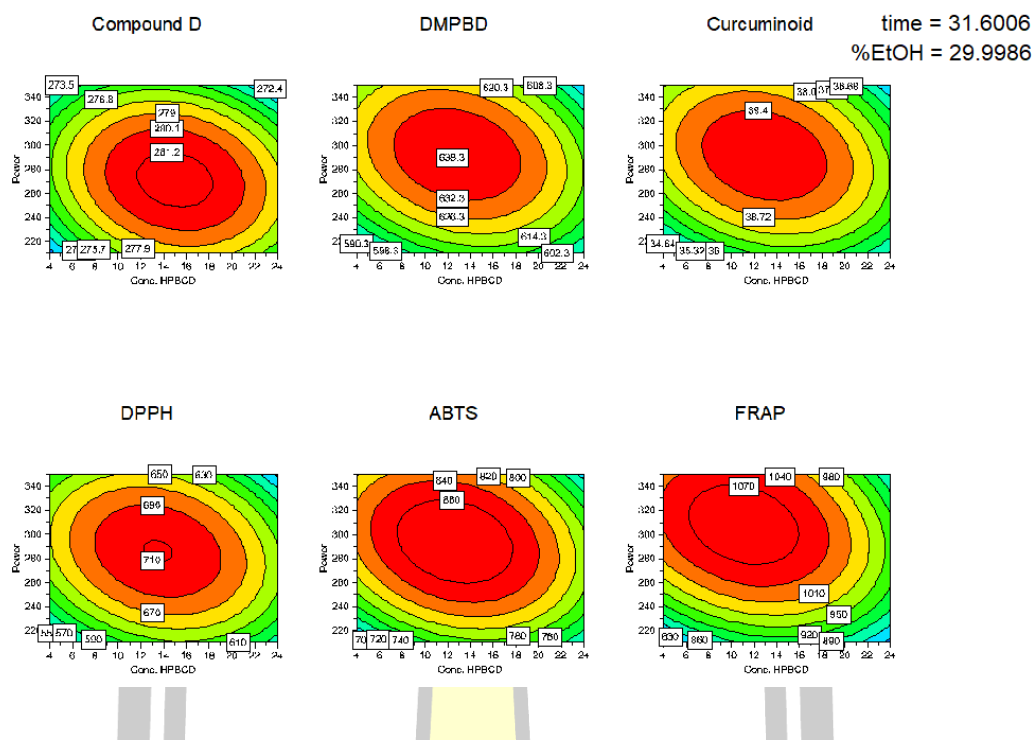
จากการวิเคราะห์ Contour Plot (ภาพที่ 4.50A) พบว่าบริเวณที่มีค่าการตอบสนองสูงสุดหรือโซนสีแดง มีลักษณะเฉพาะสำหรับแต่ละสารสำคัญ Compound D มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 281.2 $\mu\text{g/ml}$ ในช่วงความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทริน 10-20 mM และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ 230-310 W ขณะที่ DMPBD ให้ค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 639.3 $\mu\text{g/ml}$ ในช่วงความเข้มข้น 8-18 mM และพลังงานคลื่น 260-320 W ส่วน Curcuminoid มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 39.4 $\mu\text{g/ml}$ ในช่วงความเข้มข้น 8-18 mM และพลังงานคลื่น 260-320 W

สำหรับค่าการตอบสนองที่เกี่ยวข้องกับฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ได้แก่ DPPH, ABTS และ FRAP พบว่าบริเวณที่ให้ค่าการตอบสนองสูงสุดอยู่ในช่วงค่าที่แตกต่างกัน DPPH มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 710 $\mu\text{M TE}$ ในช่วงความเข้มข้น 13-15 mM และพลังงานคลื่น 250-320 W ABTS มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 860 $\mu\text{M TE}$ ในช่วงความเข้มข้น 9-17 mM และพลังงานคลื่น 260-320 W ขณะที่ FRAP มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 1,070 $\mu\text{M TE}$ ในช่วงความเข้มข้น 7-17 mM และพลังงานคลื่น 280-340 W

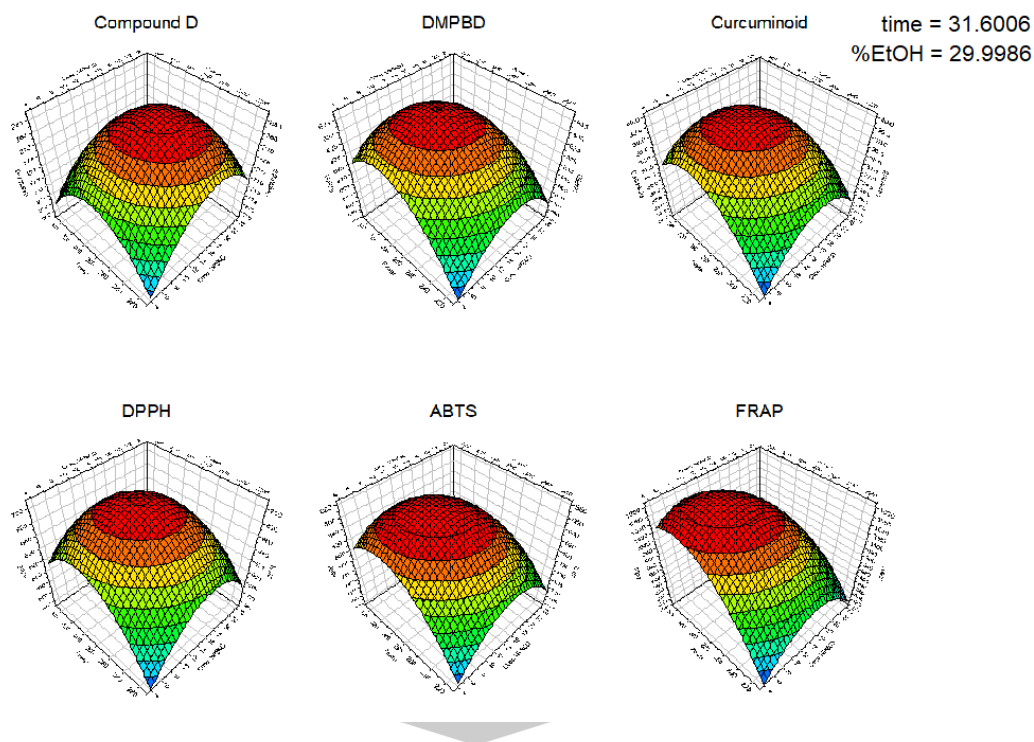
Response Surface Plot (ภาพที่ 4.50B) แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มของค่าการตอบสนองที่สอดคล้องกับ Contour Plot โดยค่าการตอบสนองสูงสุดมักอยู่ที่ช่วงค่ากลางของตัวแปรที่ศึกษา อย่างไรก็ตาม หากค่าของ Conc. HPBCD และ Power เกินกว่าช่วงที่เหมาะสม อาจส่งผลให้ค่าการตอบสนองลดลง ซึ่งอาจเกิดจากอิทธิพลของความอิ่มตัวของไฮโคลเด็กซ์ทรินหรือการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างของสารสำคัญจากพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ที่สูงเกินไป

จากการศึกษานี้สามารถสรุปได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่าง Conc. HPBCD และ Power ต่อค่าการตอบสนองใน Optimization Study Plan 2 มีลักษณะเป็นแบบไม่เชิงเส้น โดยค่าที่เหมาะสมที่สุดอยู่ในช่วงระดับกลางของตัวแปรที่ศึกษา การควบคุมความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทรินและพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดและให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดสำหรับสารสำคัญที่ต้องการ

(A) Contour Plot of Optimization Study Plan 2



(B) Response Surface Plot of Optimization Study Plan 2



ภาพที่ 4.50 Contour Plot และ Surface Plot ความสัมพันธ์ระหว่าง Conc. HPBCD และ Power ในการศึกษา Optimization Study Plan 2

ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทริน (Conc. HPBCD) และความเข้มข้นของเอทานอล (%EtOH) ต่อค่าการตอบสนองใน Optimization Study Plan 2

การศึกษาลักษณะของความสัมพันธ์ของไฮโคลเด็กซ์ทริน (Conc. HPBCD) และความเข้มข้นของเอทานอล (%EtOH) ต่อค่าการตอบสนองใน Optimization Study Plan 2 เป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยให้เข้าใจกระบวนการสกัดสารออกฤทธิ์จากเหง้าไพลอย่างมีประสิทธิภาพ Contour Plot และ Response Surface Plot ถูกนำมาใช้เพื่อแสดงแนวโน้มและอิทธิพลของตัวแปรเหล่านี้ต่อการตอบสนอง โดยสามารถระบุช่วงค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการสกัดสารสำคัญ

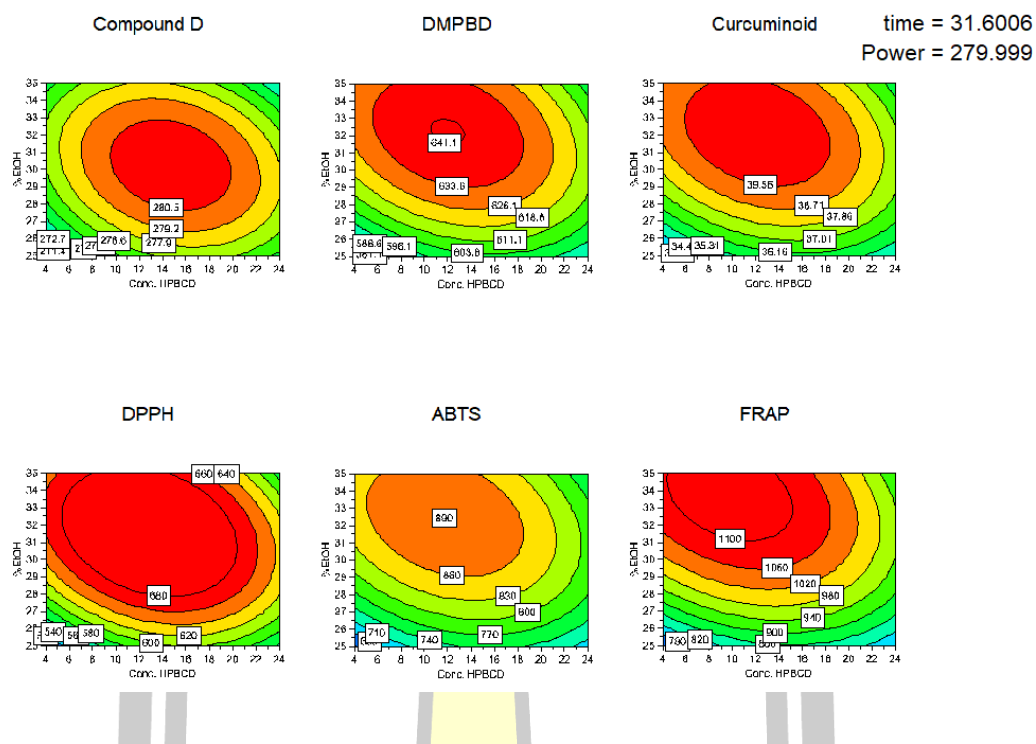
จากการวิเคราะห์ Contour Plot (ภาพที่ 4.51A) พบว่าบริเวณที่ให้ค่าการตอบสนองสูงสุดหรือโซนสีแดง มีความแตกต่างกันไปในแต่ละสารสำคัญ Compound D มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 280.5 µg/ml ในช่วงความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทริน 10-20 mM และความเข้มข้นของเอทานอล 28-32% ขณะที่ DMPBD มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 641.1 µg/ml ในช่วงความเข้มข้น 6-18 mM และความเข้มข้นของเอทานอล 30-35% ส่วน Curcuminoid ให้ค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 39.56 µg/ml ในช่วงความเข้มข้น 6-18 mM และความเข้มข้นของเอทานอล 29-35%

สำหรับค่าการตอบสนองที่เกี่ยวข้องกับฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ได้แก่ DPPH, ABTS และ FRAP พบว่าช่วงที่ให้ค่าการตอบสนองสูงสุดมีความแตกต่างกัน DPPH มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 680 µM TE ในช่วงความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทริน 6-20 mM และความเข้มข้นของเอทานอล 28-35% ขณะที่ ABTS พบว่ามีเพียงโซนสีส้ม โดยไม่มีโซนสีแดงที่ชัดเจน โดยช่วงความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทรินอยู่ที่ 6-18 mM และความเข้มข้นของเอทานอล 29-35% ส่วน FRAP ให้ค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 1,100 µM TE ในช่วงความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทริน 4-14 mM และความเข้มข้นของเอทานอล 32-35%

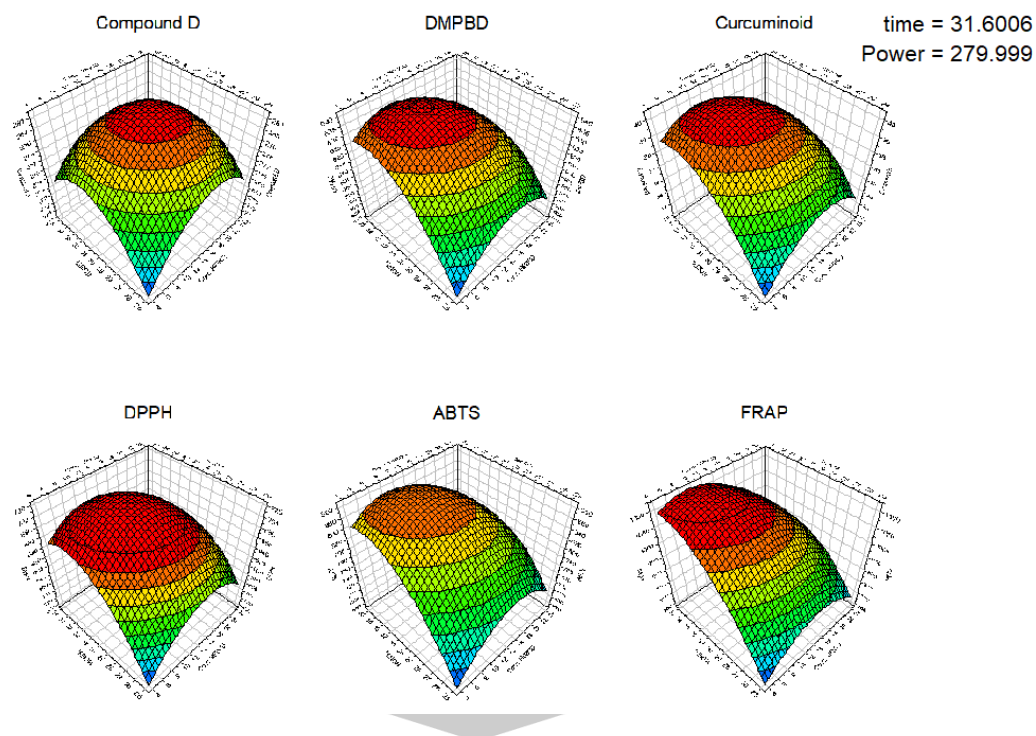
Response Surface Plot (ภาพที่ 4.51B) แสดงให้เห็นแนวโน้มของค่าการตอบสนองที่สอดคล้องกับ Contour Plot โดยค่าการตอบสนองสูงสุดส่วนใหญ่อยู่ในช่วงค่ากลางของตัวแปรที่ศึกษา อย่างไรก็ตาม การเพิ่มค่าของ Conc. HPBCD และ %EtOH เกินกว่าช่วงที่เหมาะสมอาจส่งผลให้ค่าการตอบสนองลดลง ซึ่งอาจเกิดจากผลของความอิ่มตัวของไฮโคลเด็กซ์ทริน หรืออิทธิพลของเอทานอลที่อาจส่งผลต่อโครงสร้างของสารสำคัญที่สกัดออกมา

จากการศึกษานี้สามารถสรุปได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่าง Conc. HPBCD และ %EtOH ต่อค่าการตอบสนองใน Optimization Study Plan 2 มีลักษณะเป็นแบบไม่เชิงเส้น โดยค่าที่เหมาะสมที่สุดอยู่ในช่วงระดับกลางของตัวแปรที่ศึกษา การควบคุมค่าความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทรินและความเข้มข้นของเอทานอลให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดและให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดสำหรับสารสำคัญที่ต้องการ

(A) Contour Plot of Optimization Study Plan 2



(B) Response Surface Plot of Optimization Study Plan 2



ภาพที่ 4.51 Contour Plot และ Surface Plot ความสัมพันธ์ระหว่าง Conc. HPBCD และ %EtOH ในการศึกษา Optimization Study Plan 2

ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาสกัด (Time) และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (Power) ต่อค่าการตอบสนองใน Optimization Study Plan 2

การศึกษาผลกระทบของเวลาสกัด (Time) และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (Power) ต่อค่าการตอบสนองใน Optimization Study Plan 2 เป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยให้เข้าใจกระบวนการสกัดสารออกฤทธิ์จากเหง้าไพลอย่างมีประสิทธิภาพ Contour Plot และ Response Surface Plot ถูกนำมาใช้เพื่อแสดงแนวโน้มและอิทธิพลของตัวแปรเหล่านี้ต่อค่าการตอบสนอง โดยสามารถระบุช่วงค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการสกัดสารสำคัญ

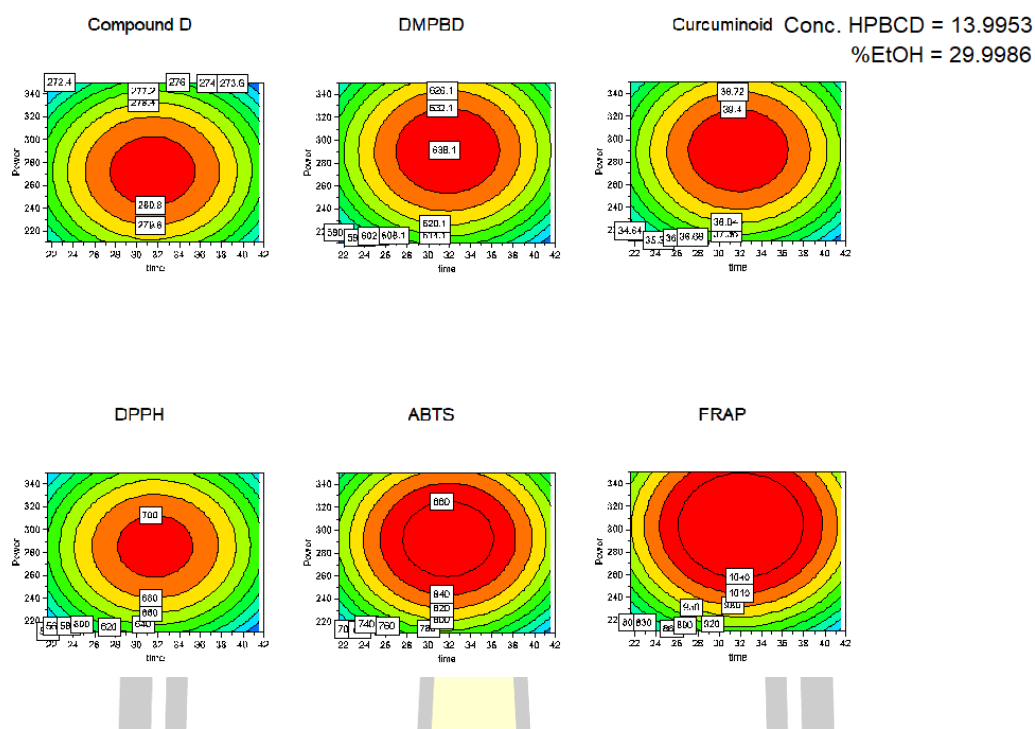
จากการวิเคราะห์ Contour Plot (ภาพที่ 4.52A) พบว่าบริเวณที่ให้ค่าการตอบสนองสูงสุดหรือโซนสีแดง มีความแตกต่างกันไปในแต่ละสารสำคัญ Compound D มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 280.8 $\mu\text{g/ml}$ ในช่วงเวลาสกัด 28-35 นาที และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ 240-300 W ขณะที่ DMPBD มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 638.1 $\mu\text{g/ml}$ ในช่วงเวลาสกัด 27-36 นาที และพลังงานคลื่น 260-330 W ส่วน Curcuminoid ให้ค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 39.4 $\mu\text{g/ml}$ ในช่วงเวลาสกัด 27-36 นาที และพลังงานคลื่น 260-320 W

สำหรับค่าการตอบสนองที่เกี่ยวข้องกับฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ได้แก่ DPPH, ABTS และ FRAP พบว่าช่วงที่ให้ค่าการตอบสนองสูงสุดมีความแตกต่างกัน DPPH มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 700 $\mu\text{M TE}$ ในช่วงเวลาสกัด 28-35 นาที และพลังงานคลื่น 260-310 W ขณะที่ ABTS มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 860 $\mu\text{M TE}$ ในช่วงเวลาสกัด 28-36 นาที และพลังงานคลื่น 260-320 W ส่วน FRAP ให้ค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 1040 $\mu\text{M TE}$ ในช่วงเวลาสกัด 27-37 นาที และพลังงานคลื่น 260-350 W

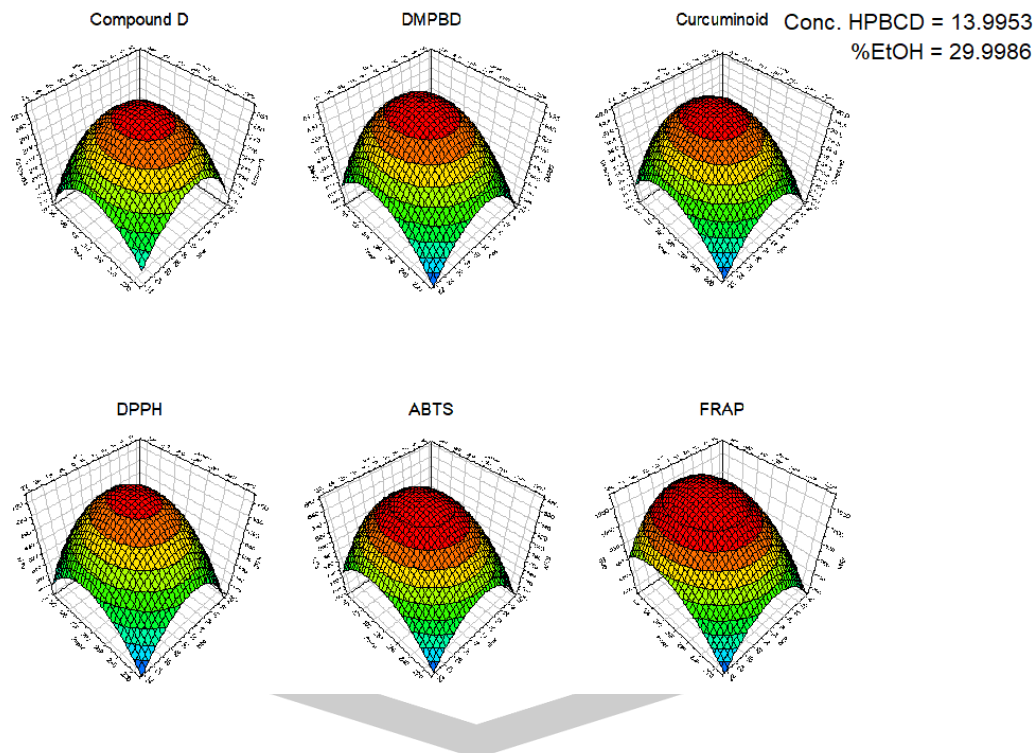
Response Surface Plot (ภาพที่ 4.52B) แสดงให้เห็นแนวโน้มของค่าการตอบสนองที่สอดคล้องกับ Contour Plot โดยค่าการตอบสนองสูงสุดส่วนใหญ่อยู่ในช่วงค่ากลางของตัวแปรที่ศึกษา อย่างไรก็ตาม การเพิ่มค่าของ Time และ Power เกินกว่าช่วงที่เหมาะสมอาจส่งผลให้ค่าการตอบสนองลดลง ซึ่งอาจเกิดจากผลของความอิ่มตัวของสารที่สกัด หรือการใช้พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ที่สูงเกินไปจนทำให้โครงสร้างของสารสำคัญเกิดการเปลี่ยนแปลง

จากการศึกษานี้สามารถสรุปได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่าง Time และ Power ต่อค่าการตอบสนองใน Optimization Study Plan 2 มีลักษณะเป็นแบบไม่เชิงเส้น โดยค่าที่เหมาะสมที่สุดอยู่ในช่วงระดับกลางของตัวแปรที่ศึกษา การควบคุมเวลาสกัดและพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดและให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดสำหรับสารสำคัญที่ต้องการ

(A) Contour Plot of Optimization Study Plan 2



(B) Response Surface Plot of Optimization Study Plan 2



ภาพที่ 4.52 Contour Plot และ Surface Plot ความสัมพันธ์ระหว่าง Time และ Power ใน
การศึกษา Optimization Study Plan 2

ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาสกัด (Time) และความเข้มข้นของเอทานอล (%EtOH) ต่อค่าการตอบสนองใน Optimization Study Plan 2

การศึกษาผลกระทบของเวลาสกัด (Time) และความเข้มข้นของเอทานอล (%EtOH) ต่อค่าการตอบสนองใน Optimization Study Plan 2 เป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยให้เข้าใจกระบวนการสกัดสารออกฤทธิ์จากเหง้าโพลได้อย่างมีประสิทธิภาพ Contour Plot และ Response Surface Plot ถูกนำมาใช้เพื่อแสดงแนวโน้มและอิทธิพลของตัวแปรเหล่านี้ต่อค่าการตอบสนอง โดยสามารถระบุช่วงค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการสกัดสารสำคัญ

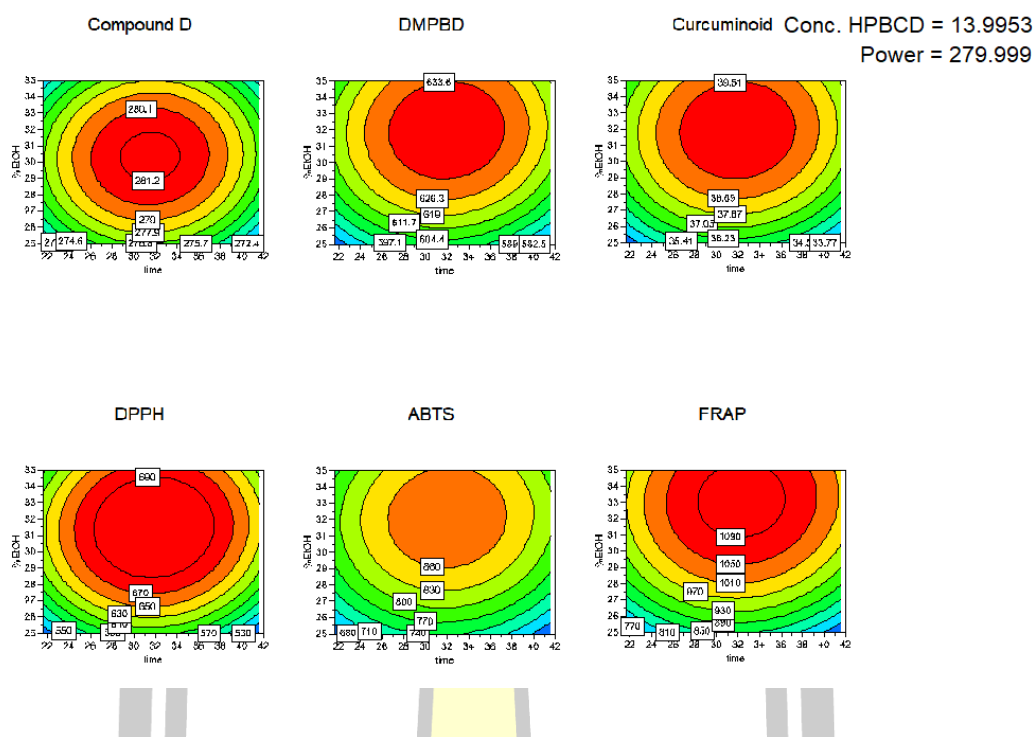
จากการวิเคราะห์ Contour Plot (ภาพที่ 4.53A) พบว่าบริเวณที่ให้ค่าการตอบสนองสูงสุดหรือโซนสีแดง มีความแตกต่างกันไปในแต่ละสารสำคัญ Compound D มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 281.2 $\mu\text{g/ml}$ ในช่วงเวลาสกัด 27-37 นาที และความเข้มข้นของเอทานอล 28-33% ขณะที่ DMPBD มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 633.8 $\mu\text{g/ml}$ ในช่วงเวลาสกัด 27-36 นาที และความเข้มข้นของเอทานอล 29-35% ส่วน Curcuminoid ให้ค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 39.51 $\mu\text{g/ml}$ ในช่วงเวลาสกัด 27-36 นาที และความเข้มข้นของเอทานอล 29-35%

สำหรับค่าการตอบสนองที่เกี่ยวข้องกับฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ได้แก่ DPPH, ABTS และ FRAP พบว่าช่วงที่ให้ค่าการตอบสนองสูงสุดมีความแตกต่างกัน DPPH มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 690 $\mu\text{M TE}$ ในช่วงเวลาสกัด 25-38 นาที และความเข้มข้นของเอทานอล 28-35% ขณะที่ ABTS พบว่ามีเพียงโซนสีส้ม โดยไม่มีโซนสีแดงที่ชัดเจน โดยช่วงความเข้มข้นของโซโคเลเด็กซ์ทรีนอยู่ที่ 28-36 นาที และความเข้มข้นของเอทานอล 29-35% ส่วน FRAP ให้ค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 1,090 $\mu\text{M TE}$ ในช่วงเวลาสกัด 27-37 นาที และความเข้มข้นของเอทานอล 29-35%

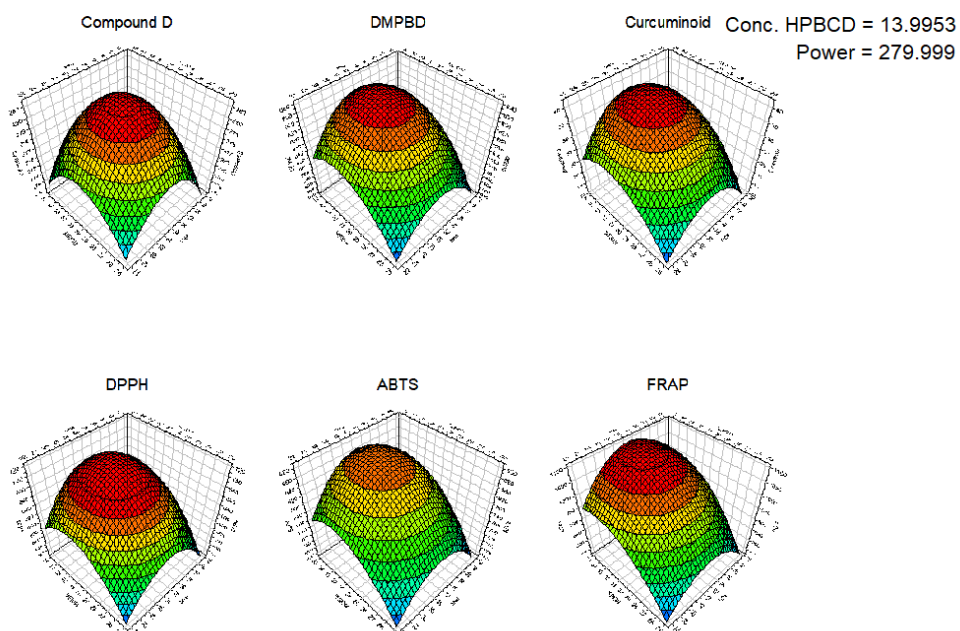
Response Surface Plot (ภาพที่ 4.53B) แสดงให้เห็นแนวโน้มของค่าการตอบสนองที่สอดคล้องกับ Contour Plot โดยค่าการตอบสนองสูงสุดส่วนใหญ่อยู่ในช่วงค่ากลางของตัวแปรที่ศึกษา อย่างไรก็ตาม การเพิ่มค่าของ Time และ %EtOH เกินกว่าช่วงที่เหมาะสมอาจส่งผลให้ค่าการตอบสนองลดลง ซึ่งอาจเกิดจากผลของความอิ่มตัวของสารที่สกัด หรืออิทธิพลของเอทานอลที่อาจส่งผลต่อโครงสร้างของสารสำคัญที่สกัดออกมา

จากการศึกษานี้สามารถสรุปได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่าง Time และ %EtOH ต่อค่าการตอบสนองใน Optimization Study Plan 2 มีลักษณะเป็นแบบไม่เชิงเส้น โดยค่าที่เหมาะสมที่สุดอยู่ในช่วงระดับกลางของตัวแปรที่ศึกษา การควบคุมเวลาสกัดและความเข้มข้นของเอทานอลให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดและให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดสำหรับสารสำคัญที่ต้องการ

(A) Contour Plot of Optimization Study Plan 2



(B) Response Surface Plot of Optimization Study Plan 2



ภาพที่ 4.53 Contour Plot และ Surface Plot ความสัมพันธ์ระหว่าง Time และ %EtOH
ในการศึกษา Optimization Study Plan 2

ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (Power) และความเข้มข้นของเอทานอล (%EtOH) ต่อค่าการตอบสนองใน Optimization Study Plan 2

การศึกษาผลกระทบของพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (Power) และความเข้มข้นของเอทานอล (%EtOH) ต่อค่าการตอบสนองใน Optimization Study Plan 2 มีบทบาทสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดสารออกฤทธิ์จากเหง้าโพล โดยใช้ Contour Plot และ Response Surface Plot เป็นเครื่องมือแสดงแนวโน้มและอิทธิพลของตัวแปรที่เกี่ยวข้อง เพื่อกำหนดช่วงค่าที่เหมาะสมสำหรับการสกัดที่สำคัญ

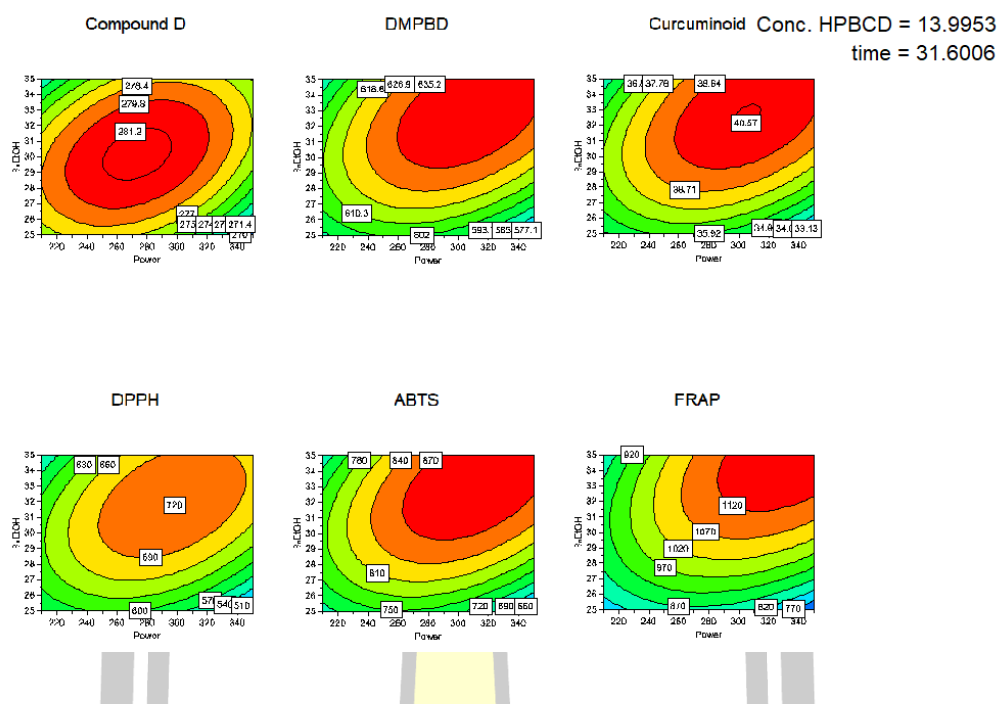
จากการวิเคราะห์ Contour Plot (ภาพที่ 4.54A) พบว่าโซนสีแดง ซึ่งเป็นบริเวณที่ให้ค่าการตอบสนองสูงสุด มีความแตกต่างกันในแต่ละสารสำคัญ โดย Compound D มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 281.2 $\mu\text{g/ml}$ เมื่อใช้พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ในช่วง 230-320 W และความเข้มข้นของเอทานอล 28-33% ขณะที่ DMPBD มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 633.8 $\mu\text{g/ml}$ ในช่วงพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ 260-350 W และความเข้มข้นของเอทานอล 29-35% ส่วน Curcuminoid มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 39.51 $\mu\text{g/ml}$ ในช่วงพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ 260-350 W และความเข้มข้นของเอทานอล 29-35%

สำหรับค่าการตอบสนองที่เกี่ยวข้องกับฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ได้แก่ DPPH, ABTS และ FRAP พบว่า DPPH ไม่มีโซนสีแดงที่ชัดเจน โดยมีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 690 $\mu\text{M TE}$ ในช่วงพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ 250-340 W และความเข้มข้นของเอทานอล 28-35% ในขณะที่ ABTS มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 860 $\mu\text{M TE}$ ในช่วงพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ 260-350 W และความเข้มข้นของเอทานอล 29-35% สำหรับ FRAP มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 1,090 $\mu\text{M TE}$ ในช่วงพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ 290-350 W และความเข้มข้นของเอทานอล 31-35%

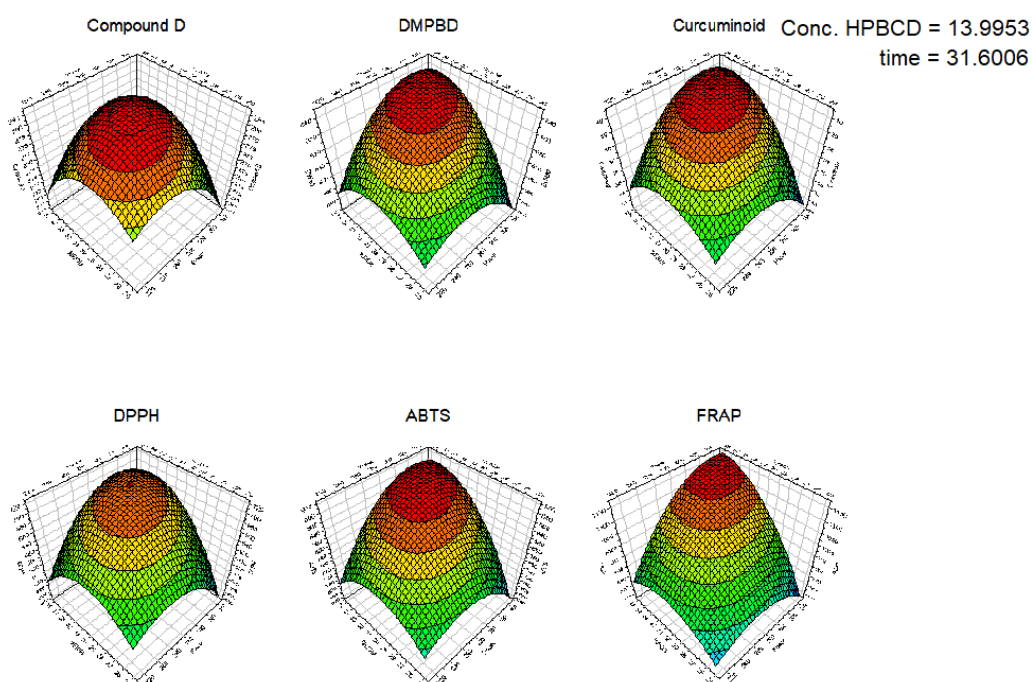
Response Surface Plot (ภาพที่ 4.54B) สะท้อนแนวโน้มที่สอดคล้องกับ Contour Plot โดยค่าการตอบสนองสูงสุดส่วนใหญ่อยู่ในช่วงค่ากลางของตัวแปรที่ศึกษา อย่างไรก็ตาม การใช้พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์และความเข้มข้นของเอทานอลเกินกว่าช่วงที่เหมาะสมอาจทำให้ค่าการตอบสนองลดลง ซึ่งอาจเกิดจากผลของการอิมัตวของสารที่สกัด หรืออิทธิพลของเอทานอลที่ส่งผลต่อโครงสร้างของสารออกฤทธิ์

จากการศึกษานี้สามารถสรุปได้ว่า ความสัมพันธ์ระหว่าง Power และ %EtOH ต่อค่าการตอบสนองใน Optimization Study Plan 2 เป็นลักษณะไม่เชิงเส้น โดยช่วงค่าที่เหมาะสมที่สุดจะอยู่ในระดับกลางของตัวแปร การควบคุมพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์และความเข้มข้นของเอทานอลให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งสำคัญต่อการเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการสกัดและให้ผลลัพธ์สูงสุดสำหรับสารออกฤทธิ์ที่ต้องการ

(A) Contour Plot of Optimization Study Plan 2



(B) Response Surface Plot of Optimization Study Plan 2



ภาพที่ 4.54 Contour Plot และ Surface Plot ความสัมพันธ์ระหว่าง Power และ %EtOH
ในการศึกษา Optimization Study Plan 2

บทสรุปการวิเคราะห์ Contour Plot และ Surface Plot ใน Optimization Study Plan 2

การศึกษานี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่มีผลต่อค่าการตอบสนองของกระบวนการสกัดสารออกฤทธิ์จากเหง้าไพล โดยใช้ Contour Plot และ Response Surface Plot เป็นเครื่องมือสำคัญในการแสดงแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงค่าการตอบสนองภายใต้เงื่อนไขที่แตกต่างกัน ปัจจัยหลักที่นำมาพิจารณา ได้แก่ พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (Power), ความเข้มข้นของเอทานอล (%EtOH), เวลาสกัด (Time) และความเข้มข้นของไซโคลเดกซ์ทริน (Conc. HPBCD) ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ส่งผลโดยตรงต่อปริมาณสารออกฤทธิ์ที่สกัดได้ รวมถึงศักยภาพของสารในการต้านอนุมูลอิสระที่วัดผ่าน DPPH, ABTS และ FRAP

ผลการวิเคราะห์ Contour Plot และ Response Surface Plot พบว่า ปัจจัยแต่ละตัวมีอิทธิพลต่อกระบวนการสกัดในลักษณะที่ต่างกัน ความเข้มข้นของไซโคลเดกซ์ทรินมีบทบาทสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพการละลายและการกักเก็บสารออกฤทธิ์ แต่เมื่อใช้ในปริมาณที่สูงเกินไป อาจเกิดภาวะอิ่มตัว ส่งผลให้การกักเก็บสารลดลงและประสิทธิภาพการสกัดลดลงตามไปด้วย

เวลาสกัดเป็นอีกหนึ่งปัจจัยสำคัญที่มีผลโดยตรงต่อปริมาณสารที่สกัดได้ โดยช่วงเวลาที่เหมาะสมช่วยให้สารออกฤทธิ์ถูกปลดปล่อยออกมาได้สูงสุด อย่างไรก็ตาม การสกัดที่ใช้เวลานานเกินไปอาจส่งผลให้เกิดการสลายตัวของสารสำคัญเนื่องจากปัจจัยทางเคมีและความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการ

พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์มีบทบาทในการช่วยกระตุ้นการสกัดโดยเพิ่มแรงเฉือนและการเกิดโพรงอากาศ (Cavitation) ซึ่งช่วยให้สารสำคัญสามารถถูกปลดปล่อยออกจากเมทริกซ์พืชได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม การใช้พลังงานที่สูงเกินไปอาจส่งผลให้เกิดการสลายตัวของสารออกฤทธิ์ ทำให้ค่าการตอบสนองลดลง

สำหรับความเข้มข้นของเอทานอล พบว่ามีผลต่อการละลายของสารออกฤทธิ์ ซึ่งระดับที่เหมาะสมจะช่วยเสริมประสิทธิภาพของกระบวนการสกัด อย่างไรก็ตาม หากความเข้มข้นของเอทานอลสูงเกินไป อาจส่งผลต่อโครงสร้างของสารออกฤทธิ์ ทำให้สูญเสียประสิทธิภาพของสารสำคัญที่ต้องการสกัด

จากการใช้ Contour Plot และ Response Surface Plot สามารถระบุช่วงค่าที่เหมาะสมของแต่ละตัวแปรได้อย่างชัดเจน โดยค่าที่เหมาะสมสำหรับการสกัดสารออกฤทธิ์จากเหง้าไพลมักอยู่ในช่วงค่ากลางของตัวแปรที่ศึกษา การควบคุมปัจจัยให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมเป็นสิ่งสำคัญที่ช่วยให้กระบวนการสกัดมีประสิทธิภาพสูงสุด

ดังนั้น ผลการศึกษานี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาและปรับปรุงกระบวนการสกัดสารออกฤทธิ์จากเหง้าไพลให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด การเลือกใช้ค่าปัจจัยที่เหมาะสมเป็นกุญแจสำคัญใน

การเพิ่มปริมาณสารออกฤทธิ์และคงประสิทธิภาพของฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ การใช้ค่าปัจจัยที่สูงหรือต่ำเกินไปอาจลดประสิทธิภาพของกระบวนการและนำไปสู่การสลายตัวของสารสำคัญได้

4.3.2.5 การระบุจุดที่เหมาะสม (Optimization) ใน Optimization Study Plan 2

การวิเคราะห์จุดที่เหมาะสมใน Optimization Study Plan 2 มีเป้าหมายเพื่อระบุค่าของปัจจัยที่ให้ค่าการตอบสนองสูงสุดโดยในการวิเคราะห์ครั้งนี้ จุดที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.12 ให้เห็นว่าค่าที่เหมาะสมของตัวแปรที่ใช้ในการทดลองสามารถเพิ่มค่าการตอบสนองของสารที่สกัดได้สูงสุด โดยเฉพาะสารที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพสำคัญ ซึ่งรวมถึง Compound D, DMPBD, Curcuminoid, และสารต้านอนุมูลอิสระที่วัดโดย DPPH, ABTS และ FRAP โดยค่าเป้าหมายของแต่ละค่าการตอบสนองถูกกำหนดให้อยู่ในช่วงสูงสุดที่เป็นไปได้ ซึ่งค่า Compound D สูงสุดอยู่ที่ 279.127 $\mu\text{g/ml}$, ค่า DMPBD สูงสุดที่ 627.553 $\mu\text{g/ml}$, ค่า Curcuminoid content ที่ 38.823 $\mu\text{g/ml}$, ค่าการต้านอนุมูลอิสระ DPPH สูงสุดที่ 46.6493 $\mu\text{M TE}$, ABTS ที่ 840.166 $\mu\text{M TE}$ และ FRAP ที่ 1041.72 $\mu\text{M TE}$ ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงประสิทธิภาพสูงสุดของกระบวนการสกัดภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสม

ตารางที่ 4.12 แสดงค่าเป้าหมายของการเพิ่มประสิทธิภาพของตัวแปรตอบสนองใน Optimization Study Plan 5 จากโปรแกรม MODDE 7.0

Response Variable	Optimization Objective	Weight	Predicted Minimum Value	Predicted Maximum Value
Compound D	Maximize	1	276.372	279.127
DMPBD	Maximize	1	610.784	627.553
Curcuminoid	Maximize	1	36.9336	38.823
DPPH	Maximize	1	42.8116	46.6493
ABTS	Maximize	1	780.055	840.166
FRAP	Maximize	1	949.059	1041.72

ตารางที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์ค่าที่เหมาะสมของปัจจัยและค่าการตอบสนองใน Optimization Study Plan 2 จากโปรแกรม MODDE 7.0

No.	X3 (mM)	X5 (min)	X6 (W)	X7 (%EtOH)	Y1 (µg/ml)	Y2 (µg/ml)	Y3 (µg/ml)	Y4 (µM TE)	Y5 (µM TE)	Y6 (µM TE)
1	17.1111	29.5133	274.113	29.9985	281.267	632.942	39.4697	697.535	856.586	1038.93
2	13.8653	31.4394	279.875	29.9988	281.556	637.636	39.9895	710.57	874.074	1072.29
3	13.6917	31.7365	278.112	29.9981	281.557	637.522	39.9771	710.293	873.641	1071.36
4	14.6041	31.4777	275.266	29.9959	281.638	636.836	39.9035	708.994	870.906	1064.51
5	14.4376	31.6604	275.147	29.9989	281.631	636.929	39.9136	709.192	871.273	1065.37
6	14.9792	31.439	271.03	29.9894	281.654	636.002	39.8124	707.01	867.701	1057.49
7	15.001	31.4762	271.298	29.9814	281.654	636.016	39.8139	707.045	867.755	1057.6
8	14.9426	31.5558	271.164	29.9596	281.653	635.984	39.8105	706.962	867.638	1057.37

เมื่อวิเคราะห์แนวโน้มของค่าที่เหมาะสมโดยใช้ข้อมูลจากการทดลอง (ตารางที่ 4.13) พบว่าค่าความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ประมาณ 13.69-17.11 mM, เวลาสกัดที่ 29.5-31.7 นาที, และกำลังคลื่นอัลตราซาวด์ที่ 270-280 W พร้อมกับค่าความเข้มข้นของเอทานอลที่ใกล้เคียง 30% ให้ค่าการตอบสนองของสารออกฤทธิ์ในระดับสูงสุด ซึ่งหมายความว่า การใช้ คลื่นอัลตราซาวด์ร่วมกับเอทานอลความเข้มข้นสูง มีบทบาทสำคัญต่อประสิทธิภาพของกระบวนการสกัด โดยช่วยเพิ่มการละลายของสารออกฤทธิ์และลดแรงตึงผิวของของเหลว ทำให้สามารถดึงสารออกฤทธิ์ออกจากเมทริกซ์ของพืชได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตาม หากค่าพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์สูงเกินไป อาจทำให้เกิดการสลายตัวของสารออกฤทธิ์ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มค่าพลังงานเกินช่วงที่เหมาะสมไม่ได้ช่วยให้ค่าการตอบสนองสูงขึ้นเสมอไป

การวิเคราะห์เพิ่มเติมยังแสดงให้เห็นว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยแต่ละตัวส่งผลกระทบต่อค่าการตอบสนองในรูปแบบที่แตกต่างกัน โดยพบว่าค่าความเข้มข้นของเอทานอล (% EtOH) มีผลกระทบเชิงบวกกับปริมาณของสารออกฤทธิ์ โดยเฉพาะในกรณีของ ABTS และ FRAP ซึ่งค่าการตอบสนองของสารต้านอนุมูลอิสระมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความเข้มข้นของเอทานอลสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม ค่าของ DPPH มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อค่าเอทานอลสูงขึ้นเกิน 29% ซึ่งอาจเกิดจากกลไกเฉพาะของปฏิกิริยาด้านอนุมูลอิสระในสารละลายที่มีองค์ประกอบต่างกัน³

จากข้อมูลที่ได้รับ สามารถสรุปได้ว่า ค่าที่เหมาะสมที่สุด สำหรับการสกัดโดยใช้ Ultrasonic-Assisted Extraction (UAE) ใน Optimization Study Plan 2 คือ ค่าความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทรินที่ 13.69-17.11 mM, เวลาสกัดที่ 29.5-31.7 นาที, กำลังคลื่นอัลตราซาวด์ที่ 270-280 W และความเข้มข้นของเอทานอลที่ 29-30% ภายใต้เงื่อนไขดังกล่าว ค่าการตอบสนองของสารออกฤทธิ์หลักและสารต้านอนุมูลอิสระสามารถเพิ่มขึ้นสู่ค่าที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการควบคุมค่าปัจจัยเหล่านี้ให้อยู่ในช่วงที่กำหนดสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดได้อย่างมีนัยสำคัญ ทั้งในด้านปริมาณสารออกฤทธิ์และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอางและผลิตภัณฑ์เสริมอาหารที่ต้องการสารสกัดที่มีคุณภาพสูง

4.3.2.6 การตรวจสอบความถูกต้องของค่าคาดการณ์ใน Optimization Study Plan 2

การตรวจสอบความถูกต้องของค่าคาดการณ์ที่ได้จากแบบจำลองเป็นขั้นตอนสำคัญในการพิจารณาความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของแบบจำลองเชิงสถิติที่ใช้ทำนายผลลัพธ์ของกระบวนการสกัด ใน Optimization Study Plan 2 ได้ดำเนินการทดลองโดยใช้เงื่อนไขที่กำหนดไว้ ได้แก่ ความเข้มข้นของ HPBCD 17 มิลลิโมลาร์ (mM), เวลาสกัด 30 นาที, กำลังของคลื่นอัลตราซาวด์ 274 วัตต์ (W), ความเข้มข้นของเอทานอล 30% (v/v), ไม่มีการเติมสารเพิ่มประสิทธิภาพ เพื่อประเมินความแม่นยำของค่าคาดการณ์ ได้มีการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองกับค่าที่ได้จากการทดลองจริง โดยอาศัย Verification Triplicate ซึ่งเป็นการทดลองซ้ำสามครั้งเพื่อให้ได้ค่าที่แม่นยำและลดผลกระทบจากความแปรปรวนของการทดลอง แสดงในตารางที่ 4.14 การวิเคราะห์ค่าคาดการณ์ทำโดยการพิจารณาช่วงความเชื่อมั่นของค่าคาดการณ์ (Prediction Lower – Upper) และคำนวณ ค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (% Relative Error, %RE) โดยหากค่าคลาดเคลื่อนอยู่ภายใน 5% ถือว่าเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้สำหรับการทำนายผลของกระบวนการ

พูน ปณ จิโต ชีเว

ตารางที่ 4.14 แสดงการเปรียบเทียบค่าคาดการณ์และค่าตรวจสอบ (Verification) ใน Optimization Study Plan 2

Compound	Prediction (Mean)	Prediction (Lower)	Prediction (Upper)	Verification (1)	Verification (2)	Verification (3)	ค่าเฉลี่ย
Compound D ($\mu\text{g/ml}$)	281.368	278.852	283.885	284.266	282.325	284.846	283.812
DMPBD ($\mu\text{g/ml}$)	633.583	620.658	646.508	629.254	635.852	641.236	635.447
Curcuminoid ($\mu\text{g/ml}$)	39.542	37.97	41.114	38.251	39.256	40.256	39.254
DPPH ($\mu\text{M TE}$)	699.618	658.729	740.506	700.266	750.256	732.895	727.806
ABTS ($\mu\text{M TE}$)	858.887	810.105	907.669	864.256	908.263	900.251	890.923
FRAP ($\mu\text{M TE}$)	1042.5	978.304	1106.7	994.593	1012.263	1120.746	1042.500

ผลการเปรียบเทียบค่าคาดการณ์กับค่าที่ได้จากการทดลองจริงแสดงให้เห็นว่า ค่าของ Compound D ซึ่งเป็นหนึ่งในสารประกอบหลักที่ต้องการศึกษา มีค่าคาดการณ์เฉลี่ยอยู่ที่ 281.368 $\mu\text{g/ml}$ ขณะที่ค่าตรวจสอบจริงเฉลี่ยอยู่ที่ 283.812 $\mu\text{g/ml}$ ทำให้มีค่า %RE เท่ากับ 0.87% ซึ่งต่ำมากและอยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้ โดยค่าที่ตรวจสอบได้จริงทั้งหมดอยู่ในช่วงค่าคาดการณ์ที่กำหนดไว้ระหว่าง 278.852 – 283.885 $\mu\text{g/ml}$ สะท้อนให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถทำนายผลของสารประกอบนี้ได้อย่างแม่นยำ

สำหรับ DMPBD ค่าคาดการณ์เฉลี่ยอยู่ที่ 633.583 $\mu\text{g/ml}$ โดยมีค่าตรวจสอบจริงเฉลี่ยอยู่ที่ 635.447 $\mu\text{g/ml}$ ซึ่งมีค่าเบี่ยงเบนเล็กน้อย ส่งผลให้ค่า %RE เท่ากับ 0.29% ซึ่งจัดอยู่ในระดับที่ต่ำมากและสามารถยอมรับได้ เนื่องจากค่าที่ตรวจสอบได้จริงอยู่ในช่วงค่าคาดการณ์ที่กำหนดไว้ระหว่าง 620.658 – 646.508 $\mu\text{g/ml}$ ทำให้มั่นใจได้ว่าแบบจำลองที่ใช้สามารถทำนายค่าของสารนี้ได้อย่างแม่นยำ

ในส่วนของ Curcuminoid ซึ่งเป็นสารสำคัญที่ต้องการศึกษาในการสกัด ค่าคาดการณ์เฉลี่ยที่ได้อยู่ที่ 39.542 $\mu\text{g/ml}$ ขณะที่ค่าตรวจสอบจริงเฉลี่ยอยู่ที่ 39.254 $\mu\text{g/ml}$ ส่งผลให้ค่า %RE เท่ากับ 0.73% ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำมากและสามารถยอมรับได้ โดยค่าที่ตรวจสอบได้จริงอยู่ในช่วงค่าคาดการณ์ที่กำหนดไว้ระหว่าง 37.970 – 41.114 $\mu\text{g/ml}$ แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถใช้ทำนายค่าของสารประกอบกลุ่มเคอร์คูมินอยด์ได้อย่างแม่นยำ

อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาค่าผลลัพธ์ของ DPPH ซึ่งเป็นค่าที่ใช้วัดศักยภาพของสารสกัดในการกำจัดอนุมูลอิสระ พบว่าค่าการลดเฉลี่ยอยู่ที่ $699.618 \mu\text{M TE}$ ขณะที่ค่าตรวจสอบจริงเฉลี่ยอยู่ที่ $727.806 \mu\text{M TE}$ ซึ่งมีค่าคลาดเคลื่อนมากกว่าสารตัวอื่น ส่งผลให้ค่า %RE เท่ากับ 4.03% แม้ว่าค่านี้ยังอยู่ต่ำกว่าเกณฑ์ 5% ที่กำหนดไว้ แต่ก็ถือว่าสูงกว่าค่าคลาดเคลื่อนของสารตัวอื่นในแผนการทดลองนี้ อาจเป็นไปได้ว่าการแปรปรวนของกระบวนการสกัด หรือปัจจัยอื่นที่ไม่ได้ควบคุมในการทดลองมีผลต่อความไม่แน่นอนของค่าตรวจสอบจริง อย่างไรก็ตาม ค่าเบี่ยงเบนที่พบยังคงอยู่ในระดับที่สามารถยอมรับได้

สำหรับค่าการทดสอบ ABTS ค่าการลดเฉลี่ยอยู่ที่ $858.887 \mu\text{M TE}$ ขณะที่ค่าตรวจสอบจริงเฉลี่ยอยู่ที่ $890.923 \mu\text{M TE}$ ส่งผลให้ค่า %RE เท่ากับ 3.73% ซึ่งแม้ว่าจะสูงกว่าค่าคลาดเคลื่อนของสารตัวอื่น แต่ก็ยังอยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้ เนื่องจากค่าที่ตรวจสอบได้จริงทั้งหมดอยู่ในช่วงค่าการลดที่กำหนดไว้ระหว่าง $810.105 - 907.669 \mu\text{M TE}$ จึงสามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองยังสามารถใช้พยากรณ์ค่าการทดสอบ ABTS ได้อย่างแม่นยำ

สุดท้ายคือค่าการทดสอบ FRAP ซึ่งใช้วัดศักยภาพของสารต้านอนุมูลอิสระผ่านปฏิกิริยารีดักชัน ค่าการลดเฉลี่ยอยู่ที่ $1042.500 \mu\text{M TE}$ ขณะที่ค่าตรวจสอบจริงเฉลี่ยอยู่ที่ $1042.534 \mu\text{M TE}$ ซึ่งมีค่าคลาดเคลื่อนน้อยมากจนแทบไม่มีความแตกต่างกัน ส่งผลให้ค่า %RE เท่ากับ 0.00% ซึ่งสะท้อนว่าแบบจำลองสามารถพยากรณ์ค่าของสารต้านอนุมูลอิสระนี้ได้อย่างถูกต้องสูงสุด

จากผลการวิเคราะห์ทั้งหมดพบว่า ค่าคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (%RE) ของสารส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 0.29% - 4.03% ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์ 5% ที่กำหนดไว้ ยกเว้นค่าของ DPPH และ ABTS ที่มีค่าคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์สูงกว่าสารตัวอื่นเล็กน้อย แต่ยังอยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้ในเชิงสถิติ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า แบบจำลองที่ใช้มีความแม่นยำสูงและสามารถใช้เป็นแนวทางในการพยากรณ์ผลลัพธ์ของกระบวนการสกัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม ความคลาดเคลื่อนของค่าที่สูงขึ้นในบางตัวแปร เช่น DPPH และ ABTS อาจเป็นข้อบ่งชี้ถึงความจำเป็นในการปรับปรุงแบบจำลองให้เหมาะสมยิ่งขึ้นในอนาคต เพื่อเพิ่มความแม่นยำของการทำนายสำหรับตัวแปรเหล่านี้

พูน ปณ จิต ชีเว

4.3.2.7 บทสรุปผลการศึกษาการปรับสภาวะการสกัด Optimization Study Plan 2

การศึกษาขั้นตอน Optimization Study Plan 2 ได้ดำเนินการโดยใช้ Central Composite Design (CCD) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการสกัดสารออกฤทธิ์จากเหง้าไพล โดยเน้นการวิเคราะห์ปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการสกัด ได้แก่ ความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทรีน เวลาสกัด พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ และความเข้มข้นของเอทานอล ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัด

จากผลการศึกษา พบว่าพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์และความเข้มข้นของเอทานอลเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลสูงต่อค่าการตอบสนองของกระบวนการสกัด การใช้พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ในระดับที่เหมาะสมสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการสกัดได้โดยไม่ก่อให้เกิดการเสื่อมสลายของสารสำคัญ ในขณะที่การใช้ความเข้มข้นของเอทานอลในช่วงที่เหมาะสมสามารถช่วยเสริมประสิทธิภาพของการสกัดสารออกฤทธิ์ได้อย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม การใช้ค่าปัจจัยที่สูงหรือต่ำเกินไปอาจส่งผลให้ปริมาณสารสำคัญที่สกัดได้ลดลงเนื่องจากกลไกการสลายตัวของสารออกฤทธิ์ภายใต้สภาวะที่ไม่เหมาะสม

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม ปริมาณ Compound D ที่สกัดได้จริงเฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่ 283.812 $\mu\text{g/ml}$ ปริมาณ DMPBD สูงสุดที่ 635.447 $\mu\text{g/ml}$ และปริมาณ Curcuminoid สูงสุดที่ 39.254 $\mu\text{g/ml}$ นอกจากนี้ สารสกัดยังแสดงฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระที่ดี โดยค่าการตอบสนองของ DPPH assay อยู่ที่ 727.806 $\mu\text{M TE}$ ABTS assay ที่ 890.923 $\mu\text{M TE}$ และ FRAP assay ที่ 1042.500 $\mu\text{M TE}$ ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงศักยภาพสูงของสารสกัดในการต้านอนุมูลอิสระ

การวิเคราะห์แบบจำลองเชิงสถิติพบว่าค่า R^2 ซึ่งใช้วัดความสามารถของแบบจำลองในการอธิบายความแปรปรวนของข้อมูล อยู่ในช่วง 0.989334 – 0.991735 บ่งบอกว่าแบบจำลองที่ใช้มีความแม่นยำสูง ในขณะที่ค่า Q^2 ซึ่งสะท้อนถึงความสามารถในการพยากรณ์ อยู่ในช่วง 0.877811 – 0.913996 แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของแบบจำลองในการคาดการณ์ผลลัพธ์ได้อย่างแม่นยำ โดยค่า RSD ซึ่งเป็นค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน อยู่ในช่วง 0.92813 – 37.9113 สะท้อนให้เห็นถึงความแม่นยำของการทดลอง

จากข้อมูลที่ได้รับ สามารถสรุปได้ว่า ค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการสกัดโดยใช้ Ultrasonic-Assisted Extraction (UAE) ใน Optimization Study Plan 2 คือ ค่าความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทรีนที่ 13.69-17.11 mM, เวลาสกัดที่ 29.5-31.7 นาที, กำลังคลื่นอัลตราซาวด์ที่ 270-280 W และความเข้มข้นของเอทานอลที่ 29-30% ภายใต้เงื่อนไขดังกล่าว ค่าการตอบสนองของสารออกฤทธิ์หลักและสารต้านอนุมูลอิสระสามารถเพิ่มขึ้นสู่ค่าที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการควบคุมค่าปัจจัยเหล่านี้ให้อยู่ในช่วงที่กำหนดสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดได้อย่างมีนัยสำคัญ ทั้งใน

ด้านปริมาณสารออกฤทธิ์และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอางและผลิตภัณฑ์เสริมอาหารที่ต้องการสารสกัดที่มีคุณภาพสูง

โดยสรุป การศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการควบคุมค่าพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์และความเข้มข้นของเอทานอลในกระบวนการสกัดสารสำคัญจากเหง้าไพล การกำหนดค่าปัจจัยที่เหมาะสมเป็นสิ่งสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดและเพิ่มความสามารถของสารสกัดในการต้านอนุมูลอิสระ อย่างไรก็ตาม หากค่าปัจจัยถูกตั้งไว้สูงหรือต่ำเกินไป อาจทำให้ปริมาณสารสำคัญที่ได้อาจลดลงแทนที่จะเพิ่มขึ้น ดังนั้น การใช้ Response Surface Methodology (RSM) ถือเป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพในการพัฒนากระบวนการสกัดให้มีประสิทธิภาพสูงสุด และช่วยเพิ่มคุณภาพของสารสกัดที่ได้อย่างเป็นระบบและแม่นยำ



4.3.3 ผลการวิเคราะห์ Optimization study Plan 3

การศึกษาขั้นตอนที่สามของการเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการสกัดสารสำคัญจากเหง้าไพล (Optimization Study Plan 3) ได้รับการออกแบบโดยใช้ Central Composite Design (CCD) เพื่อตรวจสอบผลกระทบของปัจจัยที่มีต่อค่าการตอบสนองและระบุสถานะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการสกัดสารสำคัญ โดยในการศึกษานี้ ได้มุ่งเน้นไปที่การประเมิน ผลของการใช้ Cyclodextrin (HPBCD) ร่วมกับสารเติมแต่ง Tween 80 ต่อกระบวนการสกัด โดยไม่มีการใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลายร่วม

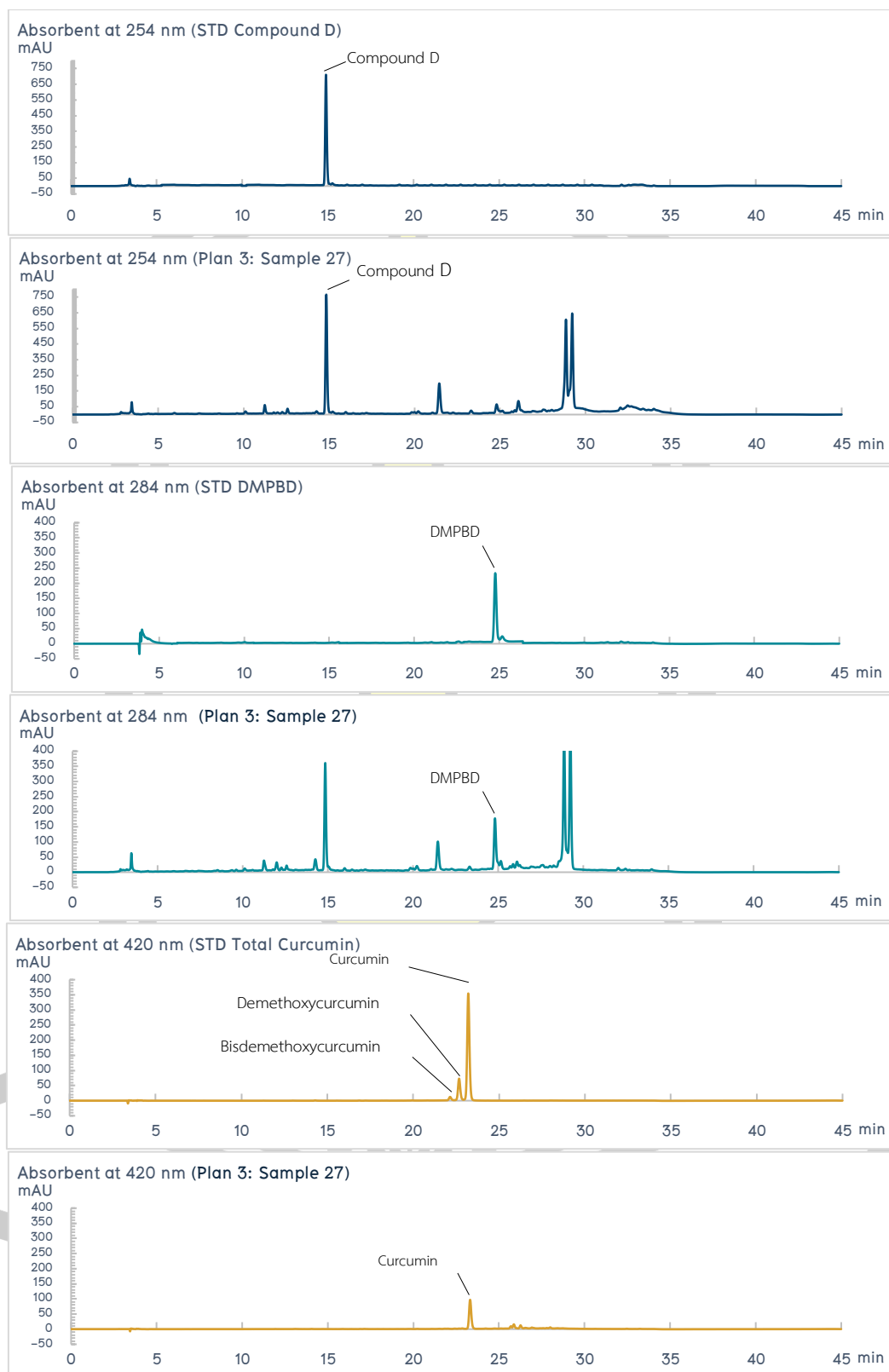
จากผลการศึกษาใน Screening Study พบว่า HPBCD และ Tween 80 เป็นปัจจัยที่มีบทบาทสำคัญในการเพิ่มการละลายของสารสำคัญ ดังนั้น การทดลองใน Plan 3 จึงได้รับการออกแบบมาเพื่อตรวจสอบว่า Tween 80 สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของ Cyclodextrin-Assisted Extraction ได้อย่างไรเมื่อไม่มีตัวทำละลายอินทรีย์เข้ามาเกี่ยวข้อง โดยในการศึกษาน้ำหนักของสมุนไพรรูถูกกำหนดเป็นค่าคงที่ที่ 0.02 mg/mL ซึ่งเป็นปริมาณที่ได้จากผลการวิเคราะห์ใน Screening Study ว่ามีผลต่อประสิทธิภาพการสกัดอย่างมีนัยสำคัญ และเหมาะสมสำหรับการศึกษาต่อในขั้นตอนการเพิ่มประสิทธิภาพ HPBCD ทำหน้าที่ในการสร้าง Inclusion Complex กับสารสำคัญ เช่น Curcumin และอนุพันธ์ของ Curcuminoids ซึ่งช่วยป้องกันการเสื่อมสภาพของสารสำคัญ ขณะที่ Tween 80 ซึ่งเป็น สารลดแรงตึงผิว (Surfactant) มีบทบาทในการช่วยเพิ่มการกระจายตัวของสารสำคัญในสารละลาย ทำให้สามารถกักเก็บและละลายสารออกฤทธิ์ได้ดีขึ้น นอกจากนี้ Tween 80 ยังช่วยปรับปรุงโครงสร้างของระบบตัวทำละลายให้สามารถทำงานร่วมกับ HPBCD ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ส่งผลให้การสกัดสารออกฤทธิ์จากเหง้าไพลเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อให้ได้ข้อมูลที่สามารถนำไปกำหนดสถานะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกระบวนการสกัด ปัจจัยกระบวนการ (Process Factors) ที่ศึกษาในแผนนี้ ได้แก่ X3, X5, X6 และ X8 ซึ่งเป็นตัวแปรที่สามารถปรับแต่งได้และมีผลโดยตรงต่อค่าการตอบสนองที่ใช้ประเมินประสิทธิภาพของการสกัด จากข้อมูลใน ตารางที่ 4.15 พบว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าปัจจัยต่าง ๆ ส่งผลต่อค่าการตอบสนองในรูปแบบที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญในการกำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพของการสกัดในระบบที่ใช้ HPBCD และ Tween 80 ร่วมกันภายใต้ปริมาณสมุนไพรรูที่ 0.02 mg/mL

นอกจากนี้ ภาพที่ 4.55 แสดงโครมาโทแกรมของตัวอย่างสารสกัดจากเหง้าไพลที่ได้รับการวิเคราะห์ด้วย High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงพีคของสารสำคัญที่มีอยู่ในตัวอย่าง โดยพีคของ Curcuminoids และ Phenylbutanoids (Compound D และ DMPBD) มีความคมชัดและไม่เกิดการซ้อนทับกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งบ่งบอกถึงประสิทธิภาพ

ของกระบวนการสกัดในสภาวะที่กำหนด ผลการวิเคราะห์ใน Optimization Study Plan 3 นี้ช่วยให้สามารถเข้าใจอิทธิพลของแต่ละปัจจัยได้ชัดเจนขึ้น และเป็นแนวทางสำคัญในการกำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดในการสกัดสารสำคัญจากเหง้าไพล

ตารางที่ 4.15 แสดงผลการศึกษาการสกัดสารสำคัญจากเหง้าไพลขั้นตอน Optimization study Plan 3 ด้วย Central Composite Design

DESIGN POINT	PROCESS FACTOR				RESPONSE					
	X3 (mM)	X5 (min)	X6 (W)	X8 (%Add)	Y1 ($\mu\text{g/ml}$)	Y2 ($\mu\text{g/ml}$)	Y3 ($\mu\text{g/ml}$)	Y4 (μM)	Y5 (μM)	Y6 (μM)
N1	10 (-1)	20 (-1)	140 (-1)	5 (-1)	250.182	704.620	141.471	299.831	198.377	788.845
N2	30 (1)	20 (-1)	140 (-1)	5 (-1)	257.185	709.735	143.879	375.753	310.457	898.105
N3	10 (-1)	40 (1)	140 (-1)	5 (-1)	254.399	707.585	142.921	321.323	242.564	848.810
N4	30 (1)	40 (1)	140 (-1)	5 (-1)	253.775	704.890	142.659	317.153	236.377	805.550
N5	10 (-1)	20 (-1)	280 (1)	5 (-1)	254.140	704.545	145.126	341.736	257.280	822.955
N6	30 (1)	20 (-1)	280 (1)	5 (-1)	253.810	704.455	142.895	300.376	193.865	800.350
N7	10 (-1)	40 (1)	280 (1)	5 (-1)	253.056	704.820	142.989	329.795	206.371	808.265
N8	30 (1)	40 (1)	280 (1)	5 (-1)	245.413	700.200	140.007	229.399	57.096	681.150
N9	10 (-1)	20 (-1)	140 (-1)	15 (1)	253.711	706.270	141.272	315.572	242.031	818.475
N10	30 (1)	20 (-1)	140 (-1)	15 (1)	256.405	706.330	143.611	365.964	266.736	856.095
N11	10 (-1)	40 (1)	140 (-1)	15 (1)	257.005	708.560	143.464	360.605	332.434	859.225
N12	30 (1)	40 (1)	140 (-1)	15 (1)	253.160	702.010	144.759	310.105	212.383	817.365
N13	10 (-1)	20 (-1)	280 (1)	15 (1)	275.226	716.290	155.673	640.930	754.585	1184.955
N14	30 (1)	20 (-1)	280 (1)	15 (1)	269.695	712.975	153.184	558.605	628.630	1101.105
N15	10 (-1)	40 (1)	280 (1)	15 (1)	273.617	717.470	154.093	603.745	770.530	1152.810
N16	30 (1)	40 (1)	280 (1)	15 (1)	262.178	708.530	150.893	473.440	497.192	947.195
N17	10 (-1)	30 (0)	210 (0)	10 (0)	256.341	712.215	145.178	365.152	325.417	845.615
N18	30 (1)	30 (0)	210 (0)	10 (0)	252.189	709.730	145.192	313.020	239.579	822.275
N19	20 (0)	20 (-1)	210 (0)	10 (0)	257.358	710.545	145.704	377.925	316.174	849.885
N20	20 (0)	40 (1)	210 (0)	10 (0)	255.091	709.610	144.571	336.573	263.019	814.995
N21	20 (0)	30 (0)	140 (-1)	10 (0)	250.806	709.740	142.685	315.666	237.260	818.955
N22	20 (0)	30 (0)	280 (1)	10 (0)	259.499	712.400	148.206	439.802	394.342	899.085
N23	20 (0)	30 (0)	210 (0)	5 (-1)	260.098	709.980	144.881	527.320	467.683	949.215
N24	20 (0)	30 (0)	210 (0)	15 (1)	269.911	714.790	150.021	629.980	679.755	1127.405
N25	20 (0)	30 (0)	210 (0)	10 (0)	258.627	712.835	146.140	414.859	381.834	925.660
N26	20 (0)	30 (0)	210 (0)	10 (0)	259.805	711.555	146.016	453.768	425.211	890.725
N27	20 (0)	30 (0)	210 (0)	10 (0)	257.090	712.340	145.259	426.122	370.645	908.720



ภาพที่ 4.55 โครมาโทแกรมของตัวอย่างสารสกัดจากเหง้าไพลในขั้นตอน Optimization study Plan 3 และสารมาตรฐานวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC

4.3.3.1 การวิเคราะห์ความสอดคล้องของแบบจำลอง (Model Adequacy Check)

ในการศึกษาการปรับสภาวะของกระบวนการสกัดใน Optimization Study Plan 3 ได้มีการตรวจสอบความสอดคล้องของแบบจำลองโดยใช้ตัวชี้วัดทางสถิติที่สำคัญ ได้แก่ ค่า R^2 ซึ่งแสดงถึงความสามารถของแบบจำลองในการอธิบายความแปรปรวนของข้อมูล ค่า Adjusted R^2 ที่ช่วยชดเชยผลของจำนวนตัวแปรในแบบจำลอง ค่า Q^2 ที่ใช้ประเมินประสิทธิภาพในการพยากรณ์ผลลัพธ์ และค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของแบบจำลอง หรือ Residual Standard Deviation (RSD) ซึ่งสะท้อนถึงความแม่นยำของแบบจำลอง นอกจากนี้ ยังมีการวิเคราะห์ Model Validity และ Reproducibility เพื่อประเมินความสามารถของแบบจำลองในการทำนายผลและสร้างความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์ที่ได้

ตารางที่ 4.16 แสดง Model Validation Summary ของขั้นตอน Optimization study Plan 3

Parameters	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6
N	27	27	27	27	27	27
R^2	0.986607	0.990734	0.993724	0.989812	0.989688	0.988375
R^2 Adj.	0.970979	0.979874	0.986402	0.977926	0.977656	0.974812
Q^2	0.907816	0.826038	0.919611	0.835178	0.886731	0.887460
RSD	1.20309	0.603085	0.460710	16.3228	26.7365	19.1555

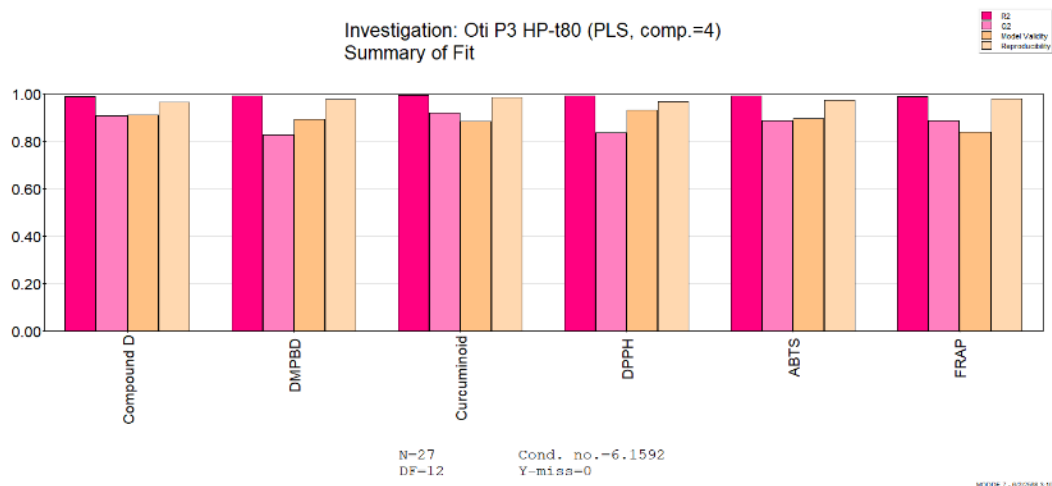
จาก ตารางที่ 4.16 พบว่าค่า R^2 ของแบบจำลองสำหรับค่าการตอบสนอง Y1 ถึง Y6 มีค่าระหว่าง 0.986607 ถึง 0.993724 ซึ่งเป็นค่าที่สูงมาก แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้อย่างดีเยี่ยม โดยเฉพาะค่าการตอบสนอง Curcuminoid content (Y3) ซึ่งมีค่า $R^2 = 0.993724$ ซึ่งหมายความว่าแบบจำลองสามารถอธิบายข้อมูลได้ถึง 99.37% ของความแปรปรวนทั้งหมด ขณะที่ค่าการตอบสนองอื่น ๆ ก็มีค่าใกล้เคียงกัน แสดงถึงความสามารถของแบบจำลองในการอธิบายแนวโน้มของข้อมูลได้อย่างครอบคลุม

สำหรับค่า Adjusted R^2 มีค่าระหว่าง 0.970979 ถึง 0.986402 ซึ่งเป็นค่าที่สูงมากเช่นกัน แสดงถึงความสอดคล้องของแบบจำลองหลังจากมีการปรับปรุงค่าความแปรปรวนของตัวแปรที่ไม่จำเป็น โดยค่าการตอบสนองที่มี Adjusted R^2 สูงสุดคือ Y3 = 0.986402 ตามมาด้วย DMPBD (Y2) และ DPPH (Y4) ซึ่งแสดงถึงเสถียรภาพของแบบจำลองที่ดีเยี่ยมในทุกค่าการตอบสนอง

ในส่วน of ค่า Q^2 ซึ่งใช้ในการประเมินความสามารถของแบบจำลองในการพยากรณ์ข้อมูลใหม่ พบว่ามีค่าระหว่าง 0.826038 ถึง 0.919611 ซึ่งเป็นค่าที่สูงมาก บ่งบอกว่าแบบจำลองสามารถใช้คาดการณ์ค่าผลลัพธ์ได้อย่างแม่นยำ โดยค่าการตอบสนองที่มี Q^2 สูงสุดคือ Curcuminoid (Y3) =

0.919611 แสดงถึงประสิทธิภาพของแบบจำลองในการพยากรณ์ค่าของสารกลุ่ม Curcuminoids ได้ดีมาก ขณะที่ค่าการตอบสนองที่มีค่า Q^2 ต่ำสุดคือ DMPBD ($Y2$) = 0.826038 แม้ว่าจะต่ำกว่าค่าการตอบสนองอื่นเล็กน้อย แต่ก็ยังอยู่ในระดับที่สามารถยอมรับได้และมีความแม่นยำสูง

ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน หรือ RSD มีค่าตั้งแต่ 0.460710 ถึง 26.7365 ซึ่งสะท้อนถึงระดับความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง โดยค่าที่ต่ำสุดคือ Curcuminoid content ($Y3$) = 0.460710 แสดงถึงความแม่นยำในการคาดการณ์ค่าผลลัพธ์ที่ดีเยี่ยม ในขณะที่ค่าการตอบสนองที่มีค่า RSD สูงสุดคือ ABTS ($Y5$) = 26.7365 ซึ่งหมายความว่ามีความแปรปรวนของข้อมูลอยู่ในระดับที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับค่าการตอบสนองอื่น ๆ



ภาพที่ 4.56 กราฟ Summary of Fit แสดงผลค่า R^2 และ Q^2 สำหรับแต่ละตัวแปรของ ขั้นตอน Optimization study Plan 3

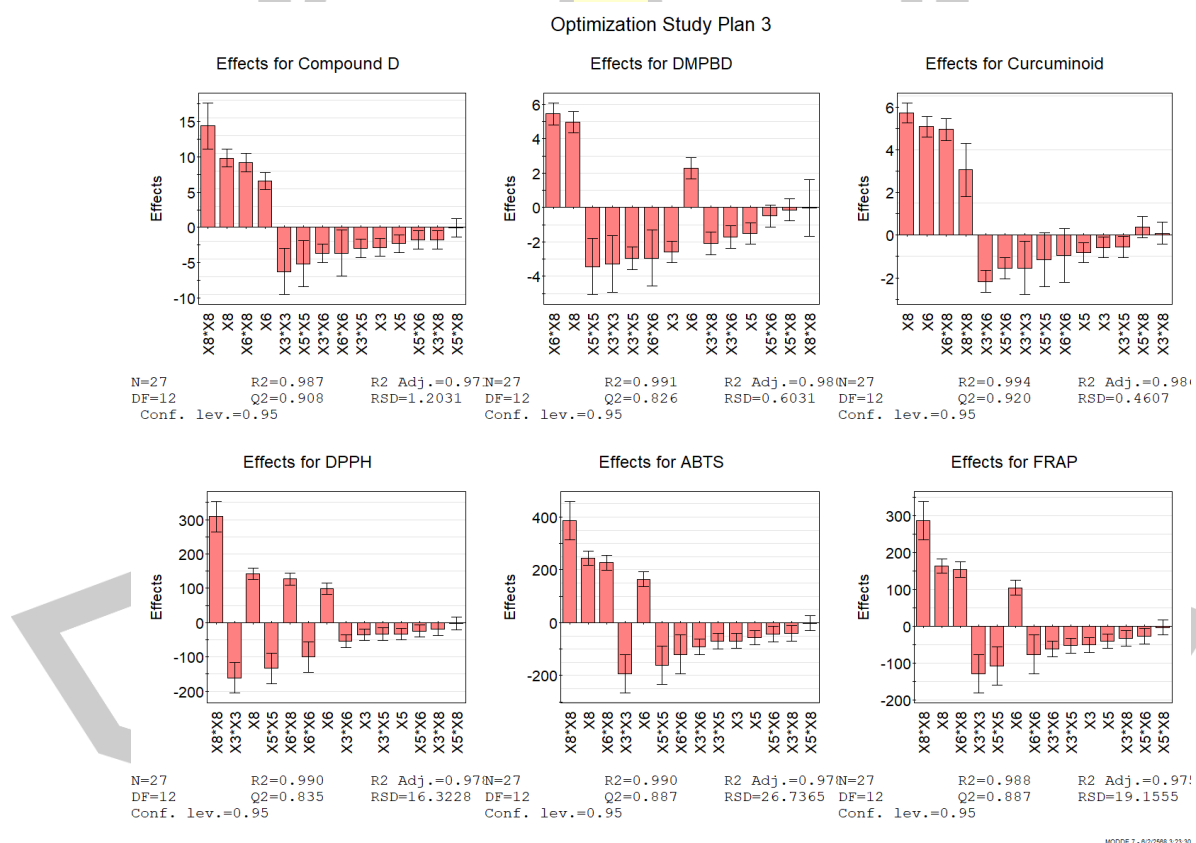
จากภาพที่ 4.56 ซึ่งเป็นกราฟ Summary of Fit แสดงให้เห็นว่า ค่า R^2 และ Q^2 มีความใกล้เคียงกันในทุกค่าการตอบสนอง ซึ่งเป็นตัวชี้วัดที่ดีว่าแบบจำลองมีความแม่นยำและสามารถนำไปใช้พยากรณ์ผลลัพธ์ในอนาคตได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ ค่า Model Validity และ Reproducibility ซึ่งเป็นปัจจัยที่ใช้ประเมินความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง พบว่ามีค่าที่สูงเกินกว่า 0.85 ในทุกค่าการตอบสนอง ซึ่งบ่งบอกถึงคุณภาพของแบบจำลองที่ดีเยี่ยม

ผลการวิเคราะห์ความสอดคล้องของแบบจำลองใน Optimization Study Plan 3 ยืนยันว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพ ค่าทางสถิติที่ใช้ในการประเมินแบบจำลอง เช่น R^2 , Adjusted R^2 , Q^2 , RSD, Model Validity และ Reproducibility ต่างอยู่ในระดับสูง แสดงถึงความสามารถของแบบจำลองในการพยากรณ์ค่าการ

ตอบสนองได้อย่างแม่นยำ และสามารถนำไปใช้กำหนดสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากเหง้าโพลได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

4.3.3.2 การวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัย (Effect Analysis)

การศึกษาผลกระทบของปัจจัยที่มีต่อค่าการตอบสนองใน Optimization Study Plan 3 เป็นขั้นตอนสำคัญที่ช่วยให้เข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและค่าการตอบสนอง โดยการวิเคราะห์นี้สามารถแบ่งออกเป็นสามส่วนหลัก ได้แก่ การวิเคราะห์ผลกระทบหลัก (Main Effects Analysis) ซึ่งช่วยระบุว่าปัจจัยแต่ละตัวส่งผลกระทบโดยตรงต่อค่าการตอบสนองในลักษณะใด การวิเคราะห์ผลกระทบของการปฏิสัมพันธ์ (Interaction Effects Analysis) ซึ่งช่วยแสดงให้เห็นว่าปัจจัยสองตัวมีผลกระทบต่อกันและกันอย่างไร และ การวิเคราะห์ผลกระทบเชิงกำลังสอง (Quadratic Effects Analysis) ซึ่งใช้ในการประเมินลักษณะของผลกระทบแบบโค้งงอของตัวแปรแต่ละตัว (ภาพที่ 4.57)



ภาพที่ 4.57 ผลการวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยต่อค่าการตอบสนองใน Optimization Study Plan 3

การวิเคราะห์ผลกระทบหลัก (Main Effects Analysis) ของ Optimization Study Plan 3

การศึกษานี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์ผลกระทบของตัวแปรหลักที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการสกัดสารออกฤทธิ์จากวัสดุชีวภาพ โดยใช้การออกแบบการทดลองที่สามารถระบุปัจจัยที่มีผลต่อค่าผลลัพธ์ของแต่ละสารสำคัญที่ศึกษา ซึ่งตัวแปรที่ได้รับการพิจารณา ได้แก่ ความเข้มข้นของ HPBCD (X3), เวลาที่ใช้ในการสกัด (X5), พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (X6) และความเข้มข้นของสารเติมแต่ง (X8) โดยการวิเคราะห์ผลกระทบหลักในที่นี้เป็นการพิจารณาผลของปัจจัยแต่ละตัวแปรโดยไม่มีอิทธิพลของปัจจัยอื่น

สำหรับ Compound D พบว่าความเข้มข้นของสารเติมแต่ง (X8) เป็นตัวแปรที่ส่งผลกระทบเชิงบวกอย่างมีนัยสำคัญ โดยค่าผลกระทบ (Effect) อยู่ที่ 9.79355 ซึ่งบ่งบอกว่าการเพิ่มความเข้มข้นของสารเติมแต่งสามารถช่วยเพิ่มปริมาณของ Compound D ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในขณะที่พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (X6) มีค่า Effect เท่ากับ 6.57372 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ช่วยเสริมกระบวนการสกัดให้ดียิ่งขึ้น ในทางกลับกัน ความเข้มข้นของ HPBCD (X3) และเวลาที่ใช้ในการสกัด (X5) มีแนวโน้มลดค่าผลลัพธ์ของ Compound D ซึ่งอาจเป็นผลจากกระบวนการที่ซับซ้อนของการละลายและการกักเก็บสารสำคัญภายในสารละลาย

ในส่วนของ DMPBD พบว่าค่าผลกระทบของพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (X6) และความเข้มข้นของสารเติมแต่ง (X8) ยังคงเป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลเชิงบวกต่อกระบวนการ โดย X8 มีค่า Effect เท่ากับ 4.94304 และ X6 มีค่า Effect เท่ากับ 2.27404 สะท้อนถึงบทบาทของคลื่นอัลตราซาวด์และสารเติมแต่งในการกระตุ้นกระบวนการสกัดให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ในขณะเดียวกัน ความเข้มข้นของ HPBCD (X3) และเวลาที่ใช้ในการสกัด (X5) มีแนวโน้มส่งผลกระทบเชิงลบต่อค่าผลลัพธ์ ซึ่งอาจเกิดจากการที่ความเข้มข้นของ HPBCD ส่งผลต่อความหนืดของสารละลาย ทำให้การสกัดลดประสิทธิภาพลง

สำหรับ Curcuminoid พบว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลเชิงบวกมากที่สุดคือความเข้มข้นของสารเติมแต่ง (X8) โดยมีค่า Effect เท่ากับ 5.72604 รองลงมาคือพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (X6) ซึ่งมีค่า Effect เท่ากับ 5.07764 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์และความเข้มข้นของสารเติมแต่งสามารถช่วยเสริมกระบวนการสกัดสาร Curcuminoid ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ในขณะที่ตัวแปร X3 และ X5 มีผลกระทบเชิงลบต่อค่าผลลัพธ์

เมื่อพิจารณาผลของตัวแปรหลักต่อ DPPH พบว่าค่าผลกระทบของ X8 มีค่าสูงสุดที่ 141.527 ซึ่งสะท้อนถึงบทบาทของสารเติมแต่งในการช่วยเสริมศักยภาพของสารต้านอนุมูลอิสระที่ได้จากการสกัด ในขณะที่ X6 มีค่า Effect เท่ากับ 98.1329 แสดงให้เห็นว่าพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์มีส่วนช่วยในการปลดปล่อยสารที่มีคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระออกจากวัสดุต้นทาง ในขณะที่ค่า

ผลกระทบของ X3 และ X5 มีแนวโน้มลดลง ซึ่งอาจเกิดจากกลไกที่ซับซ้อนของกระบวนการสกัดและปฏิกิริยาของสารต้านอนุมูลอิสระกับปัจจัยเหล่านี้

ในกรณีของ ABTS พบว่าค่าผลกระทบของ X8 มีค่า Effect เท่ากับ 244.15 ซึ่งเป็นค่าผลกระทบที่สูงที่สุด แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของสารเติมแต่งมีบทบาทสำคัญในการเพิ่มศักยภาพของสารต้านอนุมูลอิสระ รองลงมาคือพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (X6) ที่มีค่า Effect เท่ากับ 164.749 ซึ่งบ่งบอกว่าการใช้พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ช่วยเร่งกระบวนการสกัดสารต้านอนุมูลอิสระให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ในทางกลับกัน X3 และ X5 มีค่าผลกระทบเชิงลบต่อ ABTS

สุดท้าย ในการวิเคราะห์ผลกระทบของ FRAP พบว่าความเข้มข้นของสารเติมแต่ง (X8) มีค่าผลกระทบสูงสุดที่ 163.179 ตามมาด้วยพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (X6) ที่มีค่า Effect เท่ากับ 104.781 ซึ่งชี้ให้เห็นว่าทั้งสองปัจจัยนี้เป็นองค์ประกอบหลักที่ช่วยเพิ่มศักยภาพของสารสกัดในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ อย่างไรก็ตาม ค่าผลกระทบของ X3 และ X5 มีแนวโน้มลดลง ซึ่งบ่งชี้ถึงข้อจำกัดของการเพิ่มค่าปัจจัยเหล่านี้เกินระดับที่เหมาะสม

จากการวิเคราะห์ผลกระทบหลักของปัจจัยแต่ละตัว สามารถสรุปได้ว่า ความเข้มข้นของสารเติมแต่ง (X8) และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (X6) เป็นตัวแปรสำคัญที่ช่วยเสริมกระบวนการสกัดให้มีประสิทธิภาพสูงสุด ในขณะที่ความเข้มข้นของ HPBCD (X3) และเวลาที่ใช้ในการสกัด (X5) มีแนวโน้มลดค่าผลลัพธ์ในหลายกรณี ซึ่งชี้ให้เห็นถึงความจำเป็นในการควบคุมค่าปัจจัยเหล่านี้ให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมเพื่อให้ได้สารออกฤทธิ์ที่มีคุณภาพสูงสุด

การวิเคราะห์ผลกระทบของการปฏิสัมพันธ์ (Interaction Effects Analysis) ใน Optimization Study Plan 3

การศึกษานี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์ผลกระทบของการปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่มีต่อประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดสารออกฤทธิ์ โดยพิจารณาถึงผลของการทำงานร่วมกันของตัวแปรที่ศึกษา ซึ่งประกอบไปด้วยความเข้มข้นของ HPBCD (X3), เวลาที่ใช้ในการสกัด (X5), พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (X6) และความเข้มข้นของสารเติมแต่ง (X8)

จากการวิเคราะห์พบว่า การปฏิสัมพันธ์ระหว่างพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (X6) และความเข้มข้นของสารเติมแต่ง (X8) มีผลกระทบเชิงบวกอย่างมีนัยสำคัญต่อปริมาณสารออกฤทธิ์ที่ได้จากกระบวนการสกัดในทุกค่าผลลัพธ์ที่ศึกษา ซึ่งบ่งชี้ว่าการใช้พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ร่วมกับสารเติมแต่งสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในทางกลับกัน การปฏิสัมพันธ์ของความเข้มข้นของ HPBCD (X3) กับพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (X6) และระยะเวลาการสกัด (X5) มีแนวโน้มส่งผลเชิงลบต่อปริมาณสารที่สกัดได้ ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าการปรับระดับของตัวแปรเหล่านี้จำเป็นต้องมีความสมดุลเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่เหมาะสมที่สุด

ในส่วนของ Compound D พบว่าการปฏิสัมพันธ์ระหว่าง X6 และ X8 ช่วยเพิ่มปริมาณสารที่สกัดได้อย่างมีนัยสำคัญ ขณะที่การทำงานร่วมกันของ X3 กับ X6 และ X3 กับ X5 ส่งผลลดลงอย่างชัดเจน สอดคล้องกับแนวโน้มของผลกระทบหลักที่พบว่า X3 และ X5 มีผลลบต่อค่าผลลัพธ์ในหลายกรณี

สำหรับ DMPBD การปฏิสัมพันธ์ระหว่าง X6 และ X8 ยังคงมีผลกระทบเชิงบวกที่โดดเด่น โดยสะท้อนถึงบทบาทของพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ในการเสริมการทำงานของสารเติมแต่ง ในขณะที่การปฏิสัมพันธ์ของ X3 กับ X5 และ X3 กับ X6 ส่งผลลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้ HPBCD และเวลาสกัดที่ไม่เหมาะสมอาจลดประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดได้

ในกรณีของ Curcuminoid พบว่าการปฏิสัมพันธ์ของ X6 และ X8 มีผลเชิงบวกต่อปริมาณสารสำคัญที่ได้จากกระบวนการสกัด ซึ่งอาจเกิดจากพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ที่ช่วยเพิ่มการละลายของสารเป้าหมาย อย่างไรก็ตาม การทำงานร่วมกันของ X3 กับ X6 และ X3 กับ X5 ส่งผลเชิงลบ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้ HPBCD ในระดับสูงร่วมกับพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์หรือเวลาสกัดที่ยาวขึ้น อาจส่งผลต่อความเสถียรของสารที่สกัดได้

เมื่อพิจารณาค่าการต้านอนุมูลอิสระ เช่น DPPH, ABTS และ FRAP พบว่าการปฏิสัมพันธ์ของ X6 และ X8 ส่งผลเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งบ่งบอกว่าการใช้พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ร่วมกับสารเติมแต่งช่วยเพิ่มศักยภาพของสารที่มีคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระ ขณะที่ปฏิสัมพันธ์ของ X3 กับ X6 และ X3 กับ X5 มีแนวโน้มลดค่าผลลัพธ์ลง ซึ่งสอดคล้องกับแนวโน้มของ Compound D, DMPBD และ Curcuminoid

จากการวิเคราะห์ทั้งหมด สามารถสรุปได้ว่าการปฏิสัมพันธ์ระหว่างพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (X6) และความเข้มข้นของสารเติมแต่ง (X8) เป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัด ขณะที่ปฏิสัมพันธ์ของ X3 กับ X6 และ X3 กับ X5 มักส่งผลลดลง การเข้าใจอิทธิพลของปัจจัยเหล่านี้จะช่วยให้สามารถออกแบบกระบวนการสกัดที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้ได้สารออกฤทธิ์ที่มีคุณภาพสูงสุด

การวิเคราะห์ผลกระทบเชิงกำลังสอง (Quadratic Effects Analysis) ใน Optimization Study Plan 3

การศึกษานี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์ผลกระทบเชิงกำลังสองของตัวแปรที่มีต่อประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดสารออกฤทธิ์ โดยพิจารณาผลของตัวแปรที่อยู่ในรูปกำลังสอง ซึ่งแสดงถึงแนวโน้มของปัจจัยที่ไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear effects) ในการเปลี่ยนแปลงผลลัพธ์ของกระบวนการสกัด ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วยความเข้มข้นของ HPBCD (X3), เวลาที่ใช้ในการสกัด (X5), พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (X6) และความเข้มข้นของสารเติมแต่ง (X8)

จากผลการวิเคราะห์ พบว่าตัวแปรที่มีผลกระทบเชิงกำลังสองสูงสุดในหลายค่าผลลัพธ์ ได้แก่ X8X8 ซึ่งบ่งชี้ว่าความเข้มข้นของสารเติมแต่งมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างมีนัยสำคัญต่อปริมาณสารออกฤทธิ์ที่สกัดได้ ขึ้นอยู่กับช่วงค่าที่ใช้ ในทำนองเดียวกัน X6X6 แสดงให้เห็นว่าพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์อาจมีผลต่อกระบวนการสกัดในลักษณะที่อัตราส่วนของพลังงานที่เพิ่มขึ้นไม่ได้ให้ผลลัพธ์ที่เป็นเส้นตรงเสมอไป

สำหรับ Compound D พบว่าผลกระทบของ X8X8 มีค่าผลลัพธ์สูงสุดเมื่ออยู่ในช่วงที่เหมาะสม ในขณะที่ X3X3 และ X5X5 มีผลกระทบเชิงลบ ซึ่งบ่งบอกว่าการเพิ่มความเข้มข้นของ HPBCD หรือระยะเวลาสกัดในระดับสูงเกินไป อาจส่งผลให้ปริมาณของ Compound D ลดลง ซึ่งเป็นผลจากกลไกการละลายของสารออกฤทธิ์ที่ซับซ้อน

ในส่วนของ DMPBD พบว่าผลของ X6X6 และ X8X8 มีความสัมพันธ์กับค่าผลลัพธ์ที่สูงขึ้น ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์และสารเติมแต่งส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัด อย่างไรก็ตาม X5X5 และ X3X3 แสดงผลกระทบเชิงลบ ซึ่งอาจเกิดจากการที่ปัจจัยเหล่านี้มีค่าที่สูงเกินไป ทำให้เกิดผลกระทบเชิงลบต่อคุณภาพของสารที่สกัดได้

ในกรณีของ Curcuminoid พบว่า X8X8 และ X6X6 เป็นตัวแปรที่มีผลกระทบเชิงบวกสูงสุด ขณะที่ X3X3 และ X5X5 มีแนวโน้มลดค่าผลลัพธ์ของสาร Curcuminoid ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณของ HPBCD หรือระยะเวลาสกัดในระดับสูงเกินไปอาจไม่เป็นผลดีต่อกระบวนการสกัด

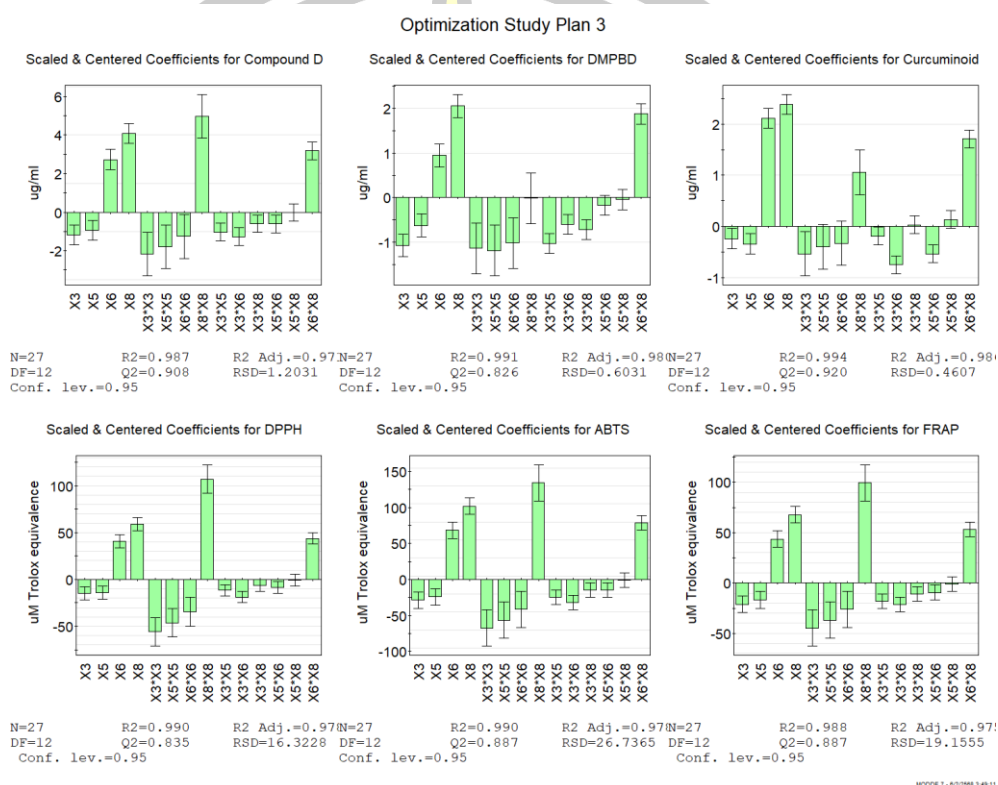
เมื่อพิจารณาค่าการต้านอนุมูลอิสระ เช่น DPPH, ABTS และ FRAP พบว่าผลของ X8X8 และ X6X6 มีแนวโน้มส่งผลเชิงบวกอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าผลลัพธ์ ขณะที่ X3X3 และ X5X5 มีแนวโน้มลดค่าผลลัพธ์ ซึ่งสอดคล้องกับแนวโน้มที่พบในสารออกฤทธิ์อื่น ๆ

โดยสรุป การวิเคราะห์ผลกระทบเชิงกำลังสองชี้ให้เห็นว่าความเข้มข้นของสารเติมแต่ง (X8) และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (X6) มีแนวโน้มส่งผลเชิงบวกต่อกระบวนการสกัดเมื่อใช้ในระดับที่เหมาะสม ขณะที่ความเข้มข้นของ HPBCD (X3) และระยะเวลาสกัด (X5) มีแนวโน้มส่งผลกระทบเชิงลบเมื่อเพิ่มขึ้นเกินขีดจำกัดที่เหมาะสม การเข้าใจผลกระทบเชิงกำลังสองของตัวแปรเหล่านี้จะช่วยให้สามารถออกแบบกระบวนการสกัดที่มีประสิทธิภาพสูงสุดได้

4.3.3.3 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Model Building) ใน Optimization Study Plan 3

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นขั้นตอนสำคัญในการวิเคราะห์ผลลัพธ์ของกระบวนการสกัดสารออกฤทธิ์ โดยอาศัยค่าความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อค่าผลลัพธ์ แบบจำลองนี้สามารถช่วยให้เข้าใจถึงปัจจัยที่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ และใช้เป็นแนวทางในการ

พัฒนาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการสกัด โดยอาศัยตัวแปรหลัก ได้แก่ ความเข้มข้นของ HPBCD (X3), เวลาที่ใช้ในการสกัด (X5), พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (X6) และความเข้มข้นของ สารเติมแต่ง (X8) รวมถึงปัจจัยเชิงปฏิสัมพันธ์และเชิงกำลังสอง (ภาพที่ 4.58)



ภาพที่ 4.58 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของปัจจัยที่มีผลต่อค่าการตอบสนองใน Optimization

Study Plan 3

- การสร้างแบบจำลองสำหรับ Compound D ของ Optimization Study Plan 3

การศึกษาการสกัด Compound D อาศัยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้การถดถอยเชิงพหุ (Multiple Regression Analysis) เพื่อพัฒนาแบบจำลองที่สามารถอธิบายพฤติกรรมของกระบวนการสกัดได้อย่างแม่นยำ นอกจากนี้ยังพิจารณาผลกระทบเชิงกำลังสองและปฏิสัมพันธ์ของปัจจัยเหล่านี้ต่อปริมาณ Compound D ที่สกัดได้

สมการเชิงพหุนามที่ใช้พยากรณ์ค่าการตอบสนองของ Compound D ดังนี้

$$Y1 = 257.995 - 1.17583X3 - 0.950659X5 + 2.73483X6 + 4.07436X8 - 2.16801X3^2 - 1.78608X5^2 - 1.25652X6^2 + 4.97587X8^2 - 1.02396X3X5 - 1.26557X3X6 - 0.596747X3X8 - 0.608637X5X6 - 0.00924897X5X8 + 3.18179X6X8$$

ปัจจัยเชิงเส้นที่มีผลต่อค่าการตอบสนอง พบว่าการเพิ่มสารเติมแต่ง (X8) ช่วยให้ปริมาณ Compound D ที่สกัดได้เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะเมื่ออยู่ในช่วงที่เหมาะสม พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (X6) ก็มีบทบาทสำคัญในการเสริมประสิทธิภาพการสกัด ในขณะที่ความเข้มข้นของ HPBCD (X3) และเวลาสกัด (X5) มีแนวโน้มลดค่าผลลัพธ์หากใช้ในระดับที่สูงเกินไป

ผลกระทบเชิงกำลังสองแสดงให้เห็นว่า เมื่อค่าของ X3, X5 และ X6 สูงเกินกว่าระดับที่เหมาะสม ปริมาณ Compound D จะลดลง ซึ่งอาจเป็นผลจากภาวะอิ่มตัวของสารที่ละลาย หรือการสลายตัวของสารสำคัญที่เกิดขึ้นในกระบวนการสกัด ในทางกลับกัน ค่า $X8^2$ มีผลบวกอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความเข้มข้นของสารเติมแต่งในระดับที่เหมาะสมช่วยเพิ่มปริมาณสารสกัดได้

นอกจากนี้ ปัจจัยปฏิสัมพันธ์ยังมีบทบาทสำคัญ โดยพบว่าการทำงานร่วมกันของพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์และสารเติมแต่ง ($X6X8$) ส่งผลบวกต่อปริมาณ Compound D อย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่การปฏิสัมพันธ์ระหว่าง HPBCD และเวลาสกัด ($X3X5$) และระหว่าง HPBCD และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ ($X3X6$) มีแนวโน้มลดประสิทธิภาพของกระบวนการสกัด

แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นได้รับการประเมินความถูกต้องโดยพิจารณาค่าทางสถิติสำคัญ ค่า R^2 เท่ากับ 0.987 แสดงว่าแบบจำลองสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้ในระดับสูง ค่า Adjusted R^2 เท่ากับ 0.971 แสดงให้เห็นว่าไม่มีปัญหา overfitting และค่า RSD (Root Standard Deviation) เท่ากับ 1.2031 บ่งชี้ว่าแบบจำลองมีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำ และสามารถใช้นำมาทำนายค่าการตอบสนองได้อย่างแม่นยำ นอกจากนี้ ค่า p-value ของ Lack of Fit มีค่ามากกว่า 0.05 แสดงว่าแบบจำลองมีความเหมาะสมและไม่มีปัญหาในการอธิบายข้อมูล

จากผลการศึกษาพบว่า สมการที่พัฒนาขึ้นสามารถทำนายปริมาณ Compound D ที่สกัดได้อย่างแม่นยำ ปัจจัยที่มีอิทธิพลสูงสุดคือสารเติมแต่ง (X8) ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการสกัด ในขณะที่การใช้พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (X6) ในระดับที่เหมาะสมช่วยเพิ่มผลลัพธ์ ส่วนการใช้ HPBCD (X3) และเวลาสกัด (X5) ในระดับที่สูงเกินไปอาจส่งผลให้ปริมาณสารที่สกัดได้ลดลง ความเข้าใจเชิงลึกเกี่ยวกับผลกระทบของปัจจัยเหล่านี้จะช่วยให้สามารถกำหนดสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสกัด Compound D ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

● การสร้างแบบจำลองสำหรับ DMPBD

การศึกษาการสกัด DMPBD อาศัยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้การถดถอยเชิงพหุ (Multiple Regression Analysis) เพื่อพัฒนาแบบจำลองที่สามารถอธิบายพฤติกรรมของ

กระบวนการสกัดได้อย่างแม่นยำ นอกจากนี้ยังพิจารณาผลกระทบเชิงกำลังสองและปฏิสัมพันธ์ของปัจจัยเหล่านี้ต่อปริมาณ DMPBD ที่สกัดได้

สมการเชิงพหุนามที่ใช้พยากรณ์ค่าการตอบสนองของ DMPBD สามารถแสดงได้ดังนี้

$$Y2 = 712.308 - 1.0729X3 - 0.624056X5 + 0.946059X6 + 2.05643X8 - 1.13958X3^2 \\ - 1.18905X5^2 - 1.01642X6^2 - 0.0127482X8^2 - 1.02766X3X5 - 0.600779X3X6 \\ - 0.718681X3X8 - 0.173287X5X6 - 0.0457858X5X8 + 1.88048X6X8$$

ปัจจัยเชิงเส้นที่มีผลต่อค่าการตอบสนอง พบว่าการเพิ่มสารเติมแต่ง (X8) ช่วยให้ปริมาณ DMPBD ที่สกัดได้เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะเมื่ออยู่ในช่วงที่เหมาะสม พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (X6) ก็มีบทบาทสำคัญในการเสริมประสิทธิภาพการสกัด ในขณะที่ความเข้มข้นของ HPBCD (X3) และเวลาสกัด (X5) มีแนวโน้มลดค่าผลลัพธ์หากใช้ในระดับที่สูงเกินไป

ผลกระทบเชิงกำลังสองแสดงให้เห็นว่า เมื่อค่าของ X3, X5 และ X6 สูงเกินกว่าระดับที่เหมาะสม ปริมาณ DMPBD จะลดลง ซึ่งอาจเป็นผลจากภาวะอิ่มตัวของสารที่ละลาย หรือการสลายตัวของสารสำคัญที่เกิดขึ้นในกระบวนการสกัด ในทางกลับกัน ค่า X8² ไม่มีผลกระทบที่ชัดเจน แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความเข้มข้นของสารเติมแต่งเพียงอย่างเดียวอาจไม่ส่งผลกระทบบที่แน่นอนต่อปริมาณ DMPBD ที่สกัดได้

นอกจากนี้ ปัจจัยปฏิสัมพันธ์ยังมีบทบาทสำคัญ โดยพบว่าการทำงานร่วมกันของพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์และสารเติมแต่ง (X6X8) ส่งผลบวกต่อปริมาณ DMPBD อย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่การปฏิสัมพันธ์ระหว่าง HPBCD และเวลาสกัด (X3X5) และระหว่าง HPBCD และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (X3X6) มีแนวโน้มลดประสิทธิภาพของกระบวนการสกัด

แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นได้รับการประเมินความถูกต้องโดยพิจารณาค่าทางสถิติสำคัญ ค่า R² เท่ากับ 0.991 แสดงว่าแบบจำลองสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้ในระดับสูง ค่า Adjusted R² เท่ากับ 0.980 แสดงให้เห็นว่าไม่มีปัญหา overfitting และค่า RSD (Root Standard Deviation) เท่ากับ 0.6031 บ่งชี้ว่าแบบจำลองมีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำ และสามารถใช้นำมาทำนายค่าการตอบสนองได้อย่างแม่นยำ นอกจากนี้ ค่า p-value ของ Lack of Fit มีค่ามากกว่า 0.05 แสดงว่าแบบจำลองมีความเหมาะสมและไม่มีปัญหาในการอธิบายข้อมูล

จากผลการศึกษาพบว่า สมการที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้นำมาทำนายปริมาณ DMPBD ที่สกัดได้อย่างแม่นยำ ปัจจัยที่มีอิทธิพลสูงสุดคือสารเติมแต่ง (X8) ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการสกัด ในขณะที่การใช้พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (X6) ในระดับที่เหมาะสมช่วยเพิ่มผลลัพธ์ ส่วนการใช้ HPBCD (X3) และเวลาสกัด (X5) ในระดับที่สูงเกินไปอาจส่งผลให้ปริมาณสารที่สกัดได้ลดลง ความเข้าใจเชิงลึก

เกี่ยวกับผลกระทบของปัจจัยเหล่านี้จะช่วยให้สามารถกำหนดสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสกัด DMPBD ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

● การสร้างแบบจำลองสำหรับ Curcuminoid

การศึกษาการสกัด Curcuminoid อาศัยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้การถดถอยเชิงพหุ (Multiple Regression Analysis) เพื่อพัฒนาแบบจำลองที่สามารถอธิบายพฤติกรรมของกระบวนการสกัดได้อย่างแม่นยำ นอกจากนี้ยังพิจารณาผลกระทบเชิงกำลังสองและปฏิสัมพันธ์ของปัจจัยเหล่านี้ต่อปริมาณ Curcuminoid ที่สกัดได้

สมการเชิงพหุนามที่ใช้พยากรณ์ค่าการตอบสนองของ Curcuminoid ได้ดังนี้

$$Y_3 = 145.855 - 0.239513X_3 - 0.340185X_5 + 2.11243X_6 + 2.38218X_8 - 0.532585X_3^2 - 0.39878X_5^2 - 0.329974X_6^2 + 1.05628X_8^2 - 0.189677X_3X_5 - 0.749175X_3X_6 + 0.0319051X_3X_8 - 0.537893X_5X_6 + 0.133766X_5X_8 + 1.71071X_6X_8$$

ปัจจัยเชิงเส้นที่มีผลต่อค่าการตอบสนอง พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นของสารเติมแต่ง (X8) และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (X6) ช่วยเพิ่มปริมาณ Curcuminoid ที่สกัดได้เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ความเข้มข้นของ HPBCD (X3) และเวลาสกัด (X5) มีแนวโน้มลดค่าผลลัพธ์หากใช้ในระดับที่สูงเกินไป

ผลกระทบเชิงกำลังสองแสดงให้เห็นว่า เมื่อค่าของ X3, X5 และ X6 สูงเกินกว่าระดับที่เหมาะสม ปริมาณ Curcuminoid จะลดลง ซึ่งอาจเป็นผลจากภาวะอิ่มตัวของสารที่ละลาย หรือการสลายตัวของสารสำคัญที่เกิดขึ้นในกระบวนการสกัด ในทางกลับกัน ค่า X8² มีผลบวกอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความเข้มข้นของสารเติมแต่งในระดับที่เหมาะสมช่วยเพิ่มปริมาณสารสกัดได้

นอกจากนี้ ปัจจัยปฏิสัมพันธ์ยังมีบทบาทสำคัญ โดยพบว่าการทำงานร่วมกันของพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์และสารเติมแต่ง (X6X8) ส่งผลบวกต่อปริมาณ Curcuminoid อย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่การปฏิสัมพันธ์ระหว่าง HPBCD และเวลาสกัด (X3X5) และระหว่าง HPBCD และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (X3X6) มีแนวโน้มลดประสิทธิภาพของกระบวนการสกัด

แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นได้รับการประเมินความถูกต้องโดยพิจารณาค่าทางสถิติสำคัญ ค่า R² เท่ากับ 0.994 แสดงว่าแบบจำลองสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้ในระดับสูง ค่า Adjusted R² เท่ากับ 0.986 แสดงให้เห็นว่าไม่มีปัญหา overfitting และค่า RSD (Root Standard

Deviation) เท่ากับ 0.4607 บ่งชี้ว่าแบบจำลองมีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำ และสามารถใช้นำมาพยากรณ์การตอบสนองได้อย่างแม่นยำ นอกจากนี้ ค่า p-value ของ Lack of Fit มีค่ามากกว่า 0.05 แสดงว่าแบบจำลองมีความเหมาะสมและไม่มีปัญหาในการอธิบายข้อมูล

จากผลการศึกษาพบว่า สมการที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้ทำนายปริมาณ Curcuminoid ที่สกัดได้อย่างแม่นยำ ปัจจัยที่มีอิทธิพลสูงสุดคือสารเติมแต่ง (X8) และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (X6) ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการสกัด ในขณะที่การใช้ HPBCD (X3) และเวลาสกัด (X5) ในระดับที่สูงเกินไปอาจส่งผลให้ปริมาณสารที่สกัดได้ลดลง ความเข้าใจเชิงลึกเกี่ยวกับผลกระทบของปัจจัยเหล่านี้จะช่วยให้สามารถกำหนดสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสกัด Curcuminoid ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

● การสร้างแบบจำลองสำหรับค่าการตอบสนอง DPPH

การศึกษากการสกัด DPPH อาศัยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้การถดถอยเชิงพหุ (Multiple Regression Analysis) เพื่อพัฒนาแบบจำลองที่สามารถอธิบายพฤติกรรมของกระบวนการสกัดได้อย่างแม่นยำ นอกจากนี้ยังพิจารณาผลกระทบเชิงกำลังสองและปฏิสัมพันธ์ของปัจจัยเหล่านี้ต่อค่าการต้านอนุมูลอิสระของ DPPH

สมการเชิงพหุนามที่ใช้พยากรณ์ค่าการตอบสนองของ DPPH สามารถแสดงได้ดังนี้

$$Y_4 = 426.5 - 14.852X_3 - 13.8505X_5 + 40.8257X_6 + 58.8786X_8 - 55.894X_3^2 - 46.1692X_5^2 - 34.6594X_6^2 + 107.069X_8^2 - 11.6259X_3X_5 - 18.7278X_3X_6 - 6.50418X_3X_8 - 8.61494X_5X_6 - 0.903978X_5X_8 + 43.8465X_6X_8$$

ปัจจัยเชิงเส้นที่มีผลต่อค่าการตอบสนอง พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นของสารเติมแต่ง (X8) และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (X6) มีผลช่วยเพิ่มค่าการต้านอนุมูลอิสระของ DPPH อย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ความเข้มข้นของ HPBCD (X3) และเวลาสกัด (X5) มีแนวโน้มลดค่าผลลัพธ์หากใช้ในระดับที่สูงเกินไป

ผลกระทบเชิงกำลังสองแสดงให้เห็นว่า เมื่อค่าของ X3, X5 และ X6 สูงเกินกว่าระดับที่เหมาะสม ค่าการต้านอนุมูลอิสระของ DPPH จะลดลง ซึ่งอาจเป็นผลจากการเสื่อมสภาพของสารออกฤทธิ์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการสกัด ในทางกลับกัน ค่า X8² มีผลบวกอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความเข้มข้นของสารเติมแต่งในระดับที่เหมาะสมช่วยเพิ่มค่าการต้านอนุมูลอิสระได้

นอกจากนี้ ปัจจัยปฏิสัมพันธ์ยังมีบทบาทสำคัญ โดยพบว่าการทำงานร่วมกันของพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์และสารเติมแต่ง (X6X8) ส่งผลบวกต่อค่าการต้านอนุมูลอิสระของ DPPH อย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่การปฏิสัมพันธ์ระหว่าง HPBCD และเวลาสกัด (X3X5) และระหว่าง HPBCD และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (X3X6) มีแนวโน้มลดค่าผลลัพธ์ของ DPPH

แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นได้รับการประเมินความถูกต้องโดยพิจารณาค่าทางสถิติสำคัญ ค่า R^2 เท่ากับ 0.990 แสดงว่าแบบจำลองสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้ในระดับสูง ค่า Adjusted R^2 เท่ากับ 0.978 แสดงให้เห็นว่าไม่มีปัญหา overfitting และค่า RSD (Root Standard Deviation) เท่ากับ 16.3228 บ่งชี้ว่าแบบจำลองมีความคลาดเคลื่อนต่ำ และสามารถใช้ทำนายค่าการตอบสนองได้อย่างแม่นยำ นอกจากนี้ ค่า p-value ของ Lack of Fit มีค่ามากกว่า 0.05 แสดงว่าแบบจำลองมีความเหมาะสมและไม่มีปัญหาในการอธิบายข้อมูล

จากผลการศึกษาพบว่า สมการที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้ทำนายค่าการต้านอนุมูลอิสระของ DPPH ได้อย่างแม่นยำ ปัจจัยที่มีอิทธิพลสูงสุดคือสารเติมแต่ง (X8) และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (X6) ซึ่งช่วยเพิ่มค่าการต้านอนุมูลอิสระของ DPPH ได้อย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่การใช้ HPBCD (X3) และเวลาสกัด (X5) ในระดับที่สูงเกินไปอาจส่งผลให้ค่าการต้านอนุมูลอิสระลดลง ความเข้าใจเชิงลึกเกี่ยวกับผลกระทบของปัจจัยเหล่านี้จะช่วยให้สามารถกำหนดสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเพิ่มค่าการต้านอนุมูลอิสระของ DPPH ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

● การสร้างแบบจำลองสำหรับค่าการตอบสนอง ABTS

การศึกษาการสกัด ABTS อาศัยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้การถดถอยเชิงพหุ (Multiple Regression Analysis) เพื่อพัฒนาแบบจำลองที่สามารถอธิบายพฤติกรรมของกระบวนการสกัดได้อย่างแม่นยำ นอกจากนี้ยังพิจารณาผลกระทบเชิงกำลังสองและปฏิสัมพันธ์ของปัจจัยเหล่านี้ต่อค่าการต้านอนุมูลอิสระของ ABTS

สมการเชิงพหุนามที่ใช้พยากรณ์ค่าการตอบสนองของ ABTS สามารถแสดงได้ดังนี้

$$Y5 = 381.963 - 28.7028X3 - 23.8252X5 + 68.5396X6 + 101.572X8 - 67.4204X3^2 - 56.2828X5^2 - 41.4924X6^2 + 134.227X8^2 - 24.4668X3X5 - 31.713X3X6 - 14.21X3X8 - 14.981X5X6 - 0.570233X5X8 + 78.6169X6X8$$

ปัจจัยเชิงเส้นที่มีผลต่อค่าการตอบสนอง พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นของสารเติมแต่ง (X8) และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (X6) มีผลช่วยเพิ่มค่าการต้านอนุมูลอิสระของ ABTS อย่างมีนัยสำคัญ

ในขณะที่ความเข้มข้นของ HPBCD (X3) และเวลาสกัด (X5) มีแนวโน้มลดค่าผลลัพธ์หากใช้ในระดับที่สูงเกินไป

ผลกระทบเชิงกำลังสองแสดงให้เห็นว่า เมื่อค่าของ X3, X5 และ X6 สูงเกินกว่าระดับที่เหมาะสม ค่าการต้านอนุมูลอิสระของ ABTS จะลดลง ซึ่งอาจเป็นผลจากการเสื่อมสภาพของสารออกฤทธิ์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการสกัด ในทางกลับกัน ค่า X_8^2 มีผลบวกอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความเข้มข้นของสารเติมแต่งในระดับที่เหมาะสมช่วยเพิ่มค่าการต้านอนุมูลอิสระได้

นอกจากนี้ ปัจจัยปฏิสัมพันธ์ยังมีบทบาทสำคัญ โดยพบว่าการทำงานร่วมกันของพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์และสารเติมแต่ง (X_6X_8) ส่งผลบวกต่อค่าการต้านอนุมูลอิสระของ ABTS อย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่การปฏิสัมพันธ์ระหว่าง HPBCD และเวลาสกัด (X_3X_5) และระหว่าง HPBCD และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (X_3X_6) มีแนวโน้มลดค่าผลลัพธ์ของ ABTS

แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นได้รับการประเมินความถูกต้องโดยพิจารณาค่าทางสถิติสำคัญ ค่า R^2 เท่ากับ 0.990 แสดงว่าแบบจำลองสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้ในระดับสูง ค่า Adjusted R^2 เท่ากับ 0.978 แสดงให้เห็นว่าไม่มีปัญหา overfitting และค่า RSD (Root Standard Deviation) เท่ากับ 26.7365 บ่งชี้ว่าแบบจำลองมีความคลาดเคลื่อนต่ำ และสามารถใช้นำมาทำนายค่าการตอบสนองได้อย่างแม่นยำ นอกจากนี้ ค่า p-value ของ Lack of Fit มีค่ามากกว่า 0.05 แสดงว่าแบบจำลองมีความเหมาะสมและไม่มีปัญหาในการอธิบายข้อมูล

จากผลการศึกษาพบว่า สมการที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้ทำนายค่าการต้านอนุมูลอิสระของ ABTS ได้อย่างแม่นยำ ปัจจัยที่มีอิทธิพลสูงสุดคือสารเติมแต่ง (X_8) และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (X_6) ซึ่งช่วยเพิ่มค่าการต้านอนุมูลอิสระของ ABTS ได้อย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่การใช้ HPBCD (X_3) และเวลาสกัด (X_5) ในระดับที่สูงเกินไปอาจส่งผลให้ค่าการต้านอนุมูลอิสระลดลง ความเข้าใจเชิงลึกเกี่ยวกับผลกระทบของปัจจัยเหล่านี้จะช่วยให้สามารถกำหนดสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเพิ่มค่าการต้านอนุมูลอิสระของ ABTS ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

● การสร้างแบบจำลองสำหรับค่าการตอบสนอง FRAP

การศึกษาการสกัด FRAP อาศัยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้การถดถอยเชิงพหุ (Multiple Regression Analysis) เพื่อพัฒนาแบบจำลองที่สามารถอธิบายพฤติกรรมของกระบวนการสกัดได้อย่างแม่นยำ นอกจากนี้ยังพิจารณาผลกระทบเชิงกำลังสองและปฏิสัมพันธ์ของปัจจัยเหล่านี้ต่อค่าการต้านอนุมูลอิสระของ FRAP

สมการเชิงพหุนามที่ใช้พยากรณ์ค่าการตอบสนองของ FRAP สามารถแสดงได้ดังนี้

$$Y_6 = 898.755 - 21.0796X_3 - 16.8191X_5 + 43.5917X_6 + 67.8864X_8 - 44.7401X_3^2 \\ - 37.0152X_5^2 - 26.2448X_6^2 + 99.4389X_8^2 - 18.1434X_3X_5 - 21.1466X_3X_6 - \\ 11.1414X_3X_8 - 9.29845X_5X_6 - 0.946618X_5X_8 + 53.1834X_6X_8$$

ปัจจัยเชิงเส้นที่มีผลต่อค่าการตอบสนอง พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นของสารเติมแต่ง (X8) และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (X6) มีผลช่วยเพิ่มค่าการต้านอนุมูลอิสระของ FRAP อย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ความเข้มข้นของ HPBCD (X3) และเวลาสกัด (X5) มีแนวโน้มลดค่าผลลัพธ์หากใช้ในระดับที่สูงเกินไป

ผลกระทบเชิงกำลังสองแสดงให้เห็นว่า เมื่อค่าของ X3, X5 และ X6 สูงเกินกว่าระดับที่เหมาะสม ค่าการต้านอนุมูลอิสระของ FRAP จะลดลง ซึ่งอาจเป็นผลจากการเสื่อมสภาพของสารออกฤทธิ์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการสกัด ในทางกลับกัน ค่า X8² มีผลบวกอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความเข้มข้นของสารเติมแต่งในระดับที่เหมาะสมช่วยเพิ่มค่าการต้านอนุมูลอิสระได้

นอกจากนี้ ปัจจัยปฏิสัมพันธ์ยังมีบทบาทสำคัญ โดยพบว่าการทำงานร่วมกันของพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์และสารเติมแต่ง (X6X8) ส่งผลบวกต่อค่าการต้านอนุมูลอิสระของ FRAP อย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่การปฏิสัมพันธ์ระหว่าง HPBCD และเวลาสกัด (X3X5) และระหว่าง HPBCD และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (X3X6) มีแนวโน้มลดค่าผลลัพธ์ของ FRAP

แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นได้รับการประเมินความถูกต้องโดยพิจารณาค่าทางสถิติสำคัญ ค่า R² เท่ากับ 0.988 แสดงว่าแบบจำลองสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้ในระดับสูง ค่า Adjusted R² เท่ากับ 0.975 แสดงให้เห็นว่าไม่มีปัญหา overfitting และค่า RSD (Root Standard Deviation) เท่ากับ 19.1555 บ่งชี้ว่าแบบจำลองมีความคลาดเคลื่อนต่ำ และสามารถใช้นำมาทำนายค่าการตอบสนองได้อย่างแม่นยำ นอกจากนี้ ค่า p-value ของ Lack of Fit มีค่ามากกว่า 0.05 แสดงว่าแบบจำลองมีความเหมาะสมและไม่มีปัญหาในการอธิบายข้อมูล

จากผลการศึกษาพบว่า สมการที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้นำมาทำนายค่าการต้านอนุมูลอิสระของ FRAP ได้อย่างแม่นยำ ปัจจัยที่มีอิทธิพลสูงสุดคือสารเติมแต่ง (X8) และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (X6) ซึ่งช่วยเพิ่มค่าการต้านอนุมูลอิสระของ FRAP ได้อย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่การใช้ HPBCD (X3) และเวลาสกัด (X5) ในระดับที่สูงเกินไปอาจส่งผลให้ค่าการต้านอนุมูลอิสระลดลง ความเข้าใจเชิงลึกเกี่ยวกับผลกระทบของปัจจัยเหล่านี้จะช่วยให้สามารถกำหนดสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเพิ่มค่าการต้านอนุมูลอิสระของ FRAP ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

4.3.3.4 การวิเคราะห์ Contour Plot และ Surface Plot ในการศึกษา Optimization Study Plan 3

การวิเคราะห์ Contour Plot และ Surface Plot เป็นขั้นตอนสำคัญที่ใช้เพื่อศึกษาผลกระทบของตัวแปรอิสระที่มีต่อค่าการตอบสนอง โดยเป็นเครื่องมือที่ช่วยให้สามารถมองเห็นแนวโน้มของผลลัพธ์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่าของตัวแปรอิสระได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้น Contour Plot แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าการตอบสนองผ่านเส้นระดับที่เชื่อมโยงค่าที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน ซึ่งช่วยให้สามารถระบุช่วงค่าของปัจจัยที่ให้ผลลัพธ์สูงสุดได้ง่ายขึ้น ในขณะที่ Surface Plot เป็นการนำเสนอข้อมูลในรูปแบบสามมิติ ทำให้สามารถสังเกตโครงสร้างของผลลัพธ์ในเชิงพื้นที่และเข้าใจความสัมพันธ์เชิงเส้นและไม่เชิงเส้นของตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าการตอบสนองได้ดียิ่งขึ้น สำหรับ Optimization Study Plan 3 ปัจจัยอิสระที่ถูกนำมาวิเคราะห์ ในการวิเคราะห์นี้จะทำการประเมินแนวโน้มของค่าการตอบสนองโดยใช้ Contour Plot และ Surface Plot เพื่อทำความเข้าใจถึงอิทธิพลของแต่ละปัจจัย รวมไปถึงการศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเพื่อให้สามารถระบุช่วงค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกระบวนการสกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในการศึกษานี้

ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทริน (Conc. HPBCD) และเวลาสกัด (Time) ต่อค่าการตอบสนองใน Optimization Study Plan 3

การศึกษานี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์ผลกระทบของความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทริน (Conc. HPBCD) และระยะเวลาสกัด (Time) ต่อค่าการตอบสนองของสารสำคัญที่ได้จากกระบวนการสกัด โดยใช้การแสดงผลผ่าน Contour Plot และ Surface Plot ซึ่งช่วยให้สามารถมองเห็นแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงค่าการตอบสนองภายใต้เงื่อนไขที่แตกต่างกันของตัวแปรทั้งสอง

ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าในช่วงที่มีค่าการตอบสนองสูงสุด ซึ่งระบุโดยโซนสีแดงในแผนภาพ (ภาพที่ 4.59) สามารถกำหนดขอบเขตที่เหมาะสมของ Conc. HPBCD และระยะเวลาสกัดเพื่อให้ได้ค่าการตอบสนองสูงสุดของแต่ละสารได้อย่างชัดเจน สำหรับ Compound D ค่าการตอบสนองสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 277.2 $\mu\text{g/mL}$ ซึ่งพบได้ในช่วงความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทรินระหว่าง 7 ถึง 21 mM และระยะเวลาสกัดระหว่าง 20 ถึง 34 นาที การเพิ่มปริมาณไฮโคลเด็กซ์ทรินและระยะเวลาสกัดในช่วงดังกล่าวช่วยให้สารออกฤทธิ์สกัดออกมาได้มากขึ้น อย่างไรก็ตาม หากเกินกว่าช่วงที่เหมาะสม ค่าการตอบสนองจะลดลง

สำหรับ DMPBD ค่าการตอบสนองสูงสุดอยู่ที่ 778.41 $\mu\text{g/mL}$ โดยพบในช่วง Conc. HPBCD 3-16 mM และระยะเวลาสกัด 26-38 นาที ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณไฮโคลเด็กซ์ทรินที่ต่ำกว่าสามารถส่งเสริมค่าการตอบสนองได้ดี แต่การเพิ่มเวลาสกัดเกินช่วงดังกล่าวอาจไม่ให้ผลดีเพิ่มเติม สำหรับ Curcuminoid ค่าการตอบสนองสูงสุดอยู่ที่ 155.66 $\mu\text{g/mL}$ พบในช่วง Conc. HPBCD 7-18

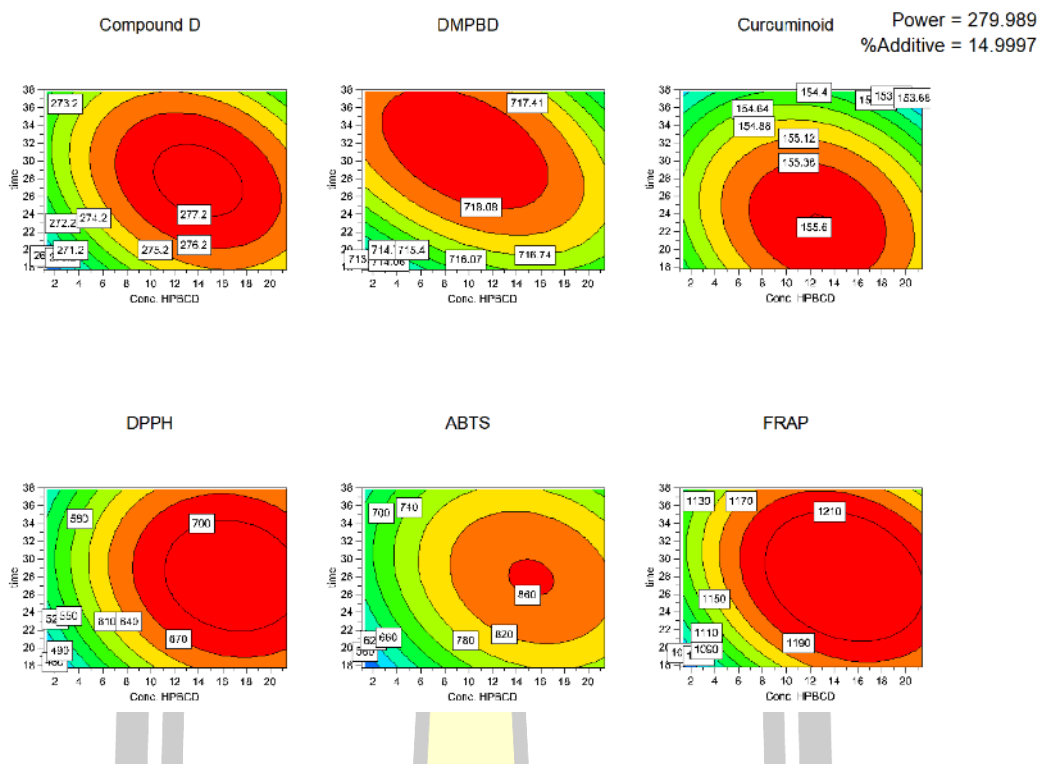
mM และระยะเวลาสกัด 16-30 นาที ซึ่งยืนยันว่าทั้งปัจจัยด้านปริมาณไซโคลเด็กซ์ทรินและเวลาสกัด มีบทบาทสำคัญต่อกระบวนการสกัดสารสำคัญนี้ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง หากระยะเวลาสกัดสั้นเกินไป จะส่งผลให้ค่าการตอบสนองไม่ถึงระดับที่ต้องการ

ในแง่ของฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ พบว่าค่าการตอบสนองของ DPPH สูงสุดที่ 700 μM TE ซึ่งอยู่ในช่วง Conc. HPBCD 9-23 mM และระยะเวลาสกัด 21-38 นาที การเพิ่มระยะเวลาสกัดมีแนวโน้มช่วยเสริมค่าการตอบสนองได้อย่างมีนัยสำคัญภายในช่วงที่กำหนด สำหรับ ABTS ค่าการตอบสนองสูงสุดอยู่ที่ 850 μM TE ซึ่งพบได้ในช่วง Conc. HPBCD 14-18 mM และระยะเวลาสกัด 26-30 นาที ความเข้มข้นของไซโคลเด็กซ์ทรินที่เกิน 18 mM ไม่ได้ส่งผลให้ค่าการตอบสนองดีขึ้น ขณะที่การลดระยะเวลาสกัดต่ำกว่าช่วงที่เหมาะสมอาจส่งผลให้ค่าการตอบสนองลดลง สำหรับ FRAP ค่าการตอบสนองสูงสุดอยู่ที่ 1290 μM TE ในช่วง Conc. HPBCD 6-23 mM และระยะเวลาสกัด 18-38 นาที แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของไซโคลเด็กซ์ทรินช่วยเสริมฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสำคัญ อย่างไรก็ตาม เมื่อถึงระดับความเข้มข้นที่เหมาะสม ค่าการตอบสนองจะเริ่มคงที่และไม่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง

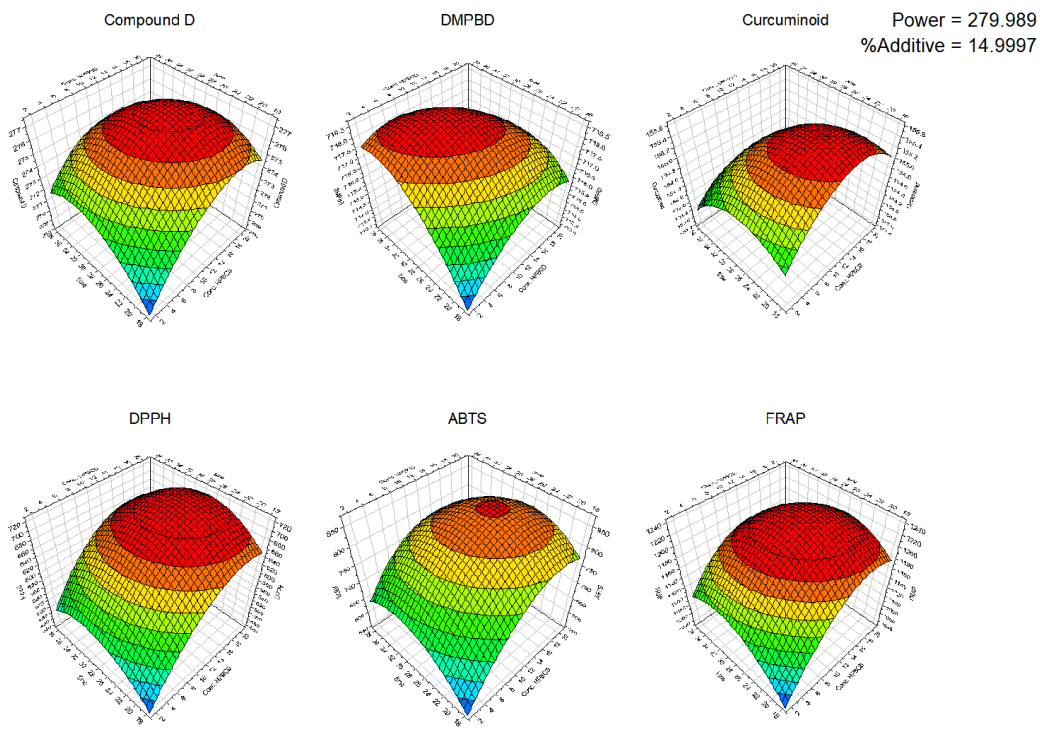
จากข้อมูลที่ได้ สามารถสรุปได้ว่าปัจจัย Conc. HPBCD และระยะเวลาสกัดมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าการตอบสนองของสารสำคัญที่สกัดได้ การกำหนดช่วงที่เหมาะสมจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการเลือกเงื่อนไขที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดของกระบวนการสกัด ทั้งนี้ ค่าการตอบสนองของสารแต่ละชนิดมีจุดอิ่มตัวที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญที่สามารถนำไปใช้เพื่อพัฒนาและปรับปรุงกระบวนการสกัดให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นต่อไป



(A) Contour Plot of Optimization Study Plan 3



(B) Response Surface Plot of Optimization Study Plan 3



ภาพที่ 4.59 Contour Plot และ Surface Plot ความสัมพันธ์ระหว่าง Conc. HPBCD และ Time ในการศึกษา Optimization Study Plan 3

ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทริน (Conc. HPBCD) และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (Power) ต่อค่าการตอบสนองใน Optimization Study Plan 3

การศึกษานี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์ผลกระทบของความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทริน (mM) และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ต่อค่าการตอบสนองของสารสำคัญ โดยใช้ Contour Plot และ Surface Plot เป็นเครื่องมือหลักในการตรวจสอบแนวโน้มของค่าการตอบสนองภายใต้เงื่อนไขที่แตกต่างกัน (ภาพที่ 4.60) ผลลัพธ์จากการศึกษาชี้ให้เห็นถึงขอบเขตที่เหมาะสมของตัวแปรทั้งสอง ซึ่งส่งผลต่อการสกัดสารออกฤทธิ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จากผลการวิเคราะห์ พบว่าโซนสีแดง ซึ่งบ่งบอกถึงช่วงค่าการตอบสนองสูงสุด สามารถกำหนดขอบเขตที่เหมาะสมของ Conc. HPBCD (mM) และ Power สำหรับค่าการตอบสนองแต่ละตัวได้อย่างชัดเจน โดยสำหรับ Compound D ค่าการตอบสนองสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 279.2 $\mu\text{g/mL}$ เมื่อความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทรินอยู่ในช่วง 3-18 mM และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์มากกว่า 310 W ขึ้นไป ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า การเพิ่มระดับพลังงานอัลตราซาวด์สามารถช่วยกระตุ้นการปลดปล่อยสารสำคัญจากเมทริกซ์ชีวภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในกรณีของ DMPBD ค่าการตอบสนองสูงสุดอยู่ที่ 718.08 $\mu\text{g/mL}$ ซึ่งพบในช่วงความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทริน 3-16 mM และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ที่ 280-350 W การเพิ่มขึ้นของพลังงานอัลตราซาวด์มีแนวโน้มที่จะส่งผลให้ค่าการตอบสนองเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องภายในช่วงที่เหมาะสม ขณะที่ Curcuminoid มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 162.1 $\mu\text{g/mL}$ เมื่อ Conc. HPBCD อยู่ในช่วง 1-18 mM และ Power มากกว่า 320 W ขึ้นไป แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทรินในระดับต่ำยังสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดได้เมื่อใช้พลังงานอัลตราซาวด์ที่เหมาะสม

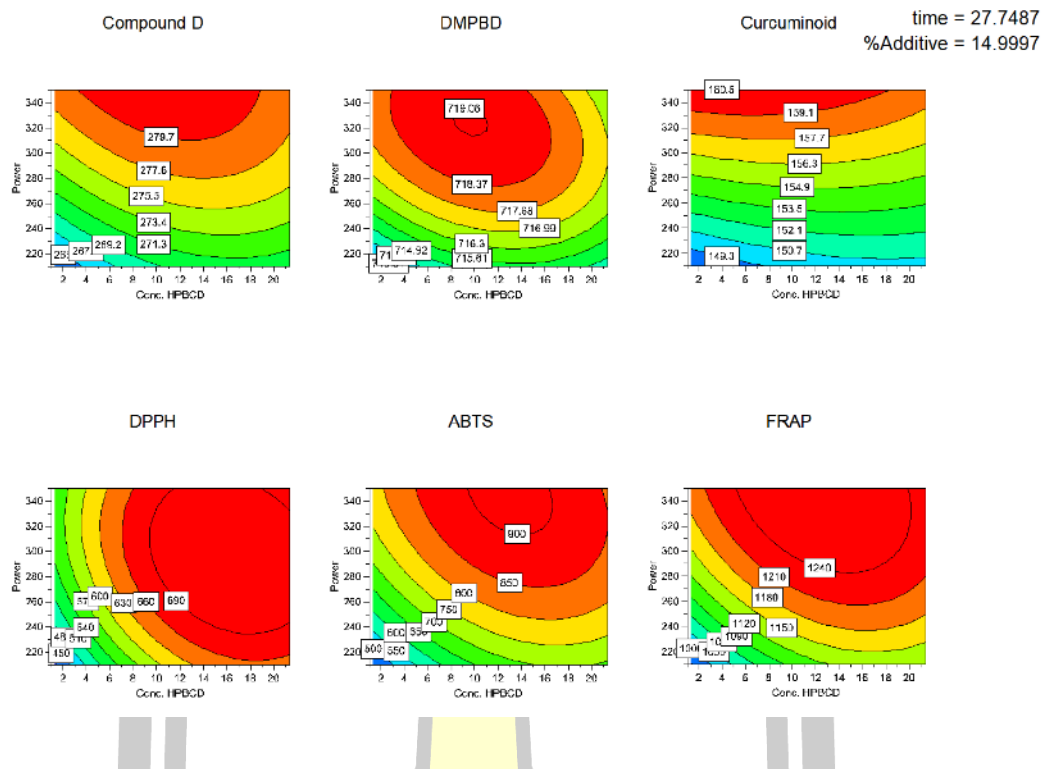
ในด้านของฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ค่าการตอบสนองของ DPPH สูงสุดอยู่ที่ 800 $\mu\text{M TE}$ ซึ่งพบในช่วง Conc. HPBCD 8-22 mM และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ 210-350 W ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของพลังงานอัลตราซาวด์ภายในช่วงดังกล่าวช่วยส่งเสริมค่าการตอบสนองได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในขณะที่ ABTS มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 900 $\mu\text{M TE}$ เมื่อ Conc. HPBCD อยู่ระหว่าง 4-20 mM และ Power ที่ 280-350 W ซึ่งบ่งบอกว่าทั้งสองปัจจัยมีบทบาทสำคัญต่อการเพิ่มค่าการตอบสนองเมื่ออยู่ในช่วงที่เหมาะสม สำหรับ FRAP ค่าการตอบสนองสูงสุดอยู่ที่ 1240 $\mu\text{M TE}$ โดยพบในช่วง Conc. HPBCD 6-18 mM และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์มากกว่า 260 W ขึ้นไป ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ที่สูงขึ้นมีบทบาทสำคัญในการเพิ่มค่าการตอบสนองของสารต้านอนุมูลอิสระ

ผลลัพธ์จากการศึกษานี้เน้นให้เห็นถึงอิทธิพลของ Conc. HPBCD (mM) และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ต่อค่าการตอบสนองของสารสำคัญในกระบวนการสกัด อย่างไรก็ตาม ผลกระทบของปัจจัยทั้งสองไม่ได้มีอัตราส่วนที่เท่ากันในทุกกรณี โดยพบว่าพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์มีบทบาท

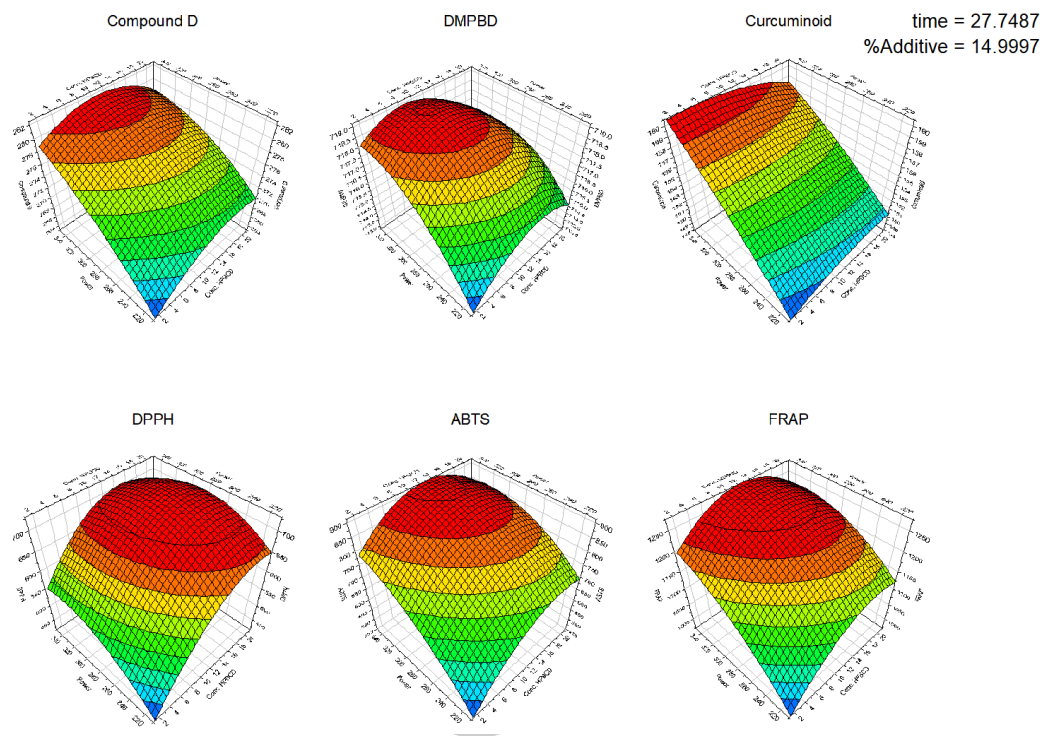
สำคัญมากกว่าความเข้มข้นของไฮโดรเด็คซ์ทรินในบางกรณี เช่น ในการสกัด DPPH และ FRAP ซึ่งค่าการตอบสนองเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเพิ่ม Power ขณะที่ Conc. HPBCD มีผลต่อเนื่องแต่ไม่เด่นชัดเท่า ในทางกลับกัน สำหรับ Curcuminoid และ ABTS พบว่าทั้งสองปัจจัยมีอิทธิพลใกล้เคียงกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงที่พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์อยู่ในระดับสูง ความเข้มข้นของไฮโดรเด็คซ์ทรินจึงกลายเป็นตัวแปรที่มีบทบาทสำคัญมากขึ้นในการกำหนดประสิทธิภาพของการสกัด การทำความเข้าใจถึงอิทธิพลที่แตกต่างกันของ Conc. HPBCD (mM) และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการปรับแต่งสภาวะการสกัดที่เหมาะสมที่สุดสำหรับสารเป้าหมายในแต่ละประเภทได้อย่างแม่นยำ ซึ่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดในระดับอุตสาหกรรมต่อไป



(A) Contour Plot of Optimization Study Plan 3



(B) Response Surface Plot of Optimization Study Plan 3



ภาพที่ 4.60 Contour Plot และ Surface Plot ความสัมพันธ์ระหว่าง Conc. HPBCD และ Power ในการศึกษา Optimization Study Plan 3

ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทรีน (Conc. HPBCD) และความเข้มข้นของสารเติมแต่ง (%Additive) ต่อค่าการตอบสนองใน Optimization Study Plan 3

การศึกษานี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์ผลกระทบของไฮโคลเด็กซ์ทรีน (Conc. HPBCD, mM) และสารเติมแต่ง (%Additive) ต่อค่าการตอบสนองของสารสำคัญ โดยใช้ Contour Plot และ Surface Plot เป็นเครื่องมือหลักในการประเมินแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงค่าการตอบสนองภายใต้สภาวะที่แตกต่างกัน (ภาพที่ 4.61) ผลลัพธ์จากการศึกษาชี้ให้เห็นว่าการปรับความเข้มข้นของตัวแปรทั้งสองสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดได้อย่างมีนัยสำคัญ

จากผลการวิเคราะห์ พบว่าช่วงค่าที่เหมาะสมของ Conc. HPBCD (mM) และ %Additive ส่งผลต่อค่าการตอบสนองในแต่ละสาร โดยสำหรับ Compound D ค่าการตอบสนองสูงสุดอยู่ที่ 203.2 $\mu\text{g/mL}$ ในช่วง Conc. HPBCD 2-22 mM และ %Additive มากกว่า 20% ขึ้นไป ซึ่งบ่งชี้ว่าสารเติมแต่งมีบทบาทสำคัญในการส่งเสริมประสิทธิภาพการสกัด ในกรณีของ DMPBD ค่าการตอบสนองสูงสุดอยู่ที่ 724 $\mu\text{g/mL}$ ในช่วง Conc. HPBCD 2-22 mM และ %Additive มากกว่า 20% ขึ้นไป แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มสารเติมแต่งสามารถช่วยเพิ่มค่าการตอบสนองได้อย่างมีนัยสำคัญ ขณะที่ Curcuminoid มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 162.1 $\mu\text{g/mL}$ ในช่วง Conc. HPBCD 2-22 mM และ %Additive มากกว่า 20% ขึ้นไป สะท้อนให้เห็นว่าทั้งสองปัจจัยมีบทบาทร่วมกันในการเพิ่มปริมาณสารสกัด

สำหรับฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ค่าการตอบสนองของ DPPH สูงสุดอยู่ที่ 1,000 $\mu\text{M TE}$ ซึ่งพบในช่วง Conc. HPBCD 2-22 mM และ %Additive มากกว่า 20% ขึ้นไป ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าสารเติมแต่งอาจช่วยเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาด้านอนุมูลอิสระได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่วน ABTS มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 1400 $\mu\text{M TE}$ ภายใต้สภาวะเดียวกัน สะท้อนถึงอิทธิพลที่สำคัญของ %Additive ในการกระตุ้นปฏิกิริยาด้านอนุมูลอิสระ สำหรับ FRAP ซึ่งมีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 1700 $\mu\text{M TE}$ ในช่วง Conc. HPBCD 2-22 mM และ %Additive มากกว่า 20% แสดงให้เห็นว่าการใช้สารเติมแต่งที่เหมาะสมช่วยเสริมฤทธิ์ของสารต้านอนุมูลอิสระได้ดีขึ้น

ไฮโคลเด็กซ์ทรีนมีบทบาทสำคัญในฐานะสารช่วยละลาย (solubilizer) โดยสามารถสร้าง inclusion complex กับสารออกฤทธิ์บางชนิด ทำให้เพิ่มการละลายของสารเป้าหมายในน้ำได้ดีขึ้น จากผลการทดลองพบว่า ความเข้มข้นของ Conc. HPBCD (mM) มีอิทธิพลต่อการสกัด Curcuminoid, Compound D และ DMPBD มากกว่ากลุ่มสารต้านอนุมูลอิสระ เช่น DPPH และ FRAP ซึ่งอาจเป็นเพราะไฮโคลเด็กซ์ทรีนช่วยเพิ่มความสามารถในการละลายของสารที่ไม่ชอบน้ำมากกว่าการส่งเสริมปฏิกิริยาด้านอนุมูลอิสระโดยตรง

สารเติมแต่งที่ใช้ในกระบวนการสกัดมีผลสำคัญต่อค่าการตอบสนอง โดยเฉพาะในกลุ่มสารต้านอนุมูลอิสระ เช่น DPPH, ABTS และ FRAP ซึ่งค่าการตอบสนองเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อมีการเพิ่ม

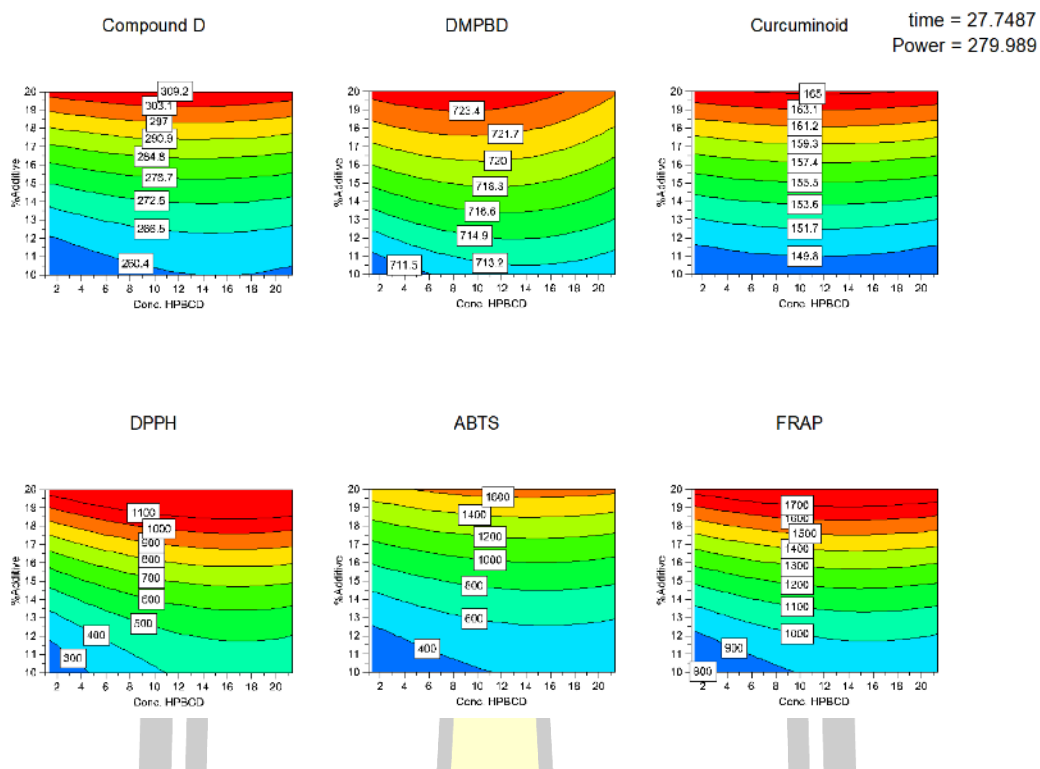
%Additive เนื่องจากสารเติมแต่งอาจทำหน้าที่เป็นโคโซลเวนต์ (co-solvent) ที่ช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาเคมีของสารต้านอนุมูลอิสระ หรือช่วยเพิ่มการละลายและการปลดปล่อยสารออกฤทธิ์จากเมทริกซ์ชีวภาพ

จากผลการศึกษาพบว่า %Additive มีผลต่อค่าการตอบสนองมากกว่า Conc. HPBCD (mM) ในกลุ่มสารต้านอนุมูลอิสระ เช่น DPPH และ FRAP ซึ่งค่าการตอบสนองสูงสุดเกิดขึ้นเมื่อ %Additive มากกว่า 20% แสดงให้เห็นว่าสารเติมแต่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดได้อย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม สำหรับ Curcuminoid และ Compound D พบว่าทั้งสองปัจจัยมีผลต่อการตอบสนองใกล้เคียงกัน โดยเฉพาะในช่วงที่ %Additive อยู่ในระดับสูง Conc. HPBCD (mM) จะเป็นตัวช่วยหลักในการเพิ่มความสามารถในการละลายของสารสำคัญ

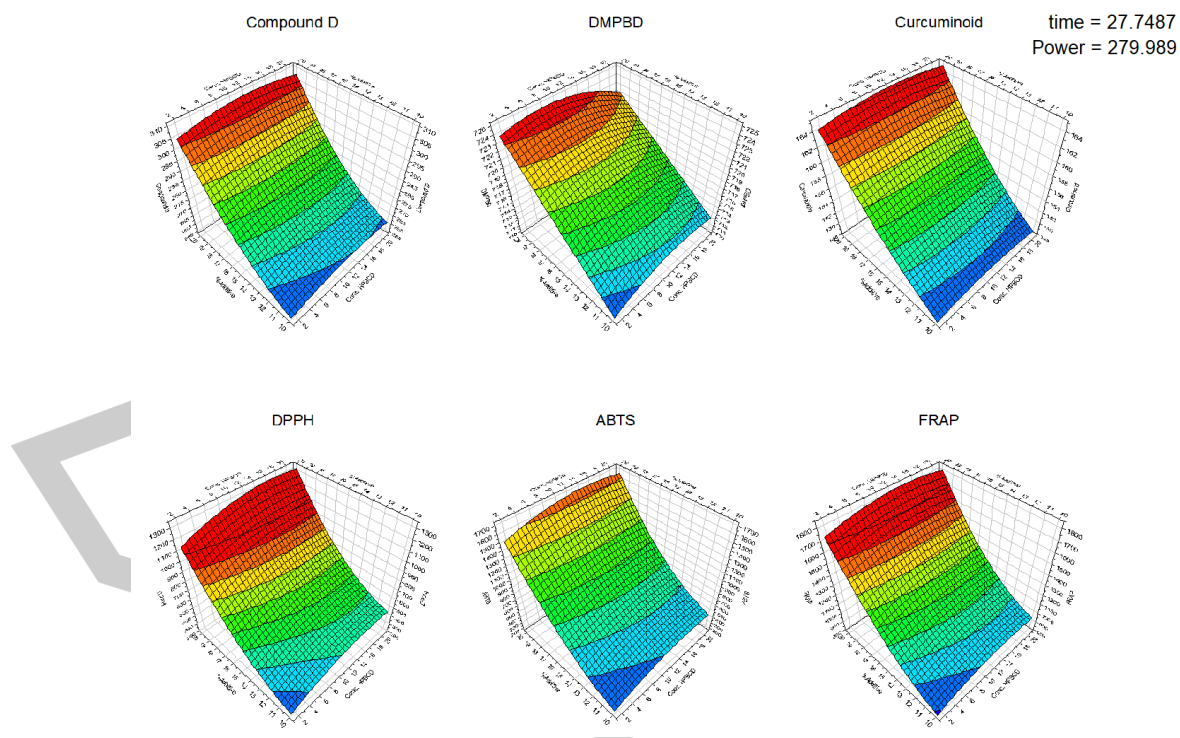
ผลการศึกษาชิ้นนี้ยืนยันว่า Conc. HPBCD (mM) และ %Additive เป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดค่าการตอบสนองของสารสำคัญในการสกัด การเลือกใช้ปัจจัยเหล่านี้อย่างเหมาะสมจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดให้ได้ปริมาณสารที่ต้องการมากขึ้น ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการปรับแต่งกระบวนการสกัดในระดับอุตสาหกรรมให้มีประสิทธิภาพสูงสุดและเพิ่มความคุ้มค่าในการผลิต



(A) Contour Plot of Optimization Study Plan 3



(B) Response Surface Plot of Optimization Study Plan 3



ภาพที่ 4.61 Contour Plot และ Surface Plot ความสัมพันธ์ระหว่าง Conc. HPBCD และ %Additive ในการศึกษา Optimization Study Plan 3

ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาสกัด (Time) และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (Power) ต่อค่าการตอบสนองใน Optimization Study Plan 3

การศึกษานี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์ผลกระทบของเวลาสกัดและพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ต่อค่าการตอบสนองของสารสำคัญ โดยใช้ Contour Plot และ Surface Plot เป็นเครื่องมือหลักในการตรวจสอบแนวโน้มของค่าการตอบสนองภายใต้สภาวะที่แตกต่างกัน (ภาพที่ 4.62) ผลลัพธ์จากการศึกษาชี้ให้เห็นว่าทั้งสองปัจจัยมีอิทธิพลต่อค่าการตอบสนองอย่างชัดเจน และสามารถกำหนดช่วงที่เหมาะสมของตัวแปรแต่ละตัวเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดได้

จากการวิเคราะห์ พบว่าโซนสีแดงเป็นช่วงที่ให้ค่าการตอบสนองสูงสุด ซึ่งสามารถกำหนดขอบเขตที่เหมาะสมของเวลาสกัดและพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์สำหรับสารแต่ละชนิดได้อย่างชัดเจน สำหรับ Compound D ค่าการตอบสนองสูงสุดอยู่ที่ 280.1 $\mu\text{g/mL}$ เกิดขึ้นในช่วงเวลาสกัด 19-34 นาที และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ที่ 320 W ขึ้นไป ซึ่งบ่งชี้ว่าพลังงานสูงเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยกระตุ้นการสกัดสารเป้าหมายได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในกรณีของ DMPBD พบว่าค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 719.14 $\mu\text{g/mL}$ เกิดขึ้นเมื่อเวลาสกัดอยู่ระหว่าง 24-35 นาที และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์อยู่ในช่วง 260-350 W การเพิ่มพลังงานอัลตราซาวด์ในช่วงดังกล่าวสามารถช่วยเพิ่มค่าการตอบสนองได้อย่างมีนัยสำคัญ

สำหรับ Curcuminoid ค่าการตอบสนองสูงสุดอยู่ที่ 160.7 $\mu\text{g/mL}$ พบในช่วงเวลาสกัด 18-32 นาที และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ที่ 330 W ขึ้นไป แสดงให้เห็นว่าพลังงานที่สูงกว่าระดับหนึ่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดได้อย่างเด่นชัด

ในขณะที่ค่าการตอบสนองของสารต้านอนุมูลอิสระ เช่น DPPH มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 700 $\mu\text{M TE}$ โดยมีช่วงเวลาสกัดที่เหมาะสมอยู่ที่ 24-34 นาที และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ในช่วง 250-350 W สะท้อนให้เห็นว่าทั้งระยะเวลาสกัดและพลังงานอัลตราซาวด์เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อค่าการตอบสนองของสารกลุ่มนี้

ABTS ซึ่งเป็นอีกหนึ่งตัวชี้วัดของฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ พบว่าค่าการตอบสนองสูงสุดอยู่ที่ 870 $\mu\text{M TE}$ ในช่วงเวลาสกัด 22-34 นาที และต้องใช้พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ตั้งแต่ 290 W ขึ้นไป ในขณะที่ FRAP มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 1270 $\mu\text{M TE}$ ในช่วงเวลาสกัด 26-30 นาที และต้องใช้พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ 330 W ขึ้นไป แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มพลังงานอัลตราซาวด์ในระดับที่เหมาะสมสามารถช่วยเพิ่มค่าการตอบสนองของสารกลุ่มนี้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

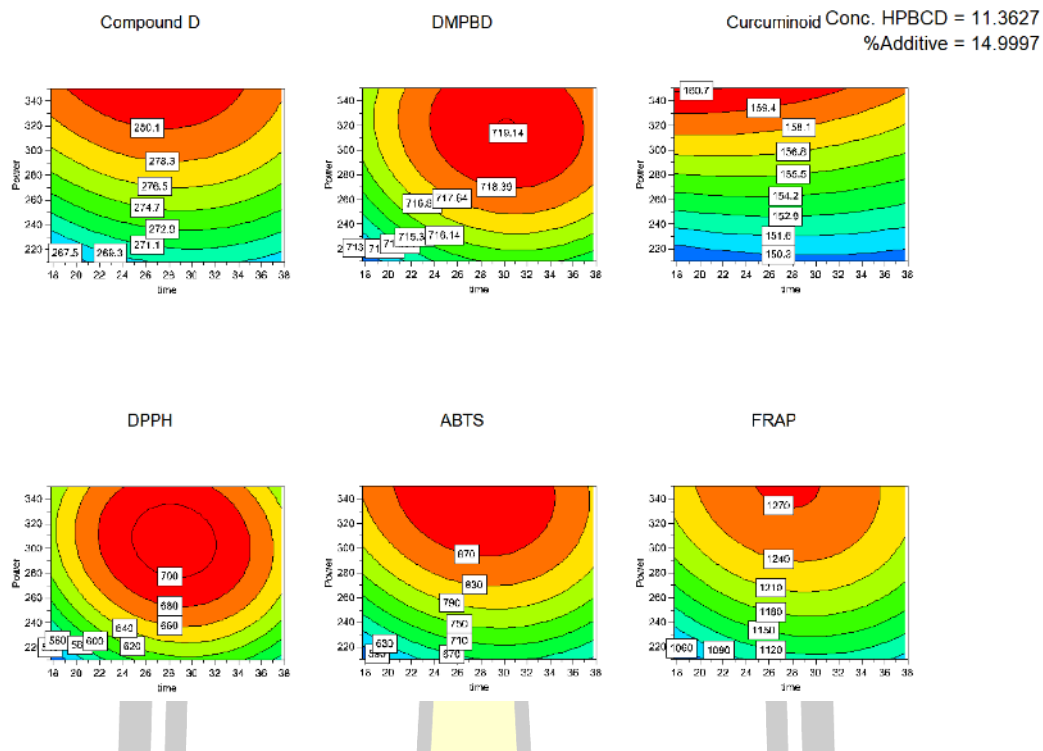
จากข้อมูลข้างต้น สามารถสรุปได้ว่าเวลาสกัดและพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์มีบทบาทสำคัญต่อค่าการตอบสนองของสารสำคัญในกระบวนการสกัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับสารที่ต้องอาศัยพลังงานสูงในการกระตุ้นการปลดปล่อย เช่น Curcuminoid และ FRAP ซึ่งต้องใช้พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ที่สูงกว่า 330 W ขึ้นไป ขณะที่สารต้านอนุมูลอิสระอื่นๆ เช่น DPPH และ ABTS ยังคงมี

แนวโน้มตอบสนองดีเมื่อใช้พลังงานในช่วง 250-350 W อย่างไรก็ตาม การเลือกใช้ช่วงเวลาสัปดาห์ที่เหมาะสมควบคู่ไปกับระดับพลังงานอัลตราซาวด์ที่เหมาะสมเป็นสิ่งสำคัญเพื่อให้ได้ค่าการตอบสนองที่สูงสุด

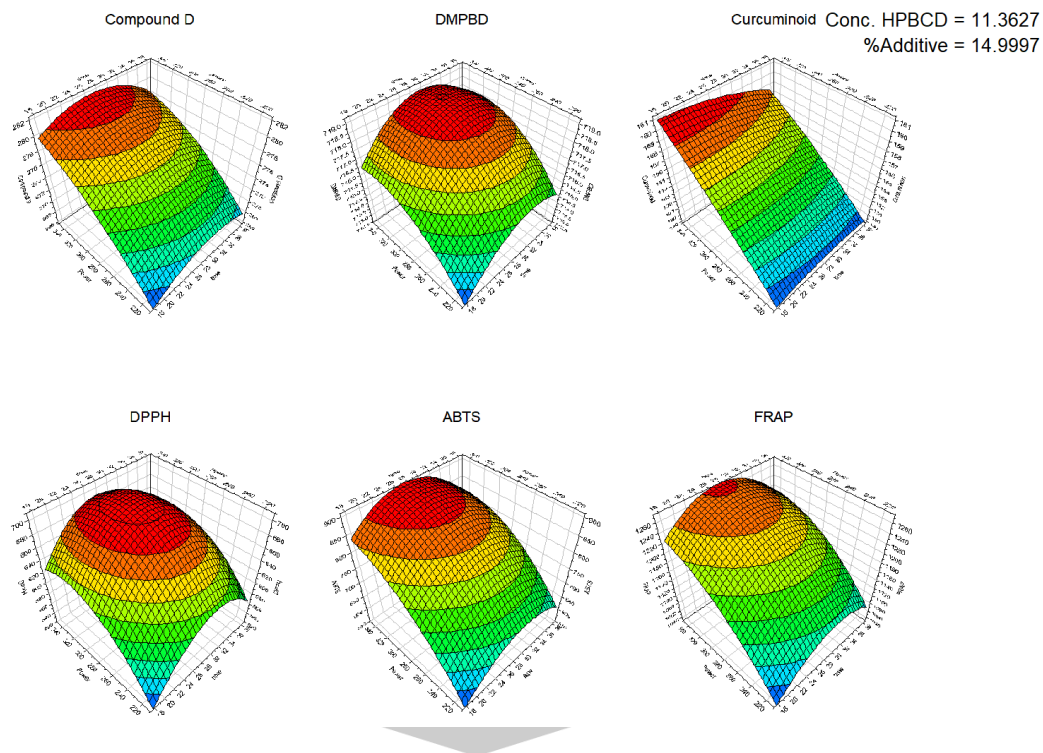
ผลการศึกษาสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงกระบวนการสกัดให้มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยคำนึงถึงปัจจัยด้านพลังงานและเวลาสัปดาห์ที่เหมาะสม ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความคุ้มค่าของกระบวนการผลิตสารสำคัญจากพืชและสมุนไพรต่อไป



(A) Contour Plot of Optimization Study Plan 3



(B) Response Surface Plot of Optimization Study Plan 3



ภาพที่ 4.62 Contour Plot และ Surface Plot ความสัมพันธ์ระหว่าง Time และ Power ใน
การศึกษา Optimization Study Plan 3

ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาสกัด (Time) และความเข้มข้นของสารเติมแต่ง (% Additive) ต่อค่าการตอบสนองใน Optimization Study Plan 3

การศึกษานี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์ผลกระทบของเวลาสกัดและความเข้มข้นของสารเติมแต่ง (% Additive) ต่อค่าการตอบสนองของสารสำคัญ โดยใช้ Contour Plot และ Surface Plot เป็นเครื่องมือหลักในการตรวจสอบแนวโน้มของค่าการตอบสนองภายใต้สภาวะที่แตกต่างกัน (ภาพที่ 4.63) ผลลัพธ์จากการศึกษาชี้ให้เห็นว่า ทั้งสองปัจจัยมีอิทธิพลต่อค่าการตอบสนองอย่างชัดเจน และสามารถกำหนดช่วงที่เหมาะสมของตัวแปรแต่ละตัวเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดได้

จากการวิเคราะห์ พบว่าโซนสีแดงเป็นช่วงที่ให้ค่าการตอบสนองสูงสุด ซึ่งสามารถกำหนดขอบเขตที่เหมาะสมของเวลาสกัดและความเข้มข้นของสารเติมแต่งสำหรับสารแต่ละชนิดได้อย่างชัดเจน สำหรับ Compound D ค่าการตอบสนองสูงสุดอยู่ที่ 309.2 $\mu\text{g/mL}$ เกิดขึ้นในช่วงเวลาสกัด 10-38 นาที และความเข้มข้นของสารเติมแต่งที่ 19% ขึ้นไป ในกรณีของ DMPBD พบว่าค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 723.3 $\mu\text{g/mL}$ เกิดขึ้นเมื่อเวลาสกัดอยู่ระหว่าง 22-38 นาที และความเข้มข้นของสารเติมแต่งมากกว่า 19% แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มสารเติมแต่งในช่วงดังกล่าวสามารถช่วยเพิ่มค่าการตอบสนองได้อย่างมีนัยสำคัญ

สำหรับ Curcuminoid ค่าการตอบสนองสูงสุดอยู่ที่ 163.4 $\mu\text{g/mL}$ พบในช่วงเวลาสกัด 10-38 นาที และความเข้มข้นของสารเติมแต่งที่ 19% ขึ้นไป แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มระดับของ %Additive สามารถช่วยเสริมประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดได้อย่างเด่นชัด ในขณะที่ค่าการตอบสนองของสารต้านอนุมูลอิสระ เช่น DPPH มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 1200 $\mu\text{M TE}$ โดยมีช่วงเวลาสกัดที่เหมาะสมอยู่ที่ 10-38 นาที และต้องใช้ความเข้มข้นของสารเติมแต่งที่ 19% ขึ้นไป สะท้อนให้เห็นว่าทั้งระยะเวลาสกัดและ %Additive เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อค่าการตอบสนองของสารกลุ่มนี้

ABTS ซึ่งเป็นอีกหนึ่งตัวชี้วัดของฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ พบว่าค่าการตอบสนองสูงสุดอยู่ที่ 1500 $\mu\text{M TE}$ โดยมีช่วงเวลาสกัดที่เหมาะสมอยู่ที่ 10-38 นาที และต้องใช้ความเข้มข้นของสารเติมแต่งที่ 20% ขึ้นไป อย่างไรก็ตาม ในกรณีของ ABTS ยังไม่พบโซนสีแดงในแผนที่ความเข้มข้นที่ใช้ ซึ่งอาจบ่งบอกว่าปัจจัยที่ทดสอบยังไม่เพียงพอในการกระตุ้นค่าการตอบสนองสูงสุด ในขณะที่ FRAP มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 1700 $\mu\text{M TE}$ โดยพบในช่วงเวลาสกัด 10-38 นาที และต้องใช้ความเข้มข้นของสารเติมแต่งที่ 19% ขึ้นไป แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มสารเติมแต่งสามารถช่วยกระตุ้นค่าการตอบสนองของสารกลุ่มนี้ได้มีประสิทธิภาพ

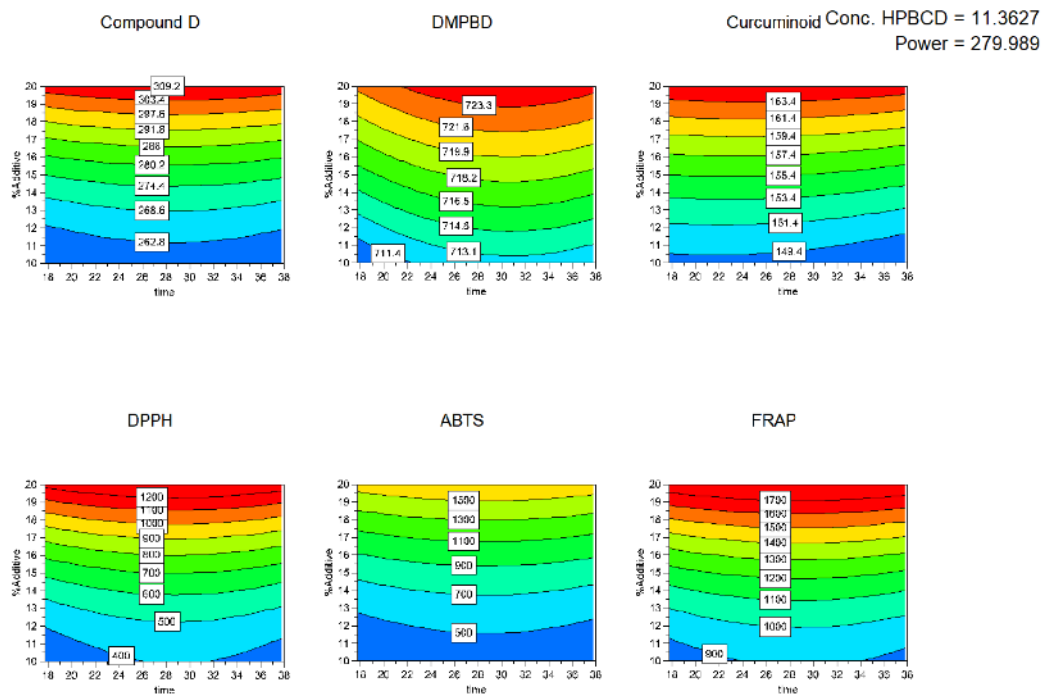
จากข้อมูลข้างต้น สามารถสรุปได้ว่าเวลาสกัดและความเข้มข้นของสารเติมแต่งมีบทบาทสำคัญต่อค่าการตอบสนองของสารสำคัญในกระบวนการสกัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับสารที่ต้องอาศัยความเข้มข้นของสารเติมแต่งสูงเพื่อกระตุ้นการสกัด เช่น Compound D และ Curcuminoid

ซึ่งต้องใช้ความเข้มข้นของสารเติมแต่งที่มากกว่า 19% ขึ้นไป ขณะที่สารต้านอนุมูลอิสระ เช่น DPPH และ FRAP ยังคงมีแนวโน้มตอบสนองดีเมื่อใช้ %Additive ที่ 19% ขึ้นไป อย่างไรก็ตาม ในกรณีของ ABTS ยังไม่พบช่วงที่ให้ค่าการตอบสนองสูงสุดอย่างชัดเจน ซึ่งอาจต้องมีการปรับปรุงจจัยเพิ่มเติมเพื่อให้ได้ค่าการตอบสนองที่เหมาะสมที่สุด

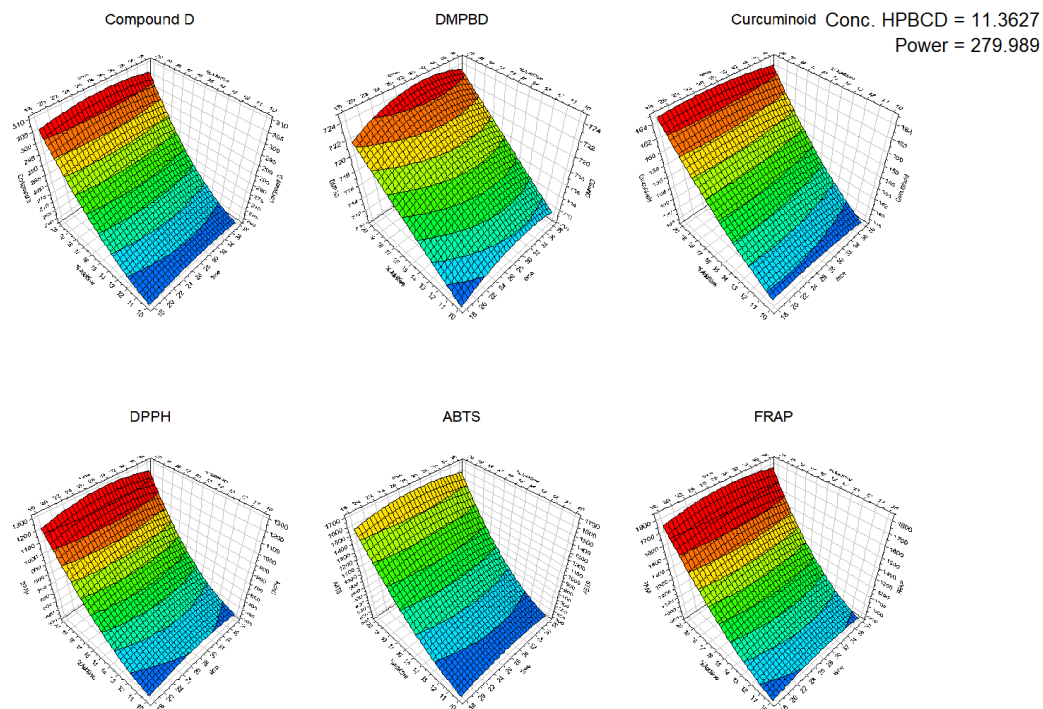
ผลการศึกษาสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงกระบวนการสกัดให้มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยคำนึงถึงปัจจัยด้านเวลาสกัดและ %Additive ที่เหมาะสม ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความคุ้มค่าของกระบวนการผลิตสารสำคัญจากพืชและสมุนไพรต่อไป



(A) Contour Plot of Optimization Study Plan 3



(B) Response Surface Plot of Optimization Study Plan 3



ภาพที่ 4.63 Contour Plot และ Surface Plot ความสัมพันธ์ระหว่าง Time และ %Additive
ในการศึกษา Optimization Study Plan 3

ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (Power) และความเข้มข้นของสารเติมแต่ง (%Additive) ต่อค่าการตอบสนองใน Optimization Study Plan 3

การศึกษานี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์ผลกระทบของพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์และความเข้มข้นของสารเติมแต่ง (%Additive) ต่อค่าการตอบสนองของสารสำคัญ โดยใช้ Contour Plot และ Surface Plot เป็นเครื่องมือหลักในการตรวจสอบแนวโน้มของค่าการตอบสนองภายใต้สภาวะที่แตกต่างกัน (ภาพที่ 4.64) ผลลัพธ์จากการศึกษาชี้ให้เห็นว่า ทั้งสองปัจจัยมีอิทธิพลต่อค่าการตอบสนองอย่างชัดเจน และสามารถกำหนดช่วงที่เหมาะสมของตัวแปรแต่ละตัวเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดได้

จากการวิเคราะห์ พบว่าโซนสีแดงเป็นช่วงที่ให้ค่าการตอบสนองสูงสุด ซึ่งสามารถกำหนดขอบเขตที่เหมาะสมของพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์และความเข้มข้นของสารเติมแต่งสำหรับสารแต่ละชนิดได้อย่างชัดเจน สำหรับ Compound D ค่าการตอบสนองสูงสุดอยู่ที่ 311.1 $\mu\text{g/mL}$ เกิดขึ้นในช่วงพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ 300 W ขึ้นไป และความเข้มข้นของสารเติมแต่ง 19% ขึ้นไป ในกรณีของ DMPBD พบว่าค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 726 $\mu\text{g/mL}$ เกิดขึ้นเมื่อพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์มากกว่า 300 W และความเข้มข้นของสารเติมแต่งมากกว่า 19% แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มพลังงานและ %Additive ภายในช่วงดังกล่าวสามารถช่วยเพิ่มค่าการตอบสนองได้อย่างมีนัยสำคัญ

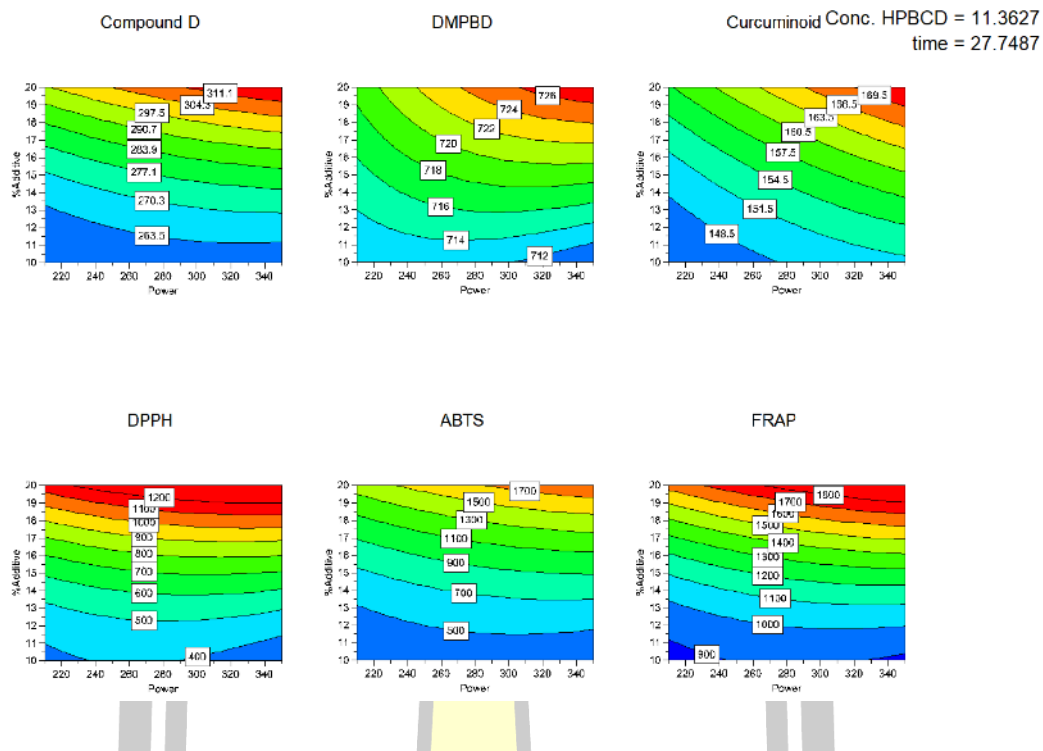
สำหรับ Curcuminoid ค่าการตอบสนองสูงสุดอยู่ที่ 169.5 $\mu\text{g/mL}$ พบในช่วงพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ 320 W ขึ้นไป และความเข้มข้นของสารเติมแต่งที่ 19% ขึ้นไป แสดงให้เห็นว่าพลังงานที่สูงกว่าระดับหนึ่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดได้อย่างเด่นชัด ในขณะที่ค่าการตอบสนองของสารต้านอนุมูลอิสระ เช่น DPPH มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 1200 $\mu\text{M TE}$ โดยมีช่วงพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ที่เหมาะสมอยู่ที่ 230 W ขึ้นไป และต้องใช้ความเข้มข้นของสารเติมแต่งที่ 19% ขึ้นไป สะท้อนให้เห็นว่าทั้งพลังงานอัลตราซาวด์และ %Additive เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อค่าการตอบสนองของสารกลุ่มนี้

ABTS ซึ่งเป็นอีกหนึ่งตัวชี้วัดของฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ พบว่าค่าการตอบสนองสูงสุดอยู่ที่ 1700 $\mu\text{M TE}$ โดยมีช่วงพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ที่เหมาะสมอยู่ที่ 280 W ขึ้นไป และต้องใช้ความเข้มข้นของสารเติมแต่งที่ 20% ขึ้นไป อย่างไรก็ตาม ในกรณีของ ABTS ยังไม่พบโซนสีแดงในแผนที่ความเข้มข้นที่ใช้ ซึ่งอาจบ่งบอกว่าปัจจัยที่ทดสอบยังไม่เพียงพอในการกระตุ้นค่าการตอบสนองสูงสุด ในขณะที่ FRAP มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 1800 $\mu\text{M TE}$ โดยพบในช่วงพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ 240 W ขึ้นไป และต้องใช้ความเข้มข้นของสารเติมแต่งที่ 19% ขึ้นไป แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์และสารเติมแต่งสามารถช่วยกระตุ้นค่าการตอบสนองของสารกลุ่มนี้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

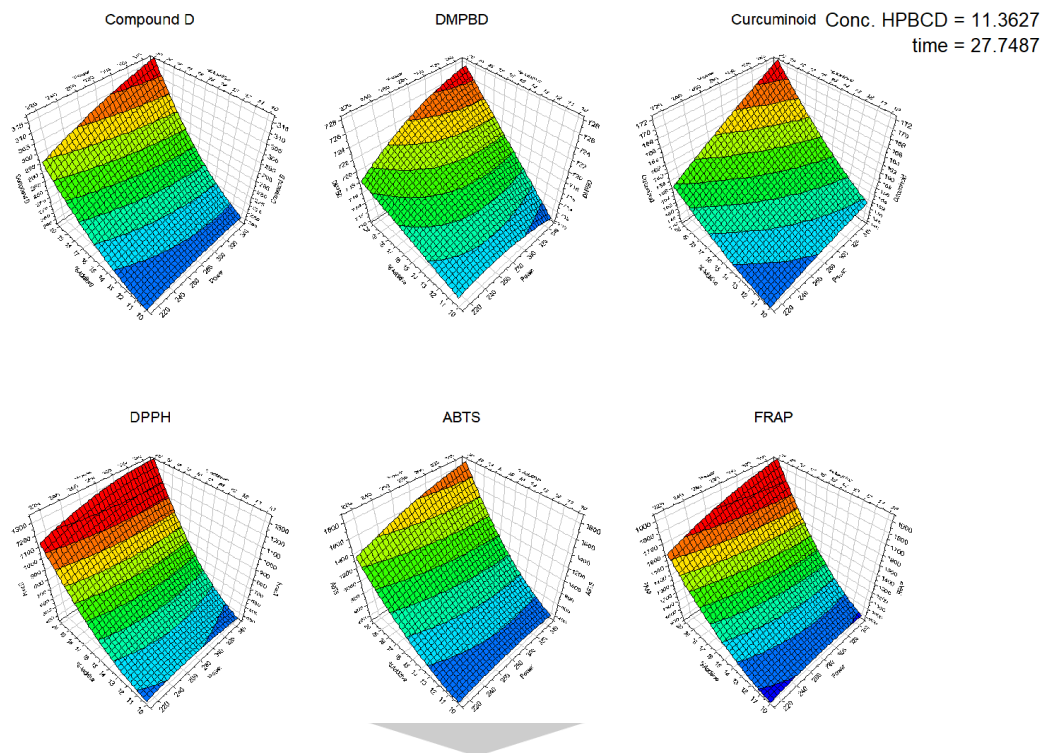
จากข้อมูลข้างต้น สามารถสรุปได้ว่าพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์และความเข้มข้นของสารเติมแต่งมีบทบาทสำคัญต่อค่าการตอบสนองของสารสำคัญในกระบวนการสกัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับสารที่ต้องอาศัยพลังงานสูงเพื่อกระตุ้นการสกัด เช่น Curcuminoid และ FRAP ซึ่งต้องใช้พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ที่สูงกว่า 320 W ขึ้นไป ขณะที่สารต้านอนุมูลอิสระ เช่น DPPH และ ABTS ยังคงมีแนวโน้มตอบสนองดีเมื่อใช้พลังงานในช่วง 230-280 W อย่างไรก็ตาม ในกรณีของ ABTS ยังไม่พบช่วงที่ให้ค่าการตอบสนองสูงสุดอย่างชัดเจน ซึ่งอาจต้องมีการปรับปรุงปัจจัยเพิ่มเติมเพื่อให้ได้ค่าการตอบสนองที่เหมาะสมที่สุด ผลการศึกษานี้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงกระบวนการสกัดให้มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยคำนึงถึงปัจจัยด้านพลังงานอัลตราซาวด์และ %Additive ที่เหมาะสม ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความคุ้มค่าของกระบวนการผลิตสารสำคัญจากพืชและสมุนไพรต่อไป



(A) Contour Plot of Optimization Study Plan 3



(B) Response Surface Plot of Optimization Study Plan 3



ภาพที่ 4.64 Contour Plot และ Surface Plot ความสัมพันธ์ระหว่าง Power และ %Additive ในการศึกษา Optimization Study Plan 3

บทสรุปการวิเคราะห์ Contour Plot และ Surface Plot ใน Optimization Study Plan 3

การศึกษานี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าการตอบสนองของกระบวนการสกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ โดยใช้ Contour Plot และ Response Surface Plot เป็นเครื่องมือสำคัญในการแสดงแนวโน้มของค่าการตอบสนองภายใต้เงื่อนไขที่แตกต่างกัน ปัจจัยหลักที่นำมาพิจารณาประกอบด้วย พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (Power), เวลาสกัด (Time), ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ (Conc. HPBCD) และความเข้มข้นของสารเติมแต่ง (%Additive) ซึ่งปัจจัยเหล่านี้มีอิทธิพลโดยตรงต่อปริมาณสารออกฤทธิ์ที่สกัดได้ รวมถึงฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระที่วัดผ่านการทดสอบ DPPH, ABTS และ FRAP

จากการวิเคราะห์ Contour Plot และ Response Surface Plot พบว่าปัจจัยแต่ละตัวมีบทบาทเฉพาะในการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัด ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ช่วยเพิ่มความสามารถในการละลายของสารสำคัญ แต่หากใช้ในปริมาณที่สูงเกินไป อาจเกิดภาวะอิมพัลส์ ทำให้การละลายของสารสกัดไม่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ เวลาสกัดยังมีความสำคัญต่อปริมาณสารที่สกัดได้ โดยช่วงเวลาที่เหมาะสมช่วยให้การปลดปล่อยสารออกฤทธิ์เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ แต่หากระยะเวลาสกัดยาวนานเกินไป อาจส่งผลให้เกิดการสลายตัวของสารออกฤทธิ์จากปัจจัยทางเคมีและอุณหภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการ

พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์เป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยเร่งการสกัด โดยเพิ่มแรงสั่นสะเทือนและการเกิดโพรงอากาศ (Cavitation) ซึ่งช่วยให้สารสำคัญถูกปลดปล่อยจากเมทริกซ์ชีวภาพได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตาม หากใช้พลังงานที่สูงเกินไป อาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างของสารออกฤทธิ์ ส่งผลให้ค่าการตอบสนองลดลง ส่วนความเข้มข้นของสารเติมแต่ง (%Additive) มีบทบาทสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัด โดยเฉพาะสารต้านอนุมูลอิสระ เช่น DPPH และ FRAP ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มสารเติมแต่งในระดับที่เหมาะสมช่วยเสริมฤทธิ์ของสารออกฤทธิ์ แต่การใช้ปริมาณมากเกินไปอาจไม่ส่งผลให้ค่าการตอบสนองเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

จากการใช้ Contour Plot และ Response Surface Plot สามารถระบุช่วงค่าที่เหมาะสมของแต่ละตัวแปรได้อย่างชัดเจน โดยค่าที่เหมาะสมสำหรับการสกัดสารออกฤทธิ์จากเหง้าไพลมักอยู่ในช่วงค่ากลางของตัวแปรที่ศึกษา การควบคุมปัจจัยให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมเป็นสิ่งสำคัญที่ช่วยให้กระบวนการสกัดมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยผลการทดลองพบว่า ค่า R^2 ซึ่งใช้วัดความสามารถของแบบจำลองในการอธิบายความแปรปรวนของข้อมูล อยู่ในช่วง 0.986607 – 0.993724 แสดงถึงความแม่นยำของแบบจำลอง ส่วนค่า Q^2 ซึ่งสะท้อนความสามารถในการพยากรณ์ อยู่ในช่วง 0.826038 – 0.919611 บ่งบอกว่าแบบจำลองมีศักยภาพในการทำนายผลลัพธ์ได้ดี ค่า RSD ซึ่งเป็นค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน อยู่ในช่วง 0.460710 – 26.7365 แสดงถึงระดับความแม่นยำของการทดลอง

ดังนั้น ผลการศึกษานี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาและปรับปรุงกระบวนการสกัดสารออกฤทธิ์ให้มีประสิทธิภาพสูงสุด การเลือกใช้ค่าปัจจัยที่เหมาะสมเป็นกุญแจสำคัญในการเพิ่มปริมาณสารออกฤทธิ์และรักษาคุณสมบัติของฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ การใช้ค่าปัจจัยที่สูงหรือต่ำเกินไปอาจลดประสิทธิภาพของกระบวนการและนำไปสู่การสลายตัวของสารสำคัญได้ ซึ่งข้อมูลที่ได้รับจากการศึกษานี้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการปรับแต่งกระบวนการสกัดในระดับอุตสาหกรรมเพื่อให้ได้สารสกัดที่มีคุณภาพสูงและสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4.3.3.5 การระบุจุดที่เหมาะสม (Optimization) ใน Optimization Study Plan 3

การศึกษาการระบุจุดที่เหมาะสมใน Optimization Study Plan 3 มีเป้าหมายเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการสกัดสารออกฤทธิ์จากเหง้าไพล โดยผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ค่าการตอบสนองภายใต้สภาวะที่เหมาะสมแสดงในตารางที่ 4.17 ให้เห็นว่า ค่า Compound D สูงสุดอยู่ที่ 276.57 $\mu\text{g/ml}$, ค่า DMPBD สูงสุดที่ 718.273 $\mu\text{g/ml}$, ค่า Curcuminoid สูงสุดที่ 156.263 $\mu\text{g/ml}$, ค่าการต้านอนุมูลอิสระ DPPH สูงสุดที่ 673.587 $\mu\text{M TE}$, ABTS สูงสุดที่ 808.445 $\mu\text{M TE}$, และ FRAP สูงสุดที่ 1202.76 $\mu\text{M TE}$ ซึ่งบ่งชี้ว่าการปรับค่าปัจจัยให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดได้อย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 4.17 แสดงค่าเป้าหมายของการเพิ่มประสิทธิภาพของตัวแปรตอบสนองใน Optimization Study Plan 3 จากโปรแกรม MODDE 7.0

Response Variable	Optimization Objective	Weight	Predicted Minimum Value	Predicted Maximum Value
Compound D	Maximize	1	273.619	276.57
DMPBD	Maximize	1	716.52	718.273
Curcuminoid	Maximize	1	154.685	156.263
DPPH	Maximize	1	630.251	673.587
ABTS	Maximize	1	735.203	808.445
FRAP	Maximize	1	1153.17	1202.76

จากการวิเคราะห์ค่าที่เหมาะสมโดยใช้โปรแกรม MODDE 7.0 (ตารางที่ 4.18) พบว่าค่าความเข้มข้นของไฮโดรคลอริกที่ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 18.7693-19.5 mM เวลาสกัดที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 27.516-30 นาที กำลังคลื่นอัลตราซาวด์ในช่วง 279.849-285 W และความเข้มข้นของสารเติมแต่งอยู่ระหว่าง 14.5-15% ซึ่งภายใต้สภาวะดังกล่าวสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดได้สูงสุด

ตารางที่ 4.18 ผลการวิเคราะห์ค่าที่เหมาะสมของปัจจัยและค่าการตอบสนองใน Optimization Study Plan 3 จากโปรแกรม MODDE 7.0

No.	X3 (mM)	X5 (min)	X6 (W)	X8 (%Add)	Y1 ($\mu\text{g/ml}$)	Y2 ($\mu\text{g/ml}$)	Y3 ($\mu\text{g/ml}$)	Y4 (μM TE)	Y5 (μM TE)	Y6 (μM TE)
1	18.7693	27.516	279.849	15	276.896	717.626	155.121	722.595	851.26	1227.62
2	11.3627	28.7487	279.989	14.9997	277.407	718.624	155.43	701.833	849.602	1229.9
3	12.6659	26.5657	279.951	14.9998	277.489	718.393	155.534	708.947	854.433	1232.34
4	13.4128	27.321	279.906	14.9985	277.575	718.434	155.482	715.203	859.359	1235.33
5	11.8178	28.6653	279.995	14.9978	277.461	718.606	155.433	705.461	852.441	1231.55
6	11.9982	28.6193	279.993	14.9976	277.481	718.597	155.435	706.858	853.53	1232.18
7	11.9053	28.6981	280.000	14.993	277.448	718.599	155.423	705.731	852.381	1231.44
8	11.344	28.4316	279.966	14.9938	277.374	718.594	155.438	701.034	848.6	1229.17

ผลการวิเคราะห์จากข้อมูลการทดลองซ้ำหลายครั้งแสดงให้เห็นว่าค่าการตอบสนองของสารออกฤทธิ์สามารถเพิ่มขึ้นได้สูงสุดเมื่อควบคุมค่าปัจจัยให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม อย่างไรก็ตาม การเพิ่มความเข้มข้นของไซโคลเด็กซ์ทรินหรือระยะเวลาสกัดมากเกินไปอาจทำให้ค่าการตอบสนองลดลงเนื่องจากเกิดภาวะอิ่มตัวของสารสกัดและความเป็นไปได้ของการเกิดผลเสียต่อโครงสร้างสารออกฤทธิ์ ขณะเดียวกัน การใช้กำลังคลื่นอัลตราซาวด์ที่สูงเกิน 280 W อาจทำให้เกิดการสลายตัวของสารออกฤทธิ์บางชนิด ซึ่งสอดคล้องกับแนวโน้มที่พบในงานวิจัยก่อนหน้านี้เกี่ยวกับการใช้พลังงานสูงในการสกัดสารจากพืช

จากการตรวจสอบค่าที่เหมาะสมในตารางค่าพยากรณ์ของโปรแกรม MODDE 7.0 พบว่าค่าความเข้มข้นของไซโคลเด็กซ์ทรินในช่วง 18.7693-19.5 mM และกำลังคลื่นอัลตราซาวด์ที่ 279.849-285 W ให้ค่าการตอบสนองของ Compound D สูงสุดที่ 276.896 $\mu\text{g/ml}$ และ DMPBD สูงสุดที่ 717.626 $\mu\text{g/ml}$ นอกจากนี้ ค่าการต้านอนุมูลอิสระ DPPH สูงสุดที่ 722.595 μM TE, ABTS ที่ 851.26 μM TE และ FRAP สูงสุดที่ 1227.62 μM TE ซึ่งบ่งชี้ว่าภายใต้สภาวะที่เหมาะสม กระบวนการสกัดสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของสารออกฤทธิ์และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระได้อย่างมีนัยสำคัญ

ผลการศึกษาเน้นให้เห็นถึงความสำคัญของการกำหนดค่าปัจจัยที่เหมาะสมในการสกัดสารออกฤทธิ์จากเหง้าโพล ซึ่งสามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาและปรับปรุงกระบวนการสกัดให้มี

ประสิทธิภาพสูงสุด อีกทั้งยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมเพื่อเพิ่มคุณภาพของสารสกัดที่นำไปใช้ในผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการพัฒนาเครื่องสำอางและผลิตภัณฑ์เสริมอาหารที่ต้องการสารสกัดที่มีความเข้มข้นสูงและคงคุณสมบัติของสารสำคัญได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4.3.3.6 การตรวจสอบความถูกต้องของค่าคาดการณ์ใน Optimization Study Plan 3

การตรวจสอบความถูกต้องของค่าคาดการณ์เป็นขั้นตอนสำคัญในการประเมินความแม่นยำของแบบจำลองที่ใช้ทำนายผลลัพธ์ของกระบวนการสกัด ใน Optimization Study Plan 3 ได้ดำเนินการทดลองโดยใช้เงื่อนไขที่กำหนด ได้แก่ ความเข้มข้นของ HPBCD 19 มิลลิโมลาร์ (mM), เวลาสกัด 28 นาที, กำลังของคลื่นอัลตราซาวด์ 280 วัตต์ (W), ไม่มีการใช้เอทานอล, การเติมสารเพิ่มประสิทธิภาพ 15% ที่อุณหภูมิห้อง เพื่อประเมินความแม่นยำของค่าคาดการณ์ ได้มีการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากแบบจำลองกับค่าที่ได้จากการทดลองจริงโดยอาศัย Verification Triplicate ซึ่งเป็นการทดลองซ้ำสามครั้งเพื่อลดผลกระทบจากความแปรปรวนของการทดลองและเพิ่มความแม่นยำของผลลัพธ์ เพื่อประเมินความถูกต้องของค่าคาดการณ์จากแบบจำลอง ได้ทำการตรวจสอบค่าคาดการณ์ของสารสำคัญ ได้แก่ Compound D, DMPBD, Curcuminoid และค่าการทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ได้แก่ DPPH, ABTS และ FRAP เปรียบเทียบกับค่าทดลองที่ได้จากการตรวจสอบจริงในรูปแบบ Verification Triplicate ซึ่งเป็นการทดลองซ้ำสามครั้ง โดยผลลัพธ์ของการเปรียบเทียบค่าคาดการณ์และค่าตรวจสอบแสดงในตารางที่ 4.19 ในการตรวจสอบค่าคาดการณ์ ได้มีการนำค่าคาดการณ์ที่ได้จากแบบจำลองมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองจริงในรูปแบบ Verification Triplicate โดยพิจารณาทั้งช่วงความเชื่อมั่นของค่าคาดการณ์ และการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (% Relative Error, %RE) ซึ่งหากค่าคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง $\leq 5\%$ ถือว่าค่าคาดการณ์มีความแม่นยำเพียงพอ

พูน ปณ จิต ชีเว

ตารางที่ 4.19 แสดงการเปรียบเทียบค่าคาดการณ์และค่าตรวจสอบ (Verification) ใน Optimization Study Plan 3

Compound	Predictio n (Mean)	Predictio n (Lower)	Predictio n (Upper)	Verificatio n (1)	Verificatio n (2)	Verificatio n (3)	ค่าเฉลี่ย
Compound D ($\mu\text{g/ml}$)	276.800	274.606	278.994	279.256	283.529	269.256	277.347
DMPBD ($\mu\text{g/ml}$)	717.565	716.465	718.664	720.256	700.263	703.264	707.928
Curcuminoid ($\mu\text{g/ml}$)	155.071	154.231	155.911	152.325	155.265	159.325	155.638
DPPH ($\mu\text{M TE}$)	721.953	692.187	751.72	725.265	699.256	742.952	722.491
ABTS ($\mu\text{M TE}$)	849.290	800.534	898.047	835.329	836.267	872.264	847.953
FRAP ($\mu\text{M TE}$)	1226.170	1191.24	1261.1	1230.241	1199.261	1212.336	1213.94 6

ผลการวิเคราะห์พบว่า ค่าของ Compound D ซึ่งมีหน่วยเป็น $\mu\text{g/ml}$ มีค่าคาดการณ์เฉลี่ยอยู่ที่ 276.800 $\mu\text{g/ml}$ ขณะที่ค่าตรวจสอบจริงเฉลี่ยอยู่ที่ 277.347 $\mu\text{g/ml}$ ส่งผลให้ค่า %RE เท่ากับ 0.20% ซึ่งอยู่ในระดับที่ต่ำมาก แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถทำนายค่าของสารประกอบนี้ได้ อย่างแม่นยำ โดยค่าตรวจสอบจริงทั้งหมดอยู่ภายในช่วงค่าคาดการณ์ที่กำหนดไว้ระหว่าง 274.606 – 278.994 $\mu\text{g/ml}$

สำหรับ DMPBD ค่าคาดการณ์เฉลี่ยอยู่ที่ 717.565 $\mu\text{g/ml}$ ขณะที่ค่าตรวจสอบจริงเฉลี่ยอยู่ที่ 707.928 $\mu\text{g/ml}$ ส่งผลให้ค่า %RE เท่ากับ 1.34% แม้ว่าจะมีค่าคลาดเคลื่อนมากกว่าสารตัวอื่น เล็กน้อย แต่ยังอยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้ โดยค่าตรวจสอบจริงที่ได้บางค่าหลุดออกจากช่วงค่าคาดการณ์ที่กำหนดไว้ระหว่าง 716.465 – 718.664 $\mu\text{g/ml}$ อาจเป็นผลมาจากความแปรปรวนของ กระบวนการสกัด อย่างไรก็ตาม ค่าเบี่ยงเบนที่พบยังอยู่ในระดับที่สามารถยอมรับได้ในเชิงสถิติ

ในส่วนของ Curcuminoid ซึ่งเป็นสารสำคัญที่ต้องการศึกษาและมีหน่วยเป็น $\mu\text{g/ml}$ ค่าคาดการณ์เฉลี่ยอยู่ที่ 155.071 $\mu\text{g/ml}$ ขณะที่ค่าตรวจสอบจริงเฉลี่ยอยู่ที่ 155.638 $\mu\text{g/ml}$ ส่งผลให้ค่า %RE เท่ากับ 0.37% ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำมากและสามารถยอมรับได้ โดยค่าตรวจสอบจริงทั้งหมดอยู่ในช่วงค่าคาดการณ์ที่กำหนดไว้ระหว่าง 154.231 – 155.911 $\mu\text{g/ml}$ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถใช้ทำนายค่าของสารประกอบกลุ่มเคอร์คูมินอยด์ได้อย่างแม่นยำ

เมื่อพิจารณาค่าผลลัพธ์ของ DPPH ซึ่งเป็นค่าที่ใช้วัดศักยภาพของสารสกัดในการกำจัดอนุมูลอิสระ และมีหน่วยเป็น $\mu\text{M TE}$ พบว่าค่าคาดการณ์เฉลี่ยอยู่ที่ 721.953 $\mu\text{M TE}$ ขณะที่ค่าตรวจสอบ

จริงเฉลี่ยอยู่ที่ 722.491 $\mu\text{M TE}$ ส่งผลให้ค่า %RE เท่ากับ 0.07% ซึ่งต่ำมากและอยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้ โดยค่าตรวจสอบจริงทั้งหมดอยู่ภายในช่วงค่าคาดการณ์ที่กำหนดไว้ระหว่าง 692.187 – 751.720 $\mu\text{M TE}$ แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถพยากรณ์ค่าของสารต้านอนุมูลอิสระ DPPH ได้อย่างแม่นยำ

อย่างไรก็ตาม ค่าการทดสอบ ABTS มีความคลาดเคลื่อนเมื่อเปรียบเทียบกับค่าคาดการณ์ โดยค่าคาดการณ์เฉลี่ยอยู่ที่ 849.290 $\mu\text{M TE}$ ขณะที่ค่าตรวจสอบจริงมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 847.953 $\mu\text{M TE}$ ส่งผลให้ค่า %RE เท่ากับ 0.16% ซึ่งอยู่ในระดับต่ำและสามารถยอมรับได้ในเชิงทดลอง การเบี่ยงเบนเล็กน้อยนี้อาจเกิดจากความแปรปรวนในการเตรียมสารละลายหรือความแตกต่างของสภาวะการทดลอง อย่างไรก็ตาม ค่าที่ได้ยังคงมีความสอดคล้องกับค่าคาดการณ์ และสามารถนำไปใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดได้ต่อไป

สุดท้ายคือค่าการทดสอบ FRAP ซึ่งใช้วัดศักยภาพของสารต้านอนุมูลอิสระผ่านปฏิกิริยาการรีดักชัน ค่าคาดการณ์เฉลี่ยอยู่ที่ 1226.170 $\mu\text{M TE}$ ขณะที่ค่าตรวจสอบจริงเฉลี่ยอยู่ที่ 1213.946 $\mu\text{M TE}$ ส่งผลให้ค่า %RE เท่ากับ 0.99% ซึ่งอยู่ในระดับที่ต่ำและสามารถยอมรับได้ โดยค่าตรวจสอบจริงทั้งหมดอยู่ในช่วงค่าคาดการณ์ที่กำหนดไว้ระหว่าง 1191.240 – 1261.100 $\mu\text{M TE}$ สะท้อนว่าแบบจำลองสามารถพยากรณ์ค่าของสารต้านอนุมูลอิสระ FRAP ได้อย่างแม่นยำ

ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่ใช้สามารถทำนายค่าของสารสำคัญได้อย่างแม่นยำ โดยค่าคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (%RE) ของสารทั้งหมดอยู่ในช่วง 0.07% - 1.34% ซึ่งต่ำกว่าขีดจำกัด 5% ที่กำหนดไว้ในเกณฑ์การยอมรับของแบบจำลอง สำหรับ Compound D, Curcuminoid, DPPH, ABTS และ FRAP ค่าตรวจสอบจริงทั้งหมดอยู่ภายในช่วงค่าคาดการณ์ และค่า %RE ที่ต่ำกว่า 1% สะท้อนให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถทำนายผลลัพธ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีความแม่นยำสูง โดยเฉพาะ DPPH ซึ่งมีค่า %RE ต่ำที่สุดที่ 0.07% ยืนยันความสอดคล้องของแบบจำลองกับข้อมูลการทดลองจริง ในกรณีของ DMPBD แม้ว่าจะมีค่า %RE ที่สูงกว่าสารอื่นที่ 1.34% และค่าตรวจสอบจริงบางค่าหลุดออกจากช่วงค่าคาดการณ์ แต่ยังคงอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ในเชิงสถิติ ซึ่งอาจเป็นผลจากความแปรปรวนของกระบวนการสกัดหรือปัจจัยภายนอกที่ส่งผลต่อการทดลอง โดยรวมแล้ว แบบจำลองที่ใช้สามารถพยากรณ์ผลลัพธ์ของกระบวนการสกัดได้อย่างแม่นยำ และสอดคล้องกับค่าทดลองจริงในระดับสูง ความคลาดเคลื่อนที่พบอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ และไม่มี ความผิดปกติที่อาจส่งผลต่อความน่าเชื่อถือของการวิเคราะห์ ดังนั้น แบบจำลองนี้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบและพัฒนาเงื่อนไขการสกัดที่เหมาะสมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4.3.3.7 บทสรุปผลการศึกษาการปรับสภาวะการสกัด Optimization Study Plan 3

การศึกษานี้มุ่งเน้นการกำหนดสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสกัดสารสำคัญจากเหง้าไพล โดยใช้ Central Composite Design (CCD) ในการวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยสำคัญ ได้แก่ ความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทรีน (HPBCD), ระยะเวลาสกัด, พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ และความเข้มข้นของสารเติมแต่ง ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์และความเข้มข้นของสารเติมแต่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดสารออกฤทธิ์ได้อย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ความเข้มข้นของ HPBCD และเวลาสกัด หากเกินช่วงที่เหมาะสม อาจส่งผลลดทอนปริมาณสารสำคัญที่สกัดได้

แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถอธิบายความแปรปรวนของค่าการตอบสนองได้อย่างแม่นยำ โดยค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.9866 - 0.9937 และ Q^2 อยู่ในช่วง 0.8260 - 0.9196 ซึ่งสะท้อนถึงความแม่นยำของแบบจำลองในการพยากรณ์ผลลัพธ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ การวิเคราะห์ Contour Plot และ Surface Plot ยังช่วยให้เห็นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าการตอบสนองตามระดับปัจจัยที่ศึกษา ทำให้สามารถกำหนดสภาวะที่ดีที่สุดได้อย่างชัดเจน

จากผลการทดลองพบว่า การสกัดที่ได้ผลดีที่สุดให้ค่าการตอบสนองสูงสุดของสารออกฤทธิ์ ได้แก่ Compound D มีค่า 275.23 $\mu\text{g/mL}$, DMPBD มีค่า 717.47 $\mu\text{g/mL}$ และ Curcuminoids มีค่า 155.67 $\mu\text{g/mL}$ ซึ่งได้รับอิทธิพลจากพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์และสารเติมแต่งเป็นหลัก ในขณะเดียวกัน ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระจากการทดสอบ DPPH มีค่า 640.93 $\mu\text{M TE}$, ABTS มีค่า 754.58 $\mu\text{M TE}$ และ FRAP มีค่า 1184.96 $\mu\text{M TE}$ โดยแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์โดยตรงกับระดับพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์และสารเติมแต่ง โดยเฉพาะค่าของ ABTS และ FRAP ที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อใช้พลังงานอัลตราซาวด์ในช่วงที่เหมาะสม

ในเชิงปฏิสัมพันธ์ พบว่าพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์และสารเติมแต่งมีผลเสริมกัน ทำให้การสกัดมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยค่าที่เหมาะสมจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม MODDE 7.0 พบว่าค่าความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทรีนที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 18.7693-19.5 mM ในขณะที่เวลาสกัดที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 27.516-30 นาที กำลังคลื่นอัลตราซาวด์ในช่วง 279.849-285 W และความเข้มข้นของสารเติมแต่งอยู่ระหว่าง 14.5-15% ซึ่งภายใต้สภาวะดังกล่าวสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดได้สูงสุดและมีศักยภาพในการนำไปใช้ในระดับอุตสาหกรรม จากข้อมูลทั้งหมดนี้สามารถสรุปได้ว่า CCD เป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพในการกำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการสกัดสารออกฤทธิ์จากเหง้าไพล ซึ่งช่วยให้ได้สารสกัดที่มีคุณภาพสูงสุด และสามารถนำไปพัฒนาต่อในกระบวนการผลิตขนาดใหญ่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4.3.4 ผลการวิเคราะห์ Optimization study Plan 4

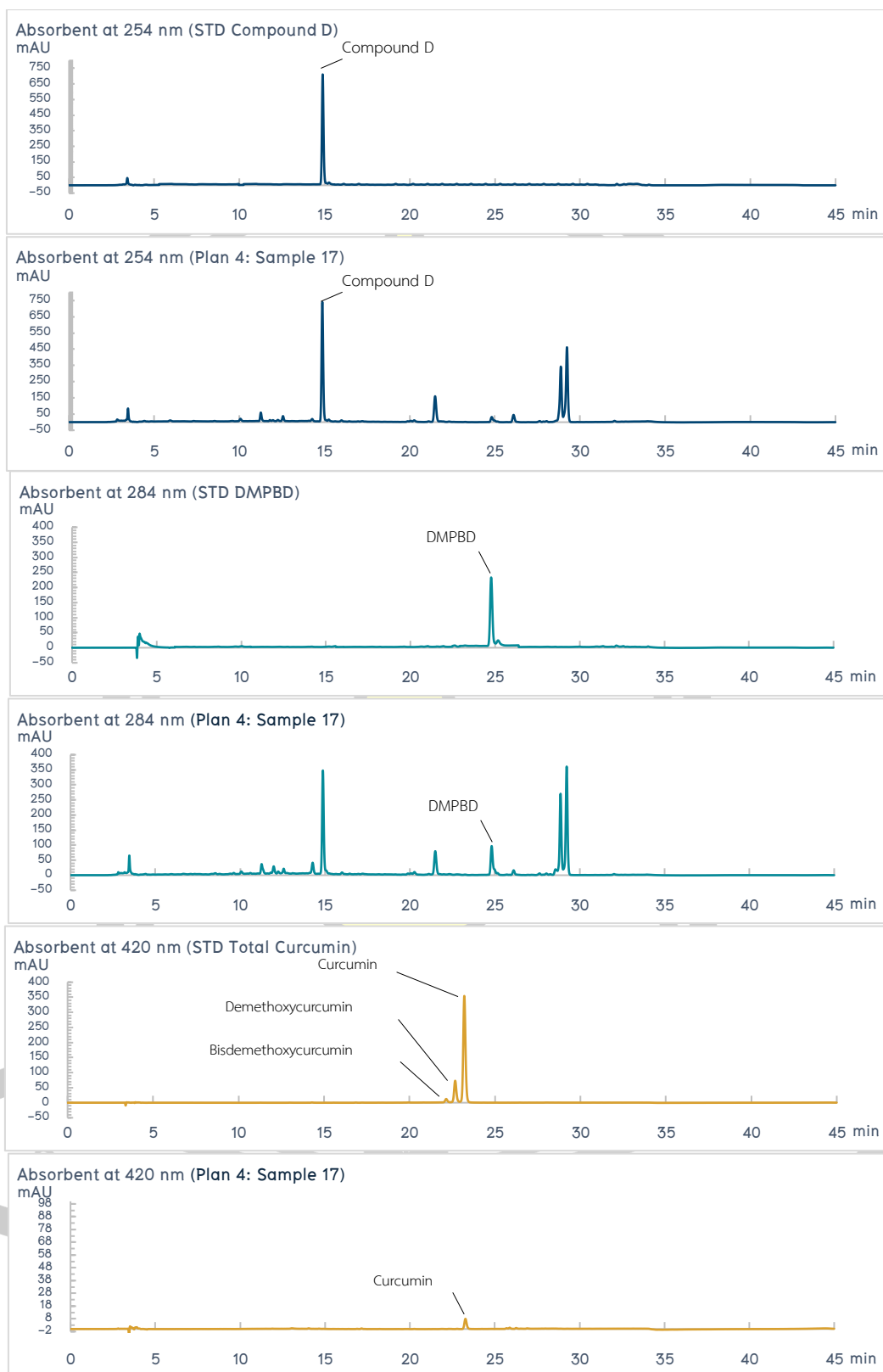
การวิเคราะห์ผลของ Optimization Study Plan 4 ในการสกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากเหง้าไพลเป็นการศึกษาที่ดำเนินการโดยใช้ Central Composite Design (CCD) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของ Response Surface Methodology (RSM) โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อระบุเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการสกัดสารสำคัญ โดยมุ่งเน้นไปที่ การใช้ Cyclodextrin (HPBCD) เพียงอย่างเดียวโดยไม่มีสารเติมแต่งหรือสารทำละลายอินทรีย์อื่นๆ เพื่อศึกษาผลของ HPBCD ต่อประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดภายใต้ระบบที่ไม่มีตัวช่วยเสริม จากผลการศึกษาใน Screening Study พบว่า HPBCD และน้ำหนักของสมุนไพรที่ 0.02 mg/mL เป็นปัจจัยหลักที่มีผลโดยตรงต่อปริมาณสารสำคัญที่สกัดได้และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ดังนั้น ในขั้นตอน Optimization Study (Plan 4) น้ำหนักของสมุนไพรถูกกำหนดเป็นค่าคงที่ ขณะที่ตัวแปรที่ศึกษาในแผนนี้ ได้แก่ X3, X5 และ X6 ซึ่งเป็นปัจจัยที่สามารถปรับเปลี่ยนได้อย่างอิสระเพื่อประเมินผลกระทบของ HPBCD ต่อการสกัดสารสำคัญโดยไม่มีองค์ประกอบอื่นเข้ามาเกี่ยวข้อง HPBCD ทำหน้าที่เป็นสารช่วยสกัดโดยอาศัยกลไกของ Inclusion Complexation ซึ่งช่วยกักเก็บสารออกฤทธิ์จากเหง้าไพล เช่น Curcumin และอนุพันธ์ของ Curcuminoids ทำให้สามารถเพิ่มความสามารถในการละลายของสารสำคัญและช่วยลดการเสื่อมสภาพที่อาจเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการสกัด ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยกระบวนการที่ศึกษา ส่งผลโดยตรงต่อค่าการตอบสนอง ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดและฤทธิ์ทางชีวภาพของสารสกัดที่ได้รับ ข้อมูลรายละเอียดของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองในแผนนี้แสดงใน ตารางที่ 4.20

การเปรียบเทียบค่าการตอบสนองจากตารางผลลัพธ์แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของแต่ละปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าการตอบสนองของสารสำคัญต่าง ๆ ได้อย่างชัดเจน ในขณะเดียวกัน ผลการวิเคราะห์โดยใช้ HPLC ซึ่งแสดงในภาพที่ 4.65 ได้ยืนยันถึงความแตกต่างขององค์ประกอบทางเคมีในสารสกัดแต่ละเงื่อนไข ซึ่งสามารถแยกออกจากกันได้อย่างชัดเจนในโครมาโทแกรมของสารสกัดและสารมาตรฐาน จากการเปรียบเทียบโครมาโทแกรมของสารสกัดจากเงื่อนไขต่าง ๆ พบว่า สัดส่วนของ Curcumin, DMPBD และ Compound D มีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของปัจจัยที่ใช้ในการสกัด

ตารางที่ 4.20 แสดงผลการศึกษาการสกัดสารสำคัญจากเหง้าไพล์ชันตอน Optimization study
Plan 4 ด้วย Central Composite Design

DESIGN POINT	PROCESS FACTOR			RESPONSE					
	X3 (mM)	X5 (min)	X6 (W)	Y1 ($\mu\text{g/ml}$)	Y2 ($\mu\text{g/ml}$)	Y3 ($\mu\text{g/ml}$)	Y4 ($\mu\text{M TE}$)	Y5 ($\mu\text{M TE}$)	Y6 ($\mu\text{M TE}$)
N1	10 (-1)	20 (-1)	140 (-1)	252.629	430.015	10.158	196.644	147.154	292.500
N2	30 (1)	20 (-1)	140 (-1)	239.473	370.755	17.394	376.581	180.213	325.000
N3	10 (-1)	40 (1)	140 (-1)	244.073	391.475	11.731	241.202	125.661	257.500
N4	30 (1)	40 (1)	140 (-1)	244.954	395.445	16.520	366.810	160.554	301.500
N5	10 (-1)	20 (-1)	280 (1)	236.914	359.225	12.321	257.909	160.109	277.000
N6	30 (1)	20 (-1)	280 (1)	238.522	366.470	19.106	450.068	234.556	451.000
N7	10 (-1)	40 (1)	280 (1)	227.139	315.195	15.826	357.171	177.483	284.500
N8	30 (1)	40 (1)	280 (1)	237.212	360.570	20.065	477.203	255.223	505.500
N9	10 (-1)	30 (0)	210 (0)	258.951	458.495	13.188	274.959	176.279	332.000
N10	30 (1)	30 (0)	210 (0)	260.877	467.170	19.063	443.843	234.914	458.500
N11	20 (0)	20 (-1)	210 (0)	264.041	481.425	16.198	367.690	195.059	399.000
N12	20 (0)	40 (1)	210 (0)	257.180	450.520	17.666	384.286	195.962	385.500
N13	20 (0)	30 (0)	140 (-1)	265.348	487.310	16.156	351.508	181.600	367.500
N14	20 (0)	30 (0)	280 (1)	255.157	441.405	19.062	448.811	233.575	440.500
N15	20 (0)	30 (0)	210 (0)	269.761	518.750	17.924	396.570	213.894	412.000
N16	20 (0)	30 (0)	210 (0)	264.738	530.815	18.481	385.362	217.266	442.500
N17	20 (0)	30 (0)	210 (0)	269.895	507.795	17.478	408.937	224.895	424.000





ภาพที่ 4.65 โครมาโทแกรมของตัวอย่างสารสกัดจากเหง้าโพลในขั้นตอน Optimization study Plan 4 และสารมาตรฐานวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC

4.3.4.1 การวิเคราะห์ความสอดคล้องของแบบจำลอง (Model Adequacy Check)

การตรวจสอบความสอดคล้องของแบบจำลองเป็นขั้นตอนสำคัญในการประเมินว่ารูปแบบที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงสถิติสามารถใช้เป็นตัวแทนของระบบได้ดีเพียงใด การวิเคราะห์นี้เป็นหัวใจสำคัญของ Optimization Study Plan 4 เนื่องจากช่วยให้มั่นใจว่าผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองมีความแม่นยำเพียงพอและสามารถนำไปใช้คาดการณ์ผลลัพธ์ของการทดลองในอนาคตได้อย่างมีประสิทธิภาพ การศึกษาที่ใช้ Partial Least Squares Regression (PLS) ซึ่งเป็นหนึ่งในวิธีการทางสถิติที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางสำหรับการสร้างแบบจำลองที่สามารถจับความสัมพันธ์เชิงซับซ้อนระหว่างตัวแปรอิสระและค่าการตอบสนองที่สำคัญ

การประเมินแบบจำลองเริ่มต้นจาก ตารางที่ 4.21 Model Validation Summary ซึ่งเป็นข้อมูลที่สามารถพิจารณาประสิทธิภาพของแบบจำลองในมุมมองที่ครอบคลุม โดยอาศัยตัวชี้วัดที่สำคัญ ได้แก่ ค่า R^2 , R^2 Adjusted, Q^2 และ RSD ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการตรวจสอบคุณภาพและเสถียรภาพของแบบจำลองในแต่ละค่าการตอบสนอง

ตารางที่ 4.21 แสดง Model Validation Summary ของขั้นตอน Optimization study Plan 4

Parameters	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6
N	17	17	17	17	17	17
R^2	0.987478	0.990768	0.991252	0.988821	0.989907	0.989539
R^2 Adj.	0.971379	0.978897	0.980004	0.974447	0.97693	0.976088
Q^2	0.908427	0.914837	0.877085	0.808453	0.854537	0.841729
RSD	2.23812	9.32784	0.408443	12.6622	5.44692	11.6794

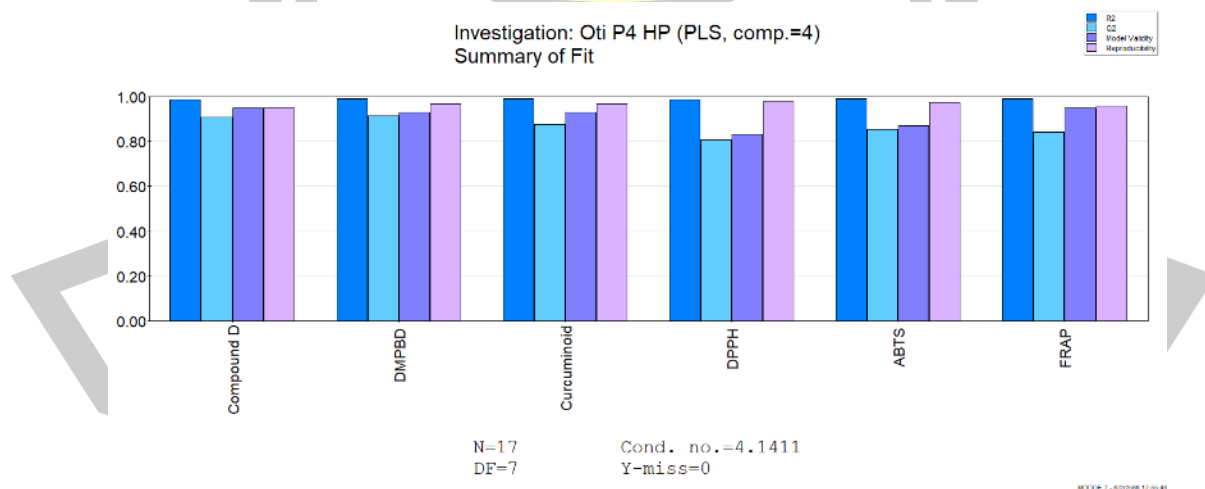
ผลลัพธ์จากตารางพบว่า ค่าความสามารถของแบบจำลองในการอธิบายข้อมูล (R^2) อยู่ในช่วง 0.987-0.991 ซึ่งหมายความว่าแบบจำลองสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้มากกว่า 98.7% ซึ่งเป็นค่าที่สูงมาก และแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถจับความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและค่าการตอบสนองได้อย่างแม่นยำมาก ค่านี้นสะท้อนถึงคุณภาพของแบบจำลองที่ถูกสร้างขึ้นและเป็นตัวบ่งชี้ที่ดีว่าแบบจำลองสามารถใช้ในการพยากรณ์ข้อมูลใหม่ได้

เมื่อพิจารณาค่าความสามารถของแบบจำลองที่ถูกปรับแก้ให้เหมาะสมกับจำนวนตัวแปร (R^2 Adjusted) พบว่ามีค่าที่อยู่ในช่วง 0.971-0.980 ซึ่งยังคงเป็นค่าที่สูง และเป็นข้อบ่งชี้ว่าแม้ว่าจะมีการนำตัวแปรเพิ่มเติมเข้ามาในแบบจำลอง ค่าความสามารถของแบบจำลองก็ยังคงมีความแม่นยำและเสถียร

ค่าการพยากรณ์ของแบบจำลอง (Q^2) ซึ่งใช้วัดความสามารถของแบบจำลองในการพยากรณ์ค่าการตอบสนองในชุดข้อมูลที่ไม่ได้ใช้สร้างแบบจำลอง พบว่ามีค่าตั้งแต่ 0.808-0.914 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถใช้คาดการณ์ข้อมูลใหม่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ค่าที่ต่ำกว่า R^2 เล็กน้อยสะท้อนให้เห็นว่ามีปัจจัยอื่นที่อาจส่งผลต่อค่าการตอบสนอง แต่โดยรวมแล้วยังคงอยู่ในช่วงที่สามารถใช้งานได้อย่างมั่นใจ

ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง (Residual Standard Deviation, RSD) มีค่าตั้งแต่ 0.408-12.662 โดยพบว่ามีค่าสำหรับ Curcuminoid (0.408) ต่ำที่สุด ซึ่งหมายความว่าแบบจำลองสามารถทำนายค่าการตอบสนองของ Curcuminoid ได้อย่างแม่นยำที่สุด เนื่องจากมีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำ ในขณะที่ DPPH และ FRAP มีค่า RSD สูงกว่า (12.662 และ 11.679 ตามลำดับ) ซึ่งหมายความว่าค่าการตอบสนองของ DPPH และ FRAP อาจมีความแปรปรวนในข้อมูลสูงกว่าแบบจำลองอื่น อย่างไรก็ตาม ค่าความคลาดเคลื่อนที่พบยังคงอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้สำหรับการใช้งาน

จากการวิเคราะห์ Summary of Fit ในภาพที่ 4.66 พบว่าค่าของ R^2 , Model Validity และ Reproducibility มีค่าที่ใกล้เคียงกันในทุกค่าการตอบสนอง ซึ่งบ่งบอกถึงความเสถียรของแบบจำลอง ค่าของ Model Validity ที่ต่ำที่สุดอยู่ที่ 0.831 ใน DPPH ซึ่งอาจเป็นสัญญาณว่าแบบจำลองมีความไม่แน่นอนเล็กน้อยในการพยากรณ์ค่าการตอบสนองของ DPPH เมื่อเทียบกับตัวแปรอื่น อย่างไรก็ตาม ค่ายังคงอยู่ในระดับที่สามารถยอมรับได้ เนื่องจากค่าความสอดคล้องของแบบจำลองโดยรวมยังคงอยู่ในระดับที่ดี

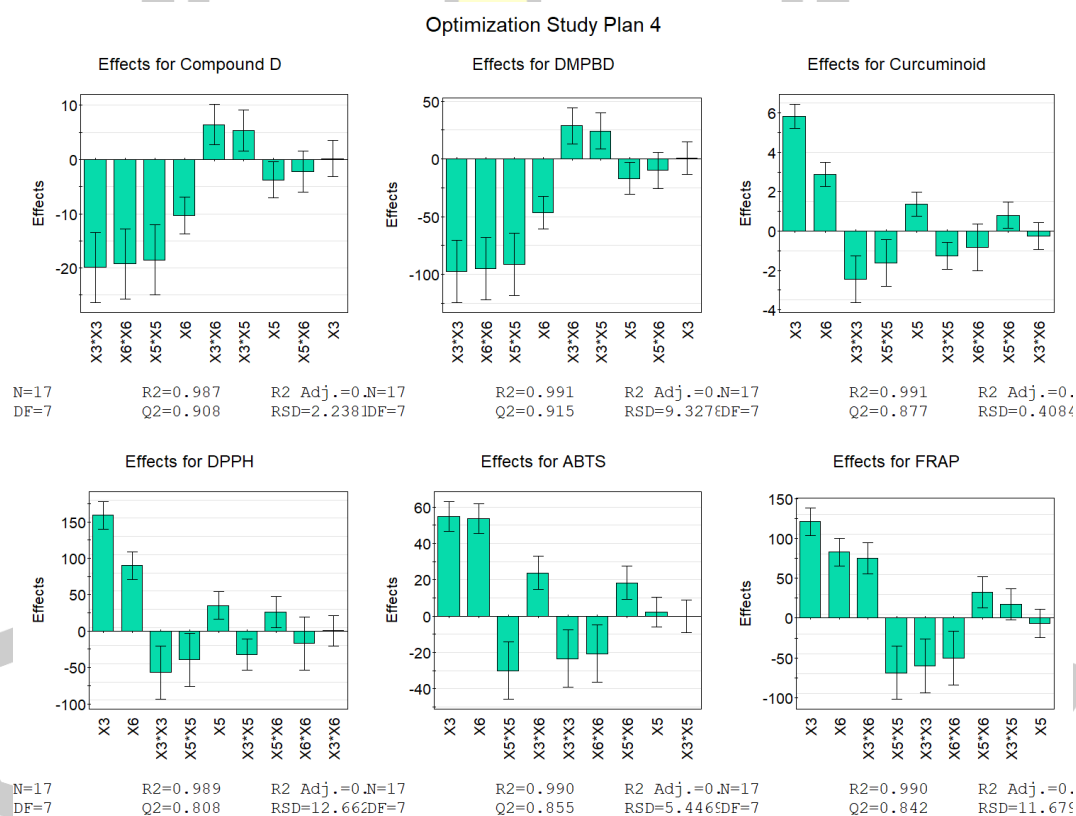


ภาพที่ 4.66 กราฟ Summary of Fit แสดงผลค่า R^2 และ Q^2 สำหรับแต่ละตัวแปรของ ขั้นตอน Optimization study Plan 4

ค่าความสามารถในการทำซ้ำ (Reproducibility) ซึ่งเป็นตัวชี้วัดว่าสามารถทำการทดลองซ้ำแล้วได้ค่าการตอบสนองที่ใกล้เคียงกันหรือไม่ มีค่าอยู่ในช่วง 0.950-0.977 ซึ่งใกล้เคียงกับ 1.00 ซึ่งหมายความว่าเมื่อทำการทดลองซ้ำภายใต้เงื่อนไขที่คล้ายกัน มีแนวโน้มสูงมากที่ค่าการตอบสนองที่ได้รับจะมีความคลาดเคลื่อนน้อย

4.3.4.2 การวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัย (Effect Analysis)

การวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยเป็นขั้นตอนที่สำคัญในการทำความเข้าใจถึงบทบาทของตัวแปรที่ใช้ในการสกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากเหง้าไพล ใน Optimization Study Plan 4 ได้มีการศึกษาผลของปัจจัยหลัก ซึ่งส่งผลต่อค่าการตอบสนองที่สำคัญ โดยใช้ Partial Least Squares Regression (PLS) เป็นเครื่องมือวิเคราะห์ (ภาพที่ 4.67)



ภาพที่ 4.67 ผลการวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยต่อค่าการตอบสนองใน Optimization Study Plan 4

การวิเคราะห์ผลกระทบหลัก (Main Effects Analysis) ของ Optimization Study Plan 4

การศึกษาผลกระทบหลักของตัวแปรใน Optimization Study Plan 4 มีเป้าหมายเพื่อทำความเข้าใจอิทธิพลของ X3 (ความเข้มข้นของ HPBCD), X5 (ระยะเวลาที่ใช้ในการสกัด) และ X6 (พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์) ต่อค่าการตอบสนองของสารที่ศึกษา โดยไม่รวมผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรและผลเชิงกำลังสอง การวิเคราะห์นี้ช่วยระบุปัจจัยที่มีอิทธิพลมากที่สุดต่อแต่ละค่าการตอบสนอง ซึ่งมีความสำคัญในการกำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการสกัดสารออกฤทธิ์

ผลการศึกษาพบว่า X6 มีผลกระทบต่อ Compound D มากที่สุด โดยมีค่า Effect เท่ากับ -10.3034 บ่งชี้ว่าการเพิ่มขึ้นของ X6 ส่งผลให้ค่าการตอบสนองลดลง X5 มีผลกระทบน้อยกว่า โดยมีค่า Effect เท่ากับ -3.7337 ในขณะที่ X3 มีค่าผลกระทบใกล้ศูนย์ แสดงให้เห็นว่าไม่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อ Compound D

สำหรับ DMPBD ตัวแปร X6 ยังคงเป็นปัจจัยหลักที่มีผลกระทบเชิงลบสูงสุด โดยมีค่า Effect เท่ากับ -46.4219 รองลงมาคือ X5 ที่มีผลกระทบเชิงลบในระดับที่น้อยกว่า ส่วน X3 มีค่า Effect ใกล้ศูนย์ บ่งบอกถึงอิทธิพลที่ต่ำต่อค่า DMPBD

ในกรณีของ Curcuminoid พบว่า X3 มีผลกระทบเชิงบวกสูงสุด โดยมีค่า Effect เท่ากับ 5.82675 ซึ่งหมายความว่า การเพิ่ม X3 สามารถเพิ่มค่าการตอบสนองของ Curcuminoid ได้ ในขณะที่ X6 และ X5 มีค่า Effect เท่ากับ 2.87601 และ 1.38002 ตามลำดับ ซึ่งบ่งชี้ถึงอิทธิพลในระดับที่น้อยกว่า

สำหรับ DPPH การตอบสนองได้รับผลกระทบจาก X3 มากที่สุด โดยมีค่า Effect สูงถึง 158.939 ซึ่งบ่งบอกถึงอิทธิพลของ X3 ต่อความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ X6 และ X5 มีค่า Effect เท่ากับ 89.9822 และ 35.2219 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าทั้งสามตัวแปรมีอิทธิพลต่อการเพิ่มค่าการตอบสนองของ DPPH

ค่าการตอบสนองของ ABTS ได้รับอิทธิพลจาก X3 และ X6 ในระดับใกล้เคียงกัน โดยมีค่า Effect เท่ากับ 54.9052 และ 53.5638 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าทั้งสองตัวแปรมีบทบาทสำคัญในการเพิ่มค่าการตอบสนองของ ABTS ส่วน X5 มีผลกระทบต่ำกว่ามาก โดยมีค่า Effect เท่ากับ 2.24611

ในกรณีของ FRAP พบว่า X3 ยังคงเป็นปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลสูงสุด โดยมีค่า Effect เท่ากับ 121.165 รองลงมาคือ X6 ซึ่งมีค่า Effect เท่ากับ 82.7054 ส่วน X5 มีค่า Effect เป็น -6.83938 ซึ่งเป็นผลกระทบเชิงลบเพียงเล็กน้อยต่อค่าการตอบสนองของ FRAP

โดยสรุป การวิเคราะห์ผลกระทบหลักแสดงให้เห็นว่า X3 เป็นตัวแปรที่มีบทบาทสำคัญที่สุดในหลายค่าการตอบสนอง โดยเฉพาะใน Curcuminoid, DPPH, ABTS และ FRAP ในขณะที่ X6 มี

อิทธิพลสูงต่อ Compound D และ DMPBD รวมถึงมีผลกระทบเชิงบวกต่อ DPPH, ABTS และ FRAP ส่วน X5 แม้ว่าจะมีผลกระทบบางส่วนต่อค่าการตอบสนองบางตัว แต่โดยรวมแล้วมีอิทธิพลต่ำกว่าตัวแปรอื่นๆ ผลการวิเคราะห์นี้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการกำหนดเงื่อนไขการสกัดที่เหมาะสมต่อไป

การวิเคราะห์ผลกระทบของการปฏิสัมพันธ์ (Interaction Effects Analysis) ใน Optimization Study Plan 4

การศึกษาผลกระทบของการปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรใน Optimization Study Plan 4 มีวัตถุประสงค์เพื่อทำความเข้าใจว่าปัจจัยต่างๆ มีอิทธิพลร่วมกันอย่างไรต่อค่าการตอบสนองของสารที่ศึกษา โดยพิจารณาคู่ปฏิสัมพันธ์ของ X3 (ความเข้มข้นของ HPBCD), X5 (ระยะเวลาที่ใช้ในการสกัด) และ X6 (พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์) ผลการวิเคราะห์นี้มีความสำคัญในการกำหนดสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดสารออกฤทธิ์ โดยคำนึงถึงผลกระทบของตัวแปรมากกว่าหนึ่งตัวที่อาจทำให้เกิดการเสริมฤทธิ์หรือหักล้างกัน

จากการศึกษาพบว่าปฏิสัมพันธ์ระหว่าง X3 และ X6 มีอิทธิพลสำคัญต่อค่าการตอบสนองหลายรายการ โดยเฉพาะในกรณีของ Compound D ซึ่งมีค่า Effect เท่ากับ 6.4306 และ DMPBD ที่มีค่า Effect เท่ากับ 28.8539 ซึ่งบ่งชี้ว่าการมีอยู่ของ X3 และ X6 พร้อมกันสามารถเพิ่มค่าการตอบสนองได้อย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ปฏิสัมพันธ์ระหว่าง X3 และ X5 มีผลกระทบในระดับรองลงมา โดยมีค่า Effect เท่ากับ 5.36052 สำหรับ Compound D และ 24.2083 สำหรับ DMPBD

ในกรณีของ Curcuminoid ผลกระทบจากปฏิสัมพันธ์ของตัวแปรอยู่ในระดับที่ต่ำกว่าการวิเคราะห์ผลกระทบหลัก โดยปฏิสัมพันธ์ระหว่าง X3 และ X5 มีค่า Effect เป็น -1.26289 แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มการลดลงของค่าการตอบสนอง ในขณะที่ X3 และ X6 มีค่า Effect เท่ากับ -0.236047 ซึ่งมีผลกระทบเพียงเล็กน้อยต่อค่าการตอบสนองของ Curcuminoid

สำหรับค่าการตอบสนองของ DPPH พบว่าปฏิสัมพันธ์ระหว่าง X3 และ X5 มีผลกระทบเชิงลบอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่า Effect เท่ากับ -32.1252 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการมีอยู่ของทั้งสองตัวแปรนี้พร้อมกันอาจลดประสิทธิภาพของการสกัดสารต้านอนุมูลอิสระ ในทางกลับกัน ปฏิสัมพันธ์ระหว่าง X5 และ X6 ส่งผลเชิงบวก โดยมีค่า Effect เท่ากับ 26.1551 แสดงให้เห็นว่าการมีอยู่ร่วมกันของสองปัจจัยนี้อาจช่วยเพิ่มค่าการตอบสนองของ DPPH

ค่าการตอบสนองของ ABTS ได้รับอิทธิพลจากปฏิสัมพันธ์ของ X3 และ X6 ในเชิงบวก โดยมีค่า Effect เท่ากับ 23.7918 ซึ่งหมายความว่าค่าการมีอยู่ของทั้งสองตัวแปรนี้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดได้ ในขณะที่ปฏิสัมพันธ์ของ X5 และ X6 มีผลกระทบในลักษณะเดียวกัน โดยมีค่า Effect เท่ากับ 18.3793

ในกรณีของ FRAP พบว่าปฏิสัมพันธ์ระหว่าง X3 และ X6 มีอิทธิพลเชิงบวกอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่า Effect เท่ากับ 74.9104 ซึ่งเป็นค่าที่สูงที่สุดในกลุ่มตัวแปรปฏิสัมพันธ์ ในขณะที่ X5 และ X6 มีค่า Effect เท่ากับ 32.4015 และปฏิสัมพันธ์ระหว่าง X3 และ X5 มีค่า Effect เท่ากับ 17.3223 แสดงให้เห็นว่าผลกระทบของปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเหล่านี้สามารถเพิ่มค่าการตอบสนองของ FRAP ได้อย่างชัดเจน

การวิเคราะห์ผลกระทบของการปฏิสัมพันธ์แสดงให้เห็นว่า X3 และ X6 มีแนวโน้มที่จะเสริมฤทธิ์กันในหลายค่าการตอบสนอง โดยเฉพาะใน Compound D, DMPBD, ABTS และ FRAP ในขณะที่ปฏิสัมพันธ์ของ X5 และ X6 มีแนวโน้มเชิงบวกต่อ DPPH และ ABTS แต่ส่งผลต่อ DMPBD และ FRAP ในระดับที่ต่ำกว่า นอกจากนี้ ปฏิสัมพันธ์ระหว่าง X3 และ X5 มีผลกระทบในลักษณะเชิงลบต่อ Curcuminoid และ DPPH ซึ่งเป็นประเด็นที่ควรพิจารณาในการกำหนดเงื่อนไขการสกัดที่เหมาะสม ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์นี้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงกระบวนการสกัดเพื่อให้ได้ค่าการตอบสนองที่เหมาะสมที่สุด

การวิเคราะห์ผลกระทบเชิงกำลังสอง (Quadratic Effects Analysis) ใน Optimization Study Plan 4

การศึกษาผลกระทบเชิงกำลังสองใน Optimization Study Plan 4 มีเป้าหมายเพื่อทำความเข้าใจว่าการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรอิสระในรูปแบบกำลังสองส่งผลต่อค่าการตอบสนองอย่างไร ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ X3 (ความเข้มข้นของ HPBCD), X5 (ระยะเวลาที่ใช้ในการสกัด) และ X6 (พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์) การวิเคราะห์นี้ช่วยให้สามารถระบุได้ว่าการเพิ่มหรือลดค่าของตัวแปรแต่ละตัวส่งผลในลักษณะเชิงเส้นหรือไม่ และสามารถนำข้อมูลที่ได้ไปปรับปรุงกระบวนการสกัดให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

จากการศึกษาพบว่าผลกระทบเชิงกำลังสองของ X3 มีนัยสำคัญต่อค่าการตอบสนองหลายรายการ โดยเฉพาะ Compound D ซึ่งมีค่า Effect เท่ากับ -19.9064 และ DMPBD ที่มีค่า Effect เท่ากับ -97.6866 ซึ่งบ่งชี้ว่าการเพิ่มขึ้นของ X3 ในระดับสูงส่งผลให้ค่าการตอบสนองลดลง ในขณะที่ผลกระทบของ X3 ต่อ Curcuminoid, DPPH, ABTS และ FRAP มีแนวโน้มในทิศทางเดียวกัน โดยเฉพาะใน FRAP ซึ่งมีค่า Effect เท่ากับ -60.3129 แสดงให้เห็นว่า X3 มีผลเชิงลบต่อค่าการตอบสนองเมื่อใช้ในปริมาณที่สูงเกินไป

ในกรณีของ X5 พบว่าผลกระทบเชิงกำลังสองมีความชัดเจนใน DMPBD และ Compound D โดยมีค่า Effect เท่ากับ -91.5808 และ -18.5082 ตามลำดับ ในขณะที่ค่าการตอบสนองของ Curcuminoid ได้รับผลกระทบในระดับที่ต่ำกว่า โดยมีค่า Effect เท่ากับ -1.61958 ส่วนผลกระทบ

ของ X5 ใน DPPH และ ABTS แสดงให้เห็นแนวโน้มที่ลดลงเมื่อค่าของตัวแปรเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะใน DPPH ซึ่งมีค่า Effect เท่ากับ -39.3144

X6 มีผลกระทบเชิงกำลังสองที่คล้ายคลึงกับ X3 และ X5 โดยเฉพาะใน Compound D และ DMPBD ซึ่งมีค่า Effect เท่ากับ -19.2479 และ -94.9041 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการใช้พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ในระดับสูงอาจลดประสิทธิภาพของกระบวนการสกัด ในกรณีของ Curcuminoid ค่า Effect ของ X6 มีค่า -0.829717 ซึ่งบ่งชี้ว่าผลกระทบอยู่ในระดับที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับ Compound D และ DMPBD ในขณะที่ค่าการตอบสนองของ DPPH, ABTS และ FRAP ได้รับผลกระทบเชิงลบจาก X6 ในระดับที่แตกต่างกัน โดย FRAP มีค่า Effect เท่ากับ -50.4677 ซึ่งเป็นค่าที่สูงที่สุดในกลุ่มการตอบสนองเชิงกำลังสองของ X6

การวิเคราะห์ผลกระทบเชิงกำลังสองแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของ X3, X5 และ X6 ในระดับที่สูงเกินไปอาจลดค่าการตอบสนองของสารที่ศึกษาได้ ซึ่งสะท้อนถึงพฤติกรรมที่ไม่เป็นเชิงเส้นของกระบวนการสกัด โดยเฉพาะใน DMPBD และ Compound D ที่มีผลกระทบเชิงลบอย่างชัดเจนจากทุกตัวแปร ในขณะที่ผลกระทบต่อ Curcuminoid และ FRAP มีแนวโน้มที่ต้องพิจารณาควบคู่กับปัจจัยอื่น ๆ เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์นี้สามารถนำไปใช้ในการปรับแต่งกระบวนการให้เหมาะสมกับการสกัดสารออกฤทธิ์สูงสุดในเงื่อนไขที่มีความสมดุล

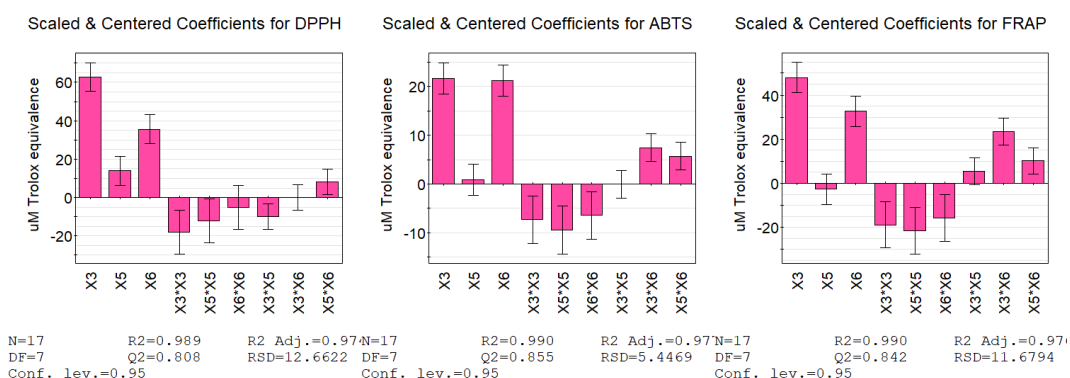
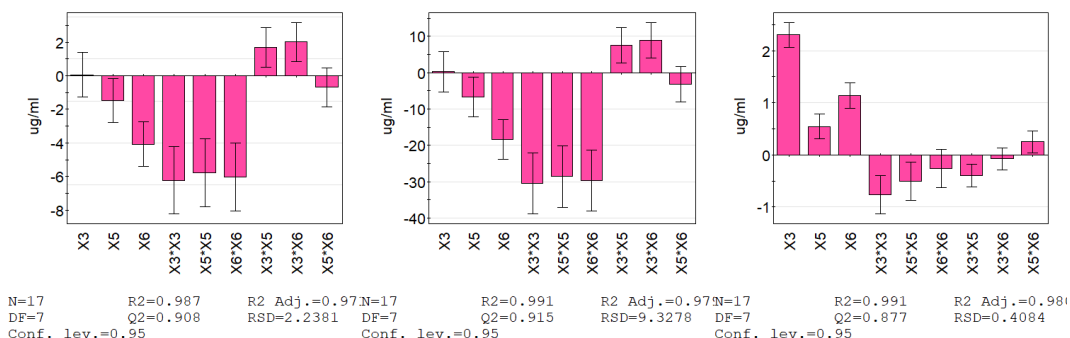
4.3.4.3 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Model Building) ใน Optimization Study Plan 4

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นกระบวนการสำคัญในการวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้รับจาก Optimization Study Plan 4 ซึ่งช่วยให้สามารถอธิบายความสัมพันธ์เชิงปริมาณระหว่างตัวแปรอิสระและค่าการตอบสนองได้อย่างเป็นระบบ การสร้างแบบจำลองในงานวิจัยนี้ใช้ Partial Least Squares Regression (PLS) ซึ่งเป็นเทคนิคที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลที่มีความสัมพันธ์ซับซ้อนและมีตัวแปรอิสระหลายตัว

พหุ ประสิทธิภาพ

Optimization Study Plan 4

Scaled & Centered Coefficients for Compound Scaled & Centered Coefficients for DMPBD Scaled & Centered Coefficients for Curcuminol



MOODE 7 - 8/2/2558 19:17:32

ภาพที่ 4.68 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของปัจจัยที่มีผลต่อค่าการตอบสนอง ใน Optimization

Study Plan 4

- การสร้างแบบจำลองสำหรับ Compound D ของ Optimization Study Plan 4

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใน Optimization Study Plan 4 ถูกพัฒนาขึ้นเพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและค่าการตอบสนองของ Compound D โดยใช้ตัวแปรหลัก ได้แก่ X3 ความเข้มข้นของ HPBCD, X5 ระยะเวลาที่ใช้ในการสกัด และ X6 พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ นอกจากนี้ยังพิจารณาผลกระทบเชิงกำลังสองและปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร เพื่อให้ได้แบบจำลองที่สามารถทำนายค่าการตอบสนองได้อย่างแม่นยำและเป็นแนวทางสำหรับการปรับปรุงกระบวนการสกัด

สมการถดถอยเชิงเส้นกำลังสองที่แสดงค่าการตอบสนองของ Compound D คือ

$$Y1 = 269.128 + 0.0562X3 - 1.4759X5 - 4.0728X6 - 6.2208X3^2 - 5.7838X5^2 - 6.0150X6^2 + 1.6752X3X5 + 2.0096X3X6 - 0.6937X5X6$$

ผลการวิเคราะห์ค่าความน่าจะเป็น P-value ระบุว่าตัวแปรที่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ ได้แก่ X5 $P = 0.0335$ และ X6 $P = 0.0002$ โดยเฉพาะ X6 ซึ่งมีอิทธิพลเชิงลบที่ชัดเจน หมายความว่า การเพิ่มพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ลดค่าการตอบสนองของ Compound D อย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ X3 ไม่มีผลกระทบที่สำคัญทางสถิติ $P = 0.9228$

ในการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ พบว่า X6 มีค่าสัมประสิทธิ์ -4.0728 ซึ่งหมายความว่า การเพิ่ม X6 หนึ่งหน่วยส่งผลให้ค่าการตอบสนองลดลงเฉลี่ย 4.0728 หน่วย X5 มีค่าสัมประสิทธิ์ -1.4759 บ่งชี้ว่าการเพิ่มระยะเวลาการสกัดมีแนวโน้มลดค่าการตอบสนองแต่มีผลกระทบน้อยกว่า X6 ส่วน X3 มีค่าสัมประสิทธิ์ 0.0562 ซึ่งใกล้ศูนย์และไม่มีผลชัดเจนต่อค่าการตอบสนอง

ในส่วนของผลกระทบเชิงกำลังสอง พบว่า $X3^2$, $X5^2$ และ $X6^2$ มีค่าติดลบทั้งหมด โดยเฉพาะ $X3^2$ ที่มีค่าสัมประสิทธิ์ -6.2208 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่ม X3 ในระดับสูงส่งผลให้ค่าการตอบสนองลดลงมากกว่าการเพิ่ม X5 หรือ X6

สำหรับปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร พบว่าการทำงานร่วมกันของ X3 และ X6 $P = 0.0048$ และ X3 และ X5 $P = 0.0116$ มีผลเชิงบวกต่อค่าการตอบสนองของ Compound D หมายความว่า การปรับค่า X3 ควบคู่กับ X5 หรือ X6 สามารถเพิ่มค่าการตอบสนองได้ ค่าสัมประสิทธิ์ของ $X3X6$ และ $X3X5$ คือ 2.0096 และ 1.6752 ตามลำดับ ซึ่งสะท้อนถึงผลกระทบเชิงบวกในระดับปานกลาง ในทางกลับกัน ปฏิสัมพันธ์ระหว่าง X5 และ X6 ไม่มีนัยสำคัญ $P = 0.2035$ และมีค่าสัมประสิทธิ์ -0.6937 ซึ่งบ่งบอกว่าการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรทั้งสองนี้พร้อมกันไม่ได้ส่งผลต่อค่าการตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ

ประสิทธิภาพของแบบจำลองได้รับการประเมินผ่านค่าความสามารถในการทำนาย Q^2 และ ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย R^2 โดยพบว่า Q^2 มีค่า 0.908 และ R^2 มีค่า 0.987 บ่งบอกถึงความแม่นยำสูงในการอธิบายความแปรปรวนของข้อมูล นอกจากนี้ ค่า R^2 ที่ปรับแก้แล้ว $R^2 \text{ Adj.}$ มีค่า 0.971 และ ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของแบบจำลอง RSD เท่ากับ 2.2381 ซึ่งอยู่ในระดับที่เหมาะสมสำหรับการทำนายค่าการตอบสนอง

แบบจำลองนี้สามารถอธิบายผลกระทบของ X3, X5 และ X6 ต่อค่าการตอบสนองของ Compound D ได้อย่างแม่นยำ โดยพบว่า X6 มีอิทธิพลเชิงลบที่ชัดเจนและมีผลกระทบมากที่สุด ในขณะที่ X3 ไม่มีผลกระทบที่สำคัญ ส่วนปฏิสัมพันธ์ระหว่าง X3 กับ X6 และ X3 กับ X5 มีแนวโน้มช่วยเพิ่มค่าการตอบสนองของ Compound D ข้อมูลจากแบบจำลองนี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการกำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการสกัดเพื่อให้ได้ค่าการตอบสนองที่ดีที่สุด

● การสร้างแบบจำลองสำหรับ DMPBD ของ Optimization Study Plan 4

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใน Optimization Study Plan 4 ถูกพัฒนาขึ้นเพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและค่าการตอบสนองของ DMPBD โดยใช้ตัวแปรหลัก ได้แก่ X3 ความเข้มข้นของ HPBCD, X5 ระยะเวลาที่ใช้ในการสกัด และ X6 พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ นอกจากนี้ยังพิจารณาผลกระทบเชิงกำลังสองและปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร เพื่อให้ได้แบบจำลองที่สามารถทำนายค่าการตอบสนองได้อย่างแม่นยำและเป็นแนวทางสำหรับการปรับปรุงกระบวนการสกัด

สมการถดถอยเชิงเส้นกำลังสองที่แสดงค่าการตอบสนองของ DMPBD คือ

$$Y2 = 514.923 + 0.2689X3 - 6.6927X5 - 18.3499X6 - 30.5271X3^2 - 28.6190X5^2 - 29.6575X6^2 + 7.5651X3X5 + 9.0168X3X6 - 3.1072X5X6$$

ผลการวิเคราะห์ค่าความน่าจะเป็น P-value ระบุว่าตัวแปรที่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ ได้แก่ X5 P = 0.0240 และ X6 P = 0.0001 โดยเฉพาะ X6 ซึ่งมีอิทธิพลเชิงลบที่ชัดเจน หมายความว่า การเพิ่มพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ลดค่าการตอบสนองของ DMPBD อย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ X3 ไม่มีผลกระทบที่สำคัญทางสถิติ P = 0.9114

ในการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ พบว่า X6 มีค่าสัมประสิทธิ์ -18.3499 ซึ่งหมายความว่า การเพิ่ม X6 หนึ่งหน่วยส่งผลให้ค่าการตอบสนองลดลงเฉลี่ย 18.3499 หน่วย X5 มีค่าสัมประสิทธิ์ -6.6927 บ่งชี้ว่าการเพิ่มระยะเวลาการสกัดมีแนวโน้มลดค่าการตอบสนองแต่มีผลกระทบน้อยกว่า X6 ส่วน X3 มีค่าสัมประสิทธิ์ 0.2689 ซึ่งใกล้ศูนย์และไม่มีผลชัดเจนต่อค่าการตอบสนอง

ในส่วนของผลกระทบเชิงกำลังสอง พบว่า $X3^2$, $X5^2$ และ $X6^2$ มีค่าติดลบทั้งหมด โดยเฉพาะ $X3^2$ ที่มีค่าสัมประสิทธิ์ -30.5271 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่ม X3 ในระดับสูงส่งผลให้ค่าการตอบสนองลดลงมากกว่าการเพิ่ม X5 หรือ X6

สำหรับปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร พบว่าการทำงานร่วมกันของ X3 และ X6 P = 0.0033 และ X3 และ X5 P = 0.0080 มีผลเชิงบวกต่อค่าการตอบสนองของ DMPBD หมายความว่า การปรับค่า X3 ควบคู่กับ X5 หรือ X6 สามารถเพิ่มค่าการตอบสนองได้ ค่าสัมประสิทธิ์ของ $X3X6$ และ $X3X5$ คือ 9.0168 และ 7.5651 ตามลำดับ ซึ่งสะท้อนถึงผลกระทบเชิงบวกในระดับปานกลางในทางกลับกัน ปฏิสัมพันธ์ระหว่าง X5 และ X6 ไม่มีนัยสำคัญ P = 0.1754 และมีค่าสัมประสิทธิ์ -3.1072 ซึ่งบ่งบอกว่าการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรทั้งสองนี้พร้อมกันไม่ได้ส่งผลต่อค่าการตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ

ประสิทธิภาพของแบบจำลองได้รับการประเมินผ่านค่าความสามารถในการทำนาย Q^2 และค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย R^2 โดยพบว่า Q^2 มีค่า 0.915 และ R^2 มีค่า 0.991 บ่งบอกถึงความแม่นยำสูงในการอธิบายความแปรปรวนของข้อมูล นอกจากนี้ ค่า R^2 ที่ปรับแก้แล้ว R^2 Adj. มีค่า 0.979 และค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของแบบจำลอง RSD เท่ากับ 9.3278 ซึ่งอยู่ในระดับที่เหมาะสมสำหรับการทำนายค่าการตอบสนอง

แบบจำลองนี้สามารถอธิบายผลกระทบของ X_3 , X_5 และ X_6 ต่อค่าการตอบสนองของ DMPBD ได้อย่างแม่นยำ โดยพบว่า X_6 มีอิทธิพลเชิงลบที่ชัดเจนและมีผลกระทบมากที่สุด ขณะที่ X_3 ไม่มีผลกระทบที่สำคัญ ส่วนปฏิสัมพันธ์ระหว่าง X_3 กับ X_6 และ X_3 กับ X_5 มีแนวโน้มช่วยเพิ่มค่าการตอบสนองของ DMPBD ข้อมูลจากแบบจำลองนี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการกำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการสกัดเพื่อให้ได้ค่าการตอบสนองที่ดีที่สุด

● การสร้างแบบจำลองสำหรับ Curcuminoid ของ Optimization Study Plan 4

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใน Optimization Study Plan 4 ถูกพัฒนาขึ้นเพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและค่าการตอบสนองของ Curcuminoid โดยใช้ตัวแปรหลัก ได้แก่ X_3 ความเข้มข้นของ HPBCD, X_5 ระยะเวลาที่ใช้ในการสกัด และ X_6 พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ นอกจากนี้ยังพิจารณาผลกระทบเชิงกำลังสองและปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร เพื่อให้ได้แบบจำลองที่สามารถทำนายค่าการตอบสนองได้อย่างแม่นยำและเป็นแนวทางสำหรับการปรับปรุงกระบวนการสกัด

สมการถดถอยเชิงเส้นกำลังสองที่แสดงค่าการตอบสนองของ Curcuminoid คือ

$$Y_3 = 17.8149 + 2.3032X_3 + 0.5455X_5 + 1.1368X_6 - 0.7669X_3^2 - 0.5061X_5^2 - 0.2593X_6^2 - 0.3947X_3X_5 - 0.0738X_3X_6 + 0.2525X_5X_6$$

ผลการวิเคราะห์ค่าความน่าจะเป็น P-value ระบุว่าตัวแปรที่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ ได้แก่ X_3 $P < 0.0001$, X_5 $P = 0.0011$ และ X_6 $P < 0.0001$ โดยเฉพาะ X_3 ซึ่งมีอิทธิพลเชิงบวกที่ชัดเจน หมายความว่า การเพิ่มความเข้มข้นของ HPBCD ส่งผลให้ค่าการตอบสนองของ Curcuminoid เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

ในการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ พบว่า X_3 มีค่าสัมประสิทธิ์ 2.3032 ซึ่งหมายความว่า การเพิ่ม X_3 หนึ่งหน่วยส่งผลให้ค่าการตอบสนองเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 2.3032 หน่วย X_6 มีค่าสัมประสิทธิ์ 1.1368

บ่งชี้ว่าการเพิ่มพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ส่งผลให้ค่าการตอบสนองเพิ่มขึ้นแต่มีผลกระทบน้อยกว่า X3 ส่วน X5 มีค่าสัมประสิทธิ์ 0.5455 ซึ่งแสดงถึงผลกระทบที่มีขนาดเล็กที่สุด

ในส่วนของผลกระทบเชิงกำลังสอง พบว่า $X3^2$, $X5^2$ และ $X6^2$ มีค่าติดลบทั้งหมด โดยเฉพาะ $X3^2$ ที่มีค่าสัมประสิทธิ์ -0.7669 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่ม X3 ในระดับสูงส่งผลให้ค่าการตอบสนองลดลงมากกว่าการเพิ่ม X5 หรือ X6

สำหรับปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร พบว่าการทำงานร่วมกันของ X5 และ X6 $P = 0.0266$ มีผลเชิงบวกต่อค่าการตอบสนองของ Curcuminoid หมายความว่าค่าการปรับค่า X5 ควบคู่กับ X6 สามารถเพิ่มค่าการตอบสนองได้ ค่าสัมประสิทธิ์ของ $X5X6$ คือ 0.2525 ซึ่งสะท้อนถึงผลกระทบเชิงบวกในระดับต่ำในทางกลับกัน ปฏิสัมพันธ์ระหว่าง X3 และ X6 ไม่มีนัยสำคัญ $P = 0.4407$ และมีค่าสัมประสิทธิ์ -0.0738 ซึ่งบ่งบอกว่าการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรทั้งสองนี้พร้อมกันไม่ได้ส่งผลต่อค่าการตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ

ประสิทธิภาพของแบบจำลองได้รับการประเมินผ่านค่าความสามารถในการทำนาย Q^2 และค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย R^2 โดยพบว่า Q^2 มีค่า 0.877 และ R^2 มีค่า 0.991 บ่งบอกถึงความแม่นยำสูงในการอธิบายความแปรปรวนของข้อมูล นอกจากนี้ ค่า R^2 ที่ปรับแก้แล้ว $R^2 \text{ Adj.}$ มีค่า 0.980 และค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของแบบจำลอง RSD เท่ากับ 0.4084 ซึ่งอยู่ในระดับที่เหมาะสมสำหรับการทำนายค่าการตอบสนอง

แบบจำลองนี้สามารถอธิบายผลกระทบของ X3, X5 และ X6 ต่อค่าการตอบสนองของ Curcuminoid ได้อย่างแม่นยำ โดยพบว่า X3 มีอิทธิพลเชิงบวกที่ชัดเจนและมีผลกระทบมากที่สุด ขณะที่ X5 และ X6 มีผลกระทบเชิงบวกแต่ในระดับที่ต่ำกว่า ส่วนปฏิสัมพันธ์ระหว่าง X5 กับ X6 มีแนวโน้มช่วยเพิ่มค่าการตอบสนองของ Curcuminoid ข้อมูลจากแบบจำลองนี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการกำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการสกัดเพื่อให้ได้ค่าการตอบสนองที่ดีที่สุด

● การสร้างแบบจำลองสำหรับค่าการตอบสนอง DPPH ของ Optimization Study Plan 4

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใน Optimization Study Plan 4 ถูกพัฒนาขึ้นเพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและค่าการตอบสนองของ DPPH โดยใช้ตัวแปรหลัก ได้แก่ X3 ความเข้มข้นของ HPBCD, X5 ระยะเวลาที่ใช้ในการสกัด และ X6 พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ นอกจากนี้ยังพิจารณาผลกระทบเชิงกำลังสองและปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร เพื่อให้ได้แบบจำลองที่สามารถทำนายค่าการตอบสนองได้อย่างแม่นยำและเป็นแนวทางสำหรับการปรับปรุงกระบวนการสกัด

สมการถดถอยเชิงเส้นกำลังสองที่แสดงค่าการตอบสนองของ DPPH คือ

$$Y_4 = 397.179 + 62.8260X_3 + 13.9227X_5 + 35.5686X_6 - 17.8320X_3^2 - 12.2857X_5^2 - 5.2874X_6^2 - 10.0391X_3X_5 + 0.1189X_3X_6 + 8.1735X_5X_6$$

ผลการวิเคราะห์ค่าความน่าจะเป็น P-value ระบุว่าตัวแปรที่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ ได้แก่ X_3 $P < 0.0001$, X_5 $P = 0.0032$ และ X_6 $P < 0.0001$ โดยเฉพาะ X_3 ซึ่งมีอิทธิพลเชิงบวกที่ชัดเจน หมายความว่า การเพิ่มความเข้มข้นของ HPBCD ส่งผลให้ค่าการตอบสนองของ DPPH เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

ในการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ พบว่า X_3 มีค่าสัมประสิทธิ์ 62.8260 ซึ่งหมายความว่า การเพิ่ม X_3 หนึ่งหน่วยส่งผลให้ค่าการตอบสนองเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 62.8260 หน่วย X_6 มีค่าสัมประสิทธิ์ 35.5686 บ่งชี้ว่าการเพิ่มพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ส่งผลให้ค่าการตอบสนองเพิ่มขึ้นแต่มีผลกระทบน้อยกว่า X_3 ส่วน X_5 มีค่าสัมประสิทธิ์ 13.9227 ซึ่งแสดงถึงผลกระทบที่มีขนาดเล็กที่สุด

ในส่วนของผลกระทบเชิงกำลังสอง พบว่า X_3^2 , X_5^2 และ X_6^2 มีค่าติดลบทั้งหมด โดยเฉพาะ X_3^2 ที่มีค่าสัมประสิทธิ์ -17.8320 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่ม X_3 ในระดับสูงส่งผลให้ค่าการตอบสนองลดลงมากกว่าการเพิ่ม X_5 หรือ X_6

สำหรับปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร พบว่าการทำงานร่วมกันของ X_5 และ X_6 $P = 0.0223$ มีผลเชิงบวกต่อค่าการตอบสนองของ DPPH หมายความว่า การปรับค่า X_5 ควบคู่กับ X_6 สามารถเพิ่มค่าการตอบสนองได้ ค่าสัมประสิทธิ์ของ X_5X_6 คือ 8.1735 ซึ่งสะท้อนถึงผลกระทบเชิงบวกในระดับต่ำ ในทางกลับกัน ปฏิสัมพันธ์ระหว่าง X_3 และ X_6 ไม่มีนัยสำคัญ $P = 0.9673$ และมีค่าสัมประสิทธิ์ 0.1189 ซึ่งบ่งบอกว่าการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรทั้งสองนี้พร้อมกันไม่ได้ส่งผลต่อค่าการตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ

ประสิทธิภาพของแบบจำลองได้รับการประเมินผ่านค่าความสามารถในการทำนาย Q^2 และค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย R^2 โดยพบว่า Q^2 มีค่า 0.808 และ R^2 มีค่า 0.989 บ่งบอกถึงความแม่นยำสูงในการอธิบายความแปรปรวนของข้อมูล นอกจากนี้ ค่า R^2 ที่ปรับแก้แล้ว R^2 Adj. มีค่า 0.974 และค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของแบบจำลอง RSD เท่ากับ 12.6622 ซึ่งอยู่ในระดับที่เหมาะสมสำหรับการทำนายค่าการตอบสนอง

แบบจำลองนี้สามารถอธิบายผลกระทบของ X_3 , X_5 และ X_6 ต่อค่าการตอบสนองของ DPPH ได้อย่างแม่นยำ โดยพบว่า X_3 มีอิทธิพลเชิงบวกที่ชัดเจนและมีผลกระทบมากที่สุด ขณะที่ X_5 และ X_6 มีผลกระทบเชิงบวกแต่ในระดับที่ต่ำกว่า ส่วนปฏิสัมพันธ์ระหว่าง X_5 กับ X_6 มีแนวโน้มช่วยเพิ่มค่าการตอบสนองของ DPPH ข้อมูลจากแบบจำลองนี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการกำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการสกัดเพื่อให้ได้ค่าการตอบสนองที่ดีที่สุด

● การสร้างแบบจำลองสำหรับค่าการตอบสนอง ABTS ของ Optimization Study Plan 4

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใน Optimization Study Plan 4 ถูกพัฒนาขึ้นเพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและค่าการตอบสนองของ ABTS โดยใช้ตัวแปรหลัก ได้แก่ X3 ความเข้มข้นของ HPBCD, X5 ระยะเวลาที่ใช้ในการสกัด และ X6 พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ นอกจากนี้ยังพิจารณาผลกระทบเชิงกำลังสองและปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร เพื่อให้ได้แบบจำลองที่สามารถทำนายค่าการตอบสนองได้อย่างแม่นยำและเป็นแนวทางสำหรับการปรับปรุงกระบวนการสกัด

สมการถดถอยเชิงเส้นกำลังสองที่แสดงค่าการตอบสนองของ ABTS คือ

$$Y_5 = 216.742 + 21.7032X_3 + 0.8879X_5 + 21.1729X_6 - 7.3117X_3^2 - 9.3828X_5^2 - 6.4437X_6^2 - 0.0535X_3X_5 + 7.4349X_3X_6 + 5.7435X_5X_6$$

ผลการวิเคราะห์ค่าความน่าจะเป็น P-value ระบุว่าตัวแปรที่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ ได้แก่ X3 $P < 0.0001$, X6 $P < 0.0001$ และ X5 $P = 0.5352$ โดยเฉพาะ X3 และ X6 ซึ่งมีอิทธิพลเชิงบวกที่ชัดเจน หมายความว่า การเพิ่มความเข้มข้นของ HPBCD และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ส่งผลให้ค่าการตอบสนองของ ABTS เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ขณะที่ X5 ไม่มีผลกระทบที่สำคัญทางสถิติ

ในการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ พบว่า X3 มีค่าสัมประสิทธิ์ 21.7032 ซึ่งหมายความว่า การเพิ่ม X3 หนึ่งหน่วยส่งผลให้ค่าการตอบสนองเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 21.7032 หน่วย X6 มีค่าสัมประสิทธิ์ 21.1729 บ่งชี้ว่าการเพิ่มพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ส่งผลให้ค่าการตอบสนองเพิ่มขึ้นในระดับใกล้เคียงกับ X3 ส่วน X5 มีค่าสัมประสิทธิ์ 0.8879 ซึ่งแสดงถึงผลกระทบที่มีขนาดเล็กที่สุด

ในส่วนของผลกระทบเชิงกำลังสอง พบว่า X_3^2 , X_5^2 และ X_6^2 มีค่าติดลบทั้งหมด โดยเฉพาะ X_5^2 ที่มีค่าสัมประสิทธิ์ -9.3828 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่ม X5 ในระดับสูงส่งผลให้ค่าการตอบสนองลดลงมากกว่าการเพิ่ม X3 หรือ X6

สำหรับปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร พบว่าการทำงานร่วมกันของ X3 และ X6 $P = 0.0005$ และ X5 และ X6 $P = 0.0020$ มีผลเชิงบวกต่อค่าการตอบสนองของ ABTS หมายความว่า การปรับค่า X3 ควบคู่กับ X6 หรือ X5 ควบคู่กับ X6 สามารถเพิ่มค่าการตอบสนองได้ ค่าสัมประสิทธิ์ของ X_3X_6 และ X_5X_6 คือ 7.4349 และ 5.7435 ตามลำดับ ซึ่งสะท้อนถึงผลกระทบเชิงบวกในระดับปานกลาง ในทางกลับกัน ปฏิสัมพันธ์ระหว่าง X3 และ X5 ไม่มีนัยสำคัญ $P = 0.9658$ และมีค่าสัมประสิทธิ์ -0.0535 ซึ่งบ่งบอกว่าการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรทั้งสองนี้พร้อมกันไม่ได้ส่งผลต่อค่าการตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ

ประสิทธิภาพของแบบจำลองได้รับการประเมินผ่านค่าความสามารถในการทำนาย Q^2 และค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย R^2 โดยพบว่า Q^2 มีค่า 0.855 และ R^2 มีค่า 0.990 บ่งบอกถึงความแม่นยำสูงในการอธิบายความแปรปรวนของข้อมูล นอกจากนี้ ค่า R^2 ที่ปรับแก้แล้ว R^2 Adj. มีค่า 0.977 และค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของแบบจำลอง RSD เท่ากับ 5.4469 ซึ่งอยู่ในระดับที่เหมาะสมสำหรับการทำนายค่าการตอบสนอง

แบบจำลองนี้สามารถอธิบายผลกระทบของ X3, X5 และ X6 ต่อค่าการตอบสนองของ ABTS ได้อย่างแม่นยำ โดยพบว่า X3 และ X6 มีอิทธิพลเชิงบวกที่ชัดเจนและมีผลกระทบมากที่สุด ขณะที่ X5 ไม่มีผลกระทบที่สำคัญ ส่วนปฏิสัมพันธ์ระหว่าง X3 กับ X6 และ X5 กับ X6 มีแนวโน้มช่วยเพิ่มค่าการตอบสนองของ ABTS ข้อมูลจากแบบจำลองนี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการกำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการสกัดเพื่อให้ได้ค่าการตอบสนองที่ดีที่สุด

● การสร้างแบบจำลองสำหรับค่าการตอบสนอง FRAP ของ Optimization Study Plan 4

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใน Optimization Study Plan 4 ถูกพัฒนาขึ้นเพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและค่าการตอบสนองของ FRAP โดยใช้ตัวแปรหลัก ได้แก่ X3 ความเข้มข้นของ HPBCD, X5 ระยะเวลาที่ใช้ในการสกัด และ X6 พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ นอกจากนี้ยังพิจารณาผลกระทบเชิงกำลังสองและปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร เพื่อให้ได้แบบจำลองที่สามารถทำนายค่าการตอบสนองได้อย่างแม่นยำและเป็นแนวทางสำหรับการปรับปรุงกระบวนการสกัด

สมการถดถอยเชิงเส้นกำลังสองที่แสดงค่าการตอบสนองของ FRAP คือ

$$Y_6 = 426.637 + 47.8947X_3 - 2.7035X_5 + 32.6922X_6 - 18.8478X_3^2 - 21.4329X_5^2 - 15.7711X_6^2 + 5.4132X_3X_5 + 23.4095X_3X_6 + 10.1255X_5X_6$$

ผลการวิเคราะห์ค่าความน่าจะเป็น P-value ระบุว่าตัวแปรที่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ ได้แก่ X3 $P < 0.0001$, X6 $P < 0.0001$ และ X5 $P = 0.3853$ โดยเฉพาะ X3 และ X6 ซึ่งมีอิทธิพลเชิงบวกที่ชัดเจน หมายความว่า การเพิ่มความเข้มข้นของ HPBCD และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ส่งผลให้ค่าการตอบสนองของ FRAP เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ขณะที่ X5 ไม่มีผลกระทบที่สำคัญทางสถิติ

ในการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ พบว่า X3 มีค่าสัมประสิทธิ์ 47.8947 ซึ่งหมายความว่า การเพิ่ม X3 หนึ่งหน่วยส่งผลให้ค่าการตอบสนองเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 47.8947 หน่วย X6 มีค่าสัมประสิทธิ์

32.6922 บ่งชี้ว่าการเพิ่มพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ส่งผลให้ค่าการตอบสนองเพิ่มขึ้นแต่มีผลกระทบน้อยกว่า X3 ส่วน X5 มีค่าสัมประสิทธิ์ -2.7035 ซึ่งแสดงถึงผลกระทบที่ไม่มีความสำคัญ

ในส่วนของผลกระทบเชิงกำลังสอง พบว่า $X3^2$, $X5^2$ และ $X6^2$ มีค่าติดลบทั้งหมด โดยเฉพาะ $X5^2$ ที่มีค่าสัมประสิทธิ์ -21.4329 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่ม X5 ในระดับสูงส่งผลให้ค่าการตอบสนองลดลงมากกว่าการเพิ่ม X3 หรือ X6

สำหรับปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร พบว่าการทำงานร่วมกันของ X3 และ X6 $P < 0.0001$ และ X5 และ X6 $P = 0.0057$ มีผลเชิงบวกต่อค่าการตอบสนองของ FRAP หมายความว่าค่าการปรับค่า X3 ควบคู่กับ X6 หรือ X5 ควบคู่กับ X6 สามารถเพิ่มค่าการตอบสนองได้ ค่าสัมประสิทธิ์ของ $X3X6$ และ $X5X6$ คือ 23.4095 และ 10.1255 ตามลำดับ ซึ่งสะท้อนถึงผลกระทบเชิงบวกในระดับปานกลาง ในทางกลับกัน ปฏิสัมพันธ์ระหว่าง X3 และ X5 ไม่มีความสำคัญ $P = 0.0741$ และมีค่าสัมประสิทธิ์ 5.4132 ซึ่งบ่งบอกว่าการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรทั้งสองนี้พร้อมกันไม่ได้ส่งผลต่อค่าการตอบสนองอย่างมีความสำคัญ

ประสิทธิภาพของแบบจำลองได้รับการประเมินผ่านค่าความสามารถในการทำนาย Q^2 และค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย R^2 โดยพบว่า Q^2 มีค่า 0.842 และ R^2 มีค่า 0.990 บ่งบอกถึงความแม่นยำสูงในการอธิบายความแปรปรวนของข้อมูล นอกจากนี้ ค่า R^2 ที่ปรับแก้แล้ว $R^2 \text{ Adj.}$ มีค่า 0.976 และค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของแบบจำลอง RSD เท่ากับ 11.6794 ซึ่งอยู่ในระดับที่เหมาะสมสำหรับการทำนายค่าการตอบสนอง

แบบจำลองนี้สามารถอธิบายผลกระทบของ X3, X5 และ X6 ต่อค่าการตอบสนองของ FRAP ได้อย่างแม่นยำ โดยพบว่า X3 และ X6 มีอิทธิพลเชิงบวกที่ชัดเจนและมีผลกระทบมากที่สุด ขณะที่ X5 ไม่มีผลกระทบที่สำคัญ ส่วนปฏิสัมพันธ์ระหว่าง X3 กับ X6 และ X5 กับ X6 มีแนวโน้มช่วยเพิ่มค่าการตอบสนองของ FRAP ข้อมูลจากแบบจำลองนี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการกำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการสกัดเพื่อให้ได้ค่าการตอบสนองที่ดีที่สุด

4.3.4.4 การวิเคราะห์ Contour Plot และ Surface Plot ในการศึกษา Optimization Study Plan 4

ในการศึกษานี้ การใช้ Contour Plot และ Surface Plot เป็นเครื่องมือสำคัญที่ช่วยให้สามารถวิเคราะห์และแสดงผลแนวโน้มของค่าการตอบสนองในรูปแบบภาพ ซึ่งช่วยให้สามารถเข้าใจอิทธิพลของตัวแปรอิสระต่อผลลัพธ์ได้อย่างเป็นระบบ Contour Plot ใช้ในการแสดงแนวโน้มของค่าการตอบสนองโดยใช้เส้นระดับของค่าตอบสนองที่เชื่อมโยงกัน ช่วยให้สามารถระบุช่วงของตัวแปรที่เหมาะสมในการเพิ่มค่าการตอบสนองได้ง่ายขึ้น ในขณะที่ Surface Plot เป็นการนำเสนอข้อมูลในมิติที่สาม ทำให้สามารถเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรและแนวโน้มของค่าการตอบสนองได้ในเชิง

พื้นที่ ช่วยให้สามารถวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ของตัวแปรและพฤติกรรมของค่าการตอบสนองได้อย่างชัดเจน

ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทริน (Conc. HPBCD) และเวลาสกัด (Time) ต่อค่าการตอบสนองใน Optimization Study Plan 4

การศึกษานี้มุ่งเน้นการประเมินผลของไฮโคลเด็กซ์ทรินในกระบวนการสกัดสารสำคัญ โดยเฉพาะผลกระทบของความเข้มข้นและเวลาสกัดที่มีต่อค่าการตอบสนอง การแสดงผลผ่าน Contour Plot และ Response Surface Plot ช่วยให้เห็นแนวโน้มของค่าการตอบสนองและพฤติกรรมของสารสำคัญเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปัจจัยการสกัด จากผลที่ได้พบว่า ความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทรินและระยะเวลาการสกัดส่งผลโดยตรงต่อค่าการตอบสนองของสารแต่ละชนิด โดยไฮนสีแดงใน Contour Plot แสดงบริเวณที่ให้ค่าการตอบสนองสูงสุด ซึ่งช่วยระบุช่วงที่เหมาะสมของตัวแปรที่ใช้สกัดสารสำคัญ (ภาพที่ 4.70)

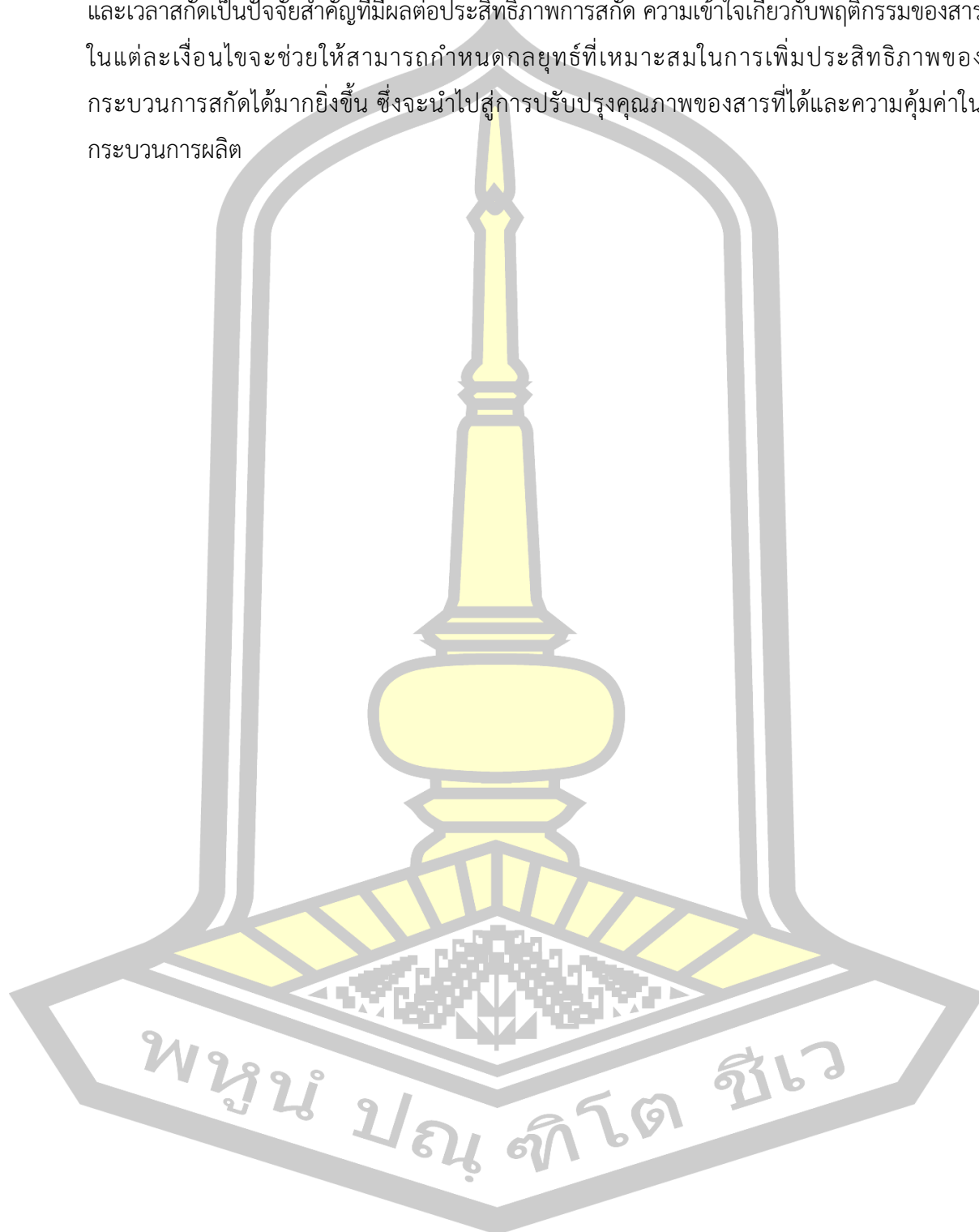
สำหรับ Compound D พบว่าค่าการตอบสนองสูงสุดอยู่ที่ 269.5 $\mu\text{g/ml}$ เมื่อความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทรินอยู่ระหว่าง 14-24 mM และใช้เวลาสกัด 24-34 นาที ในกรณีของ DMPBD ค่าการตอบสนองสูงสุดอยู่ที่ 450 $\mu\text{g/ml}$ ในช่วงความเข้มข้น 12-28 mM และเวลาสกัด 20-38 นาที ส่วน Curcuminoid มีค่าสูงสุดที่ 18.48 $\mu\text{g/ml}$ เมื่อความเข้มข้นมากกว่า 24 mM และใช้เวลาสกัด 20-40 นาที

สำหรับสารต้านอนุมูลอิสระ DPPH พบค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 420 $\mu\text{M TE}$ ในช่วงความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทรินตั้งแต่ 21 mM ขึ้นไป และเวลาสกัด 20-40 นาที ขณะที่ ABTS มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 219.3 $\mu\text{M TE}$ เมื่อความเข้มข้นมากกว่า 24 mM และเวลาสกัด 24-36 นาที สำหรับ FRAP พบว่าค่าสูงสุดอยู่ที่ 440 $\mu\text{M TE}$ ในช่วงความเข้มข้น 26 mM ขึ้นไป และเวลาสกัด 26-34 นาที แม้ว่าจะยังไม่ถึงไฮนสีแดง แต่การกระจายตัวของค่าในไฮนสีสัมผัสสะท้อนถึงแนวโน้มของค่าการตอบสนองที่เพิ่มขึ้น

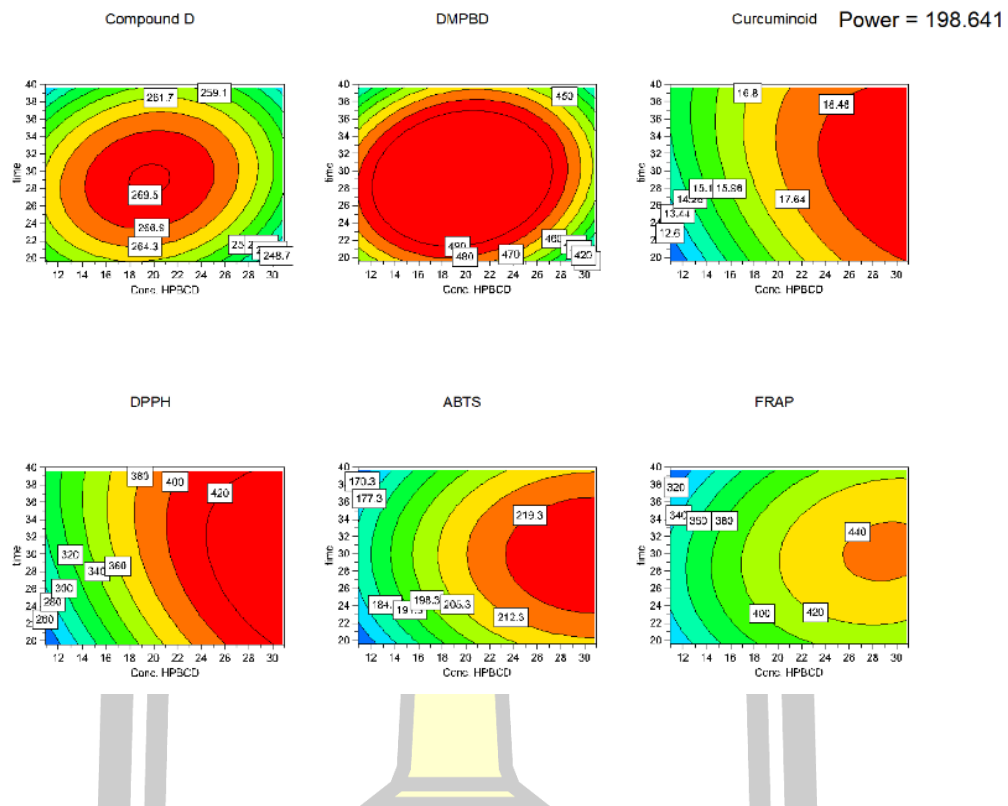
จากการวิเคราะห์พบว่า Compound D และ DMPBD มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อมีการเพิ่มความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทรินภายในช่วงที่เหมาะสม อย่างไรก็ตาม เมื่อค่าความเข้มข้นสูงเกินช่วงดังกล่าว ค่าการตอบสนองกลับลดลงเล็กน้อย อาจเกิดจากผลของการอิ่มตัวหรือการลดลงของปฏิสัมพันธ์ระหว่างไฮโคลเด็กซ์ทรินกับสารสำคัญ

ในกรณีของ Curcuminoid และสารต้านอนุมูลอิสระ การเพิ่มขึ้นของเวลาสกัดส่งผลต่อค่าการตอบสนองในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการ แต่เมื่อเวลาสกัดยาวเกินค่าที่เหมาะสม ผลที่ได้กลับไม่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ อาจเกิดจากการสลายตัวของสารออกฤทธิ์ภายใต้เงื่อนไขการสกัดที่ยาวนาน

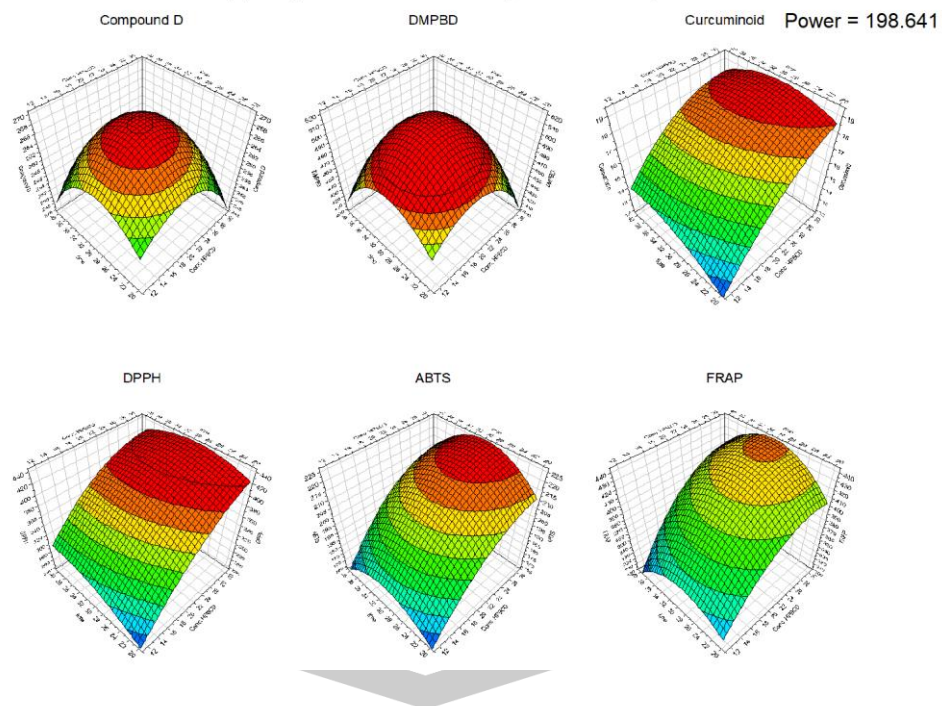
ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า การเลือกช่วงที่เหมาะสมของความเข้มข้นของไซโคลเด็กซ์ทริน และเวลาสกัดเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพการสกัด ความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมของสาร ในแต่ละเงื่อนไขจะช่วยให้สามารถกำหนดกลยุทธ์ที่เหมาะสมในการเพิ่มประสิทธิภาพของ กระบวนการสกัดได้มากยิ่งขึ้น ซึ่งจะนำไปสู่การปรับปรุงคุณภาพของสารที่ได้และความคุ้มค่าใน กระบวนการผลิต



(A) Contour Plot of Optimization Study Plan 4



(B) Response Surface Plot of Optimization Study Plan 4



ภาพที่ 4.69 Contour Plot และ Surface Plot ความสัมพันธ์ระหว่าง Conc. HPBCD และ Time ในการศึกษา Optimization Study Plan 4

ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทริน (Conc. HPBCD) และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (Power) ต่อค่าการตอบสนองใน Optimization Study Plan 4

การศึกษานี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์ผลกระทบของความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทรินและพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ที่มีต่อค่าการตอบสนองของสารสำคัญ โดยใช้ Contour Plot และ Response Surface Plot เป็นเครื่องมือในการประเมินแนวโน้มและพฤติกรรมของค่าการตอบสนองภายใต้เงื่อนไขที่แตกต่างกัน (ภาพที่ 4.71) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าโซนสีแดงใน Contour Plot เป็นบริเวณที่ค่าการตอบสนองสูงสุดของสารแต่ละชนิดถูกบันทึกไว้ โดยสามารถสรุปช่วงที่เหมาะสมของตัวแปรแต่ละตัวได้ดังนี้

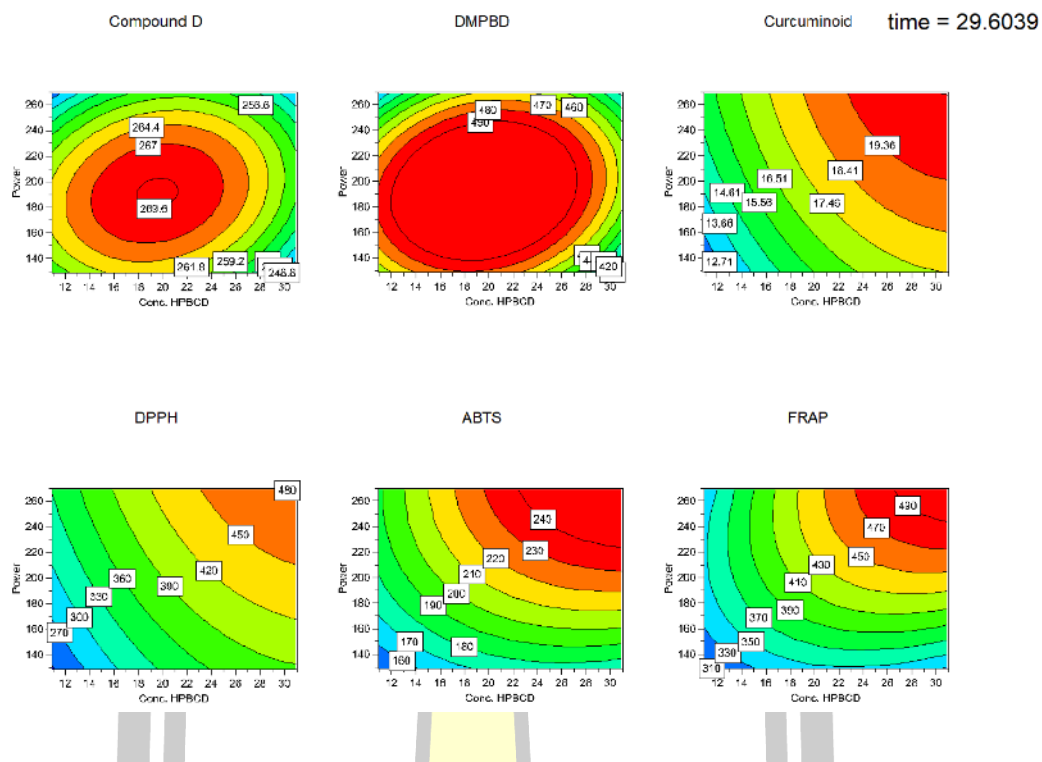
สำหรับ Compound D พบว่าค่าการตอบสนองสูงสุดอยู่ที่ 269.6 $\mu\text{g/ml}$ เมื่อความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทรินอยู่ระหว่าง 14-25 mM และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์อยู่ในช่วง 150-230 W ขณะที่ DMPBD มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 480 $\mu\text{g/ml}$ เมื่อความเข้มข้นอยู่ระหว่าง 12-28 mM และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์อยู่ระหว่าง 130-250 W สำหรับ Curcuminoid พบว่ามีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 19.36 $\mu\text{g/ml}$ ในช่วงความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทรินมากกว่า 24 mM และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ที่ 200 W ขึ้นไป

ในกรณีของสารต้านอนุมูลอิสระ DPPH พบว่าค่าการตอบสนองสูงสุดอยู่ที่ 480 $\mu\text{M TE}$ ในช่วงความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทรินมากกว่า 24 mM และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ที่ 200 W ขึ้นไป อย่างไรก็ตาม ค่าการตอบสนองยังคงอยู่ในโซนสีแดงและยังไม่ถึงค่าที่สูงสุด ขณะที่ ABTS มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 240 $\mu\text{M TE}$ เมื่อความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทรินมากกว่า 20 mM และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์มากกว่า 200 W สำหรับ FRAP พบว่าค่าสูงสุดอยู่ที่ 490 $\mu\text{M TE}$ เมื่อความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทรินมากกว่า 24 mM และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ที่ 230 W ขึ้นไป

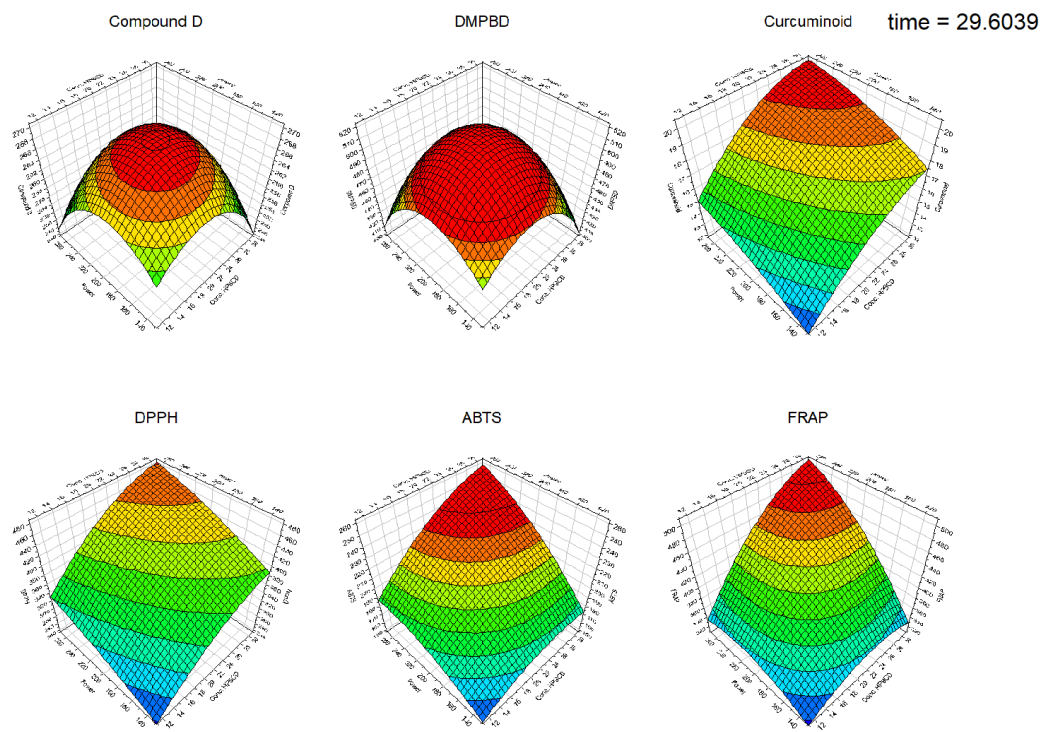
ข้อมูลที่ได้ชี้ให้เห็นว่าการเพิ่มพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อการเพิ่มค่าการตอบสนองในกระบวนการสกัด อย่างไรก็ตาม ปริมาณพลังงานที่มากเกินไปอาจไม่ส่งผลให้ค่าการตอบสนองเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง อาจเป็นเพราะอัตราการกระจายตัวของสารสำคัญในระบบมีขีดจำกัด หรือเกิดการสลายตัวของสารภายใต้สภาวะที่มีพลังงานสูงเกินไป

ผลการศึกษาเน้นให้เห็นว่าการเลือกช่วงที่เหมาะสมของความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทรินและพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการสกัด การทำความเข้าใจพฤติกรรมของสารแต่ละชนิดภายใต้เงื่อนไขที่แตกต่างกัน จะช่วยให้สามารถกำหนดกลยุทธ์ที่เหมาะสมในการเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

(A) Contour Plot of Optimization Study Plan 4



(B) Response Surface Plot of Optimization Study Plan 4



ภาพที่ 4.70 Contour Plot และ Surface Plot ความสัมพันธ์ระหว่าง Conc. HPBCD และ Power ในการศึกษา Optimization Study Plan 4

ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาสกัด (Time) และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (Power) ต่อค่าการตอบสนองใน Optimization Study Plan 4

การศึกษานี้วิเคราะห์ผลกระทบของเวลาสกัดและพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ที่มีต่อค่าการตอบสนองของสารสำคัญ โดยใช้ Contour Plot และ Response Surface Plot ในการแสดงผลแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าการตอบสนอง (ภาพที่ 4.72) จากผลการทดลอง พบว่าโซนสีแดงใน Contour Plot บ่งชี้ถึงบริเวณที่ค่าการตอบสนองสูงสุดในแต่ละกรณี โดยสามารถสรุปช่วงของตัวแปรที่เหมาะสมได้ดังนี้

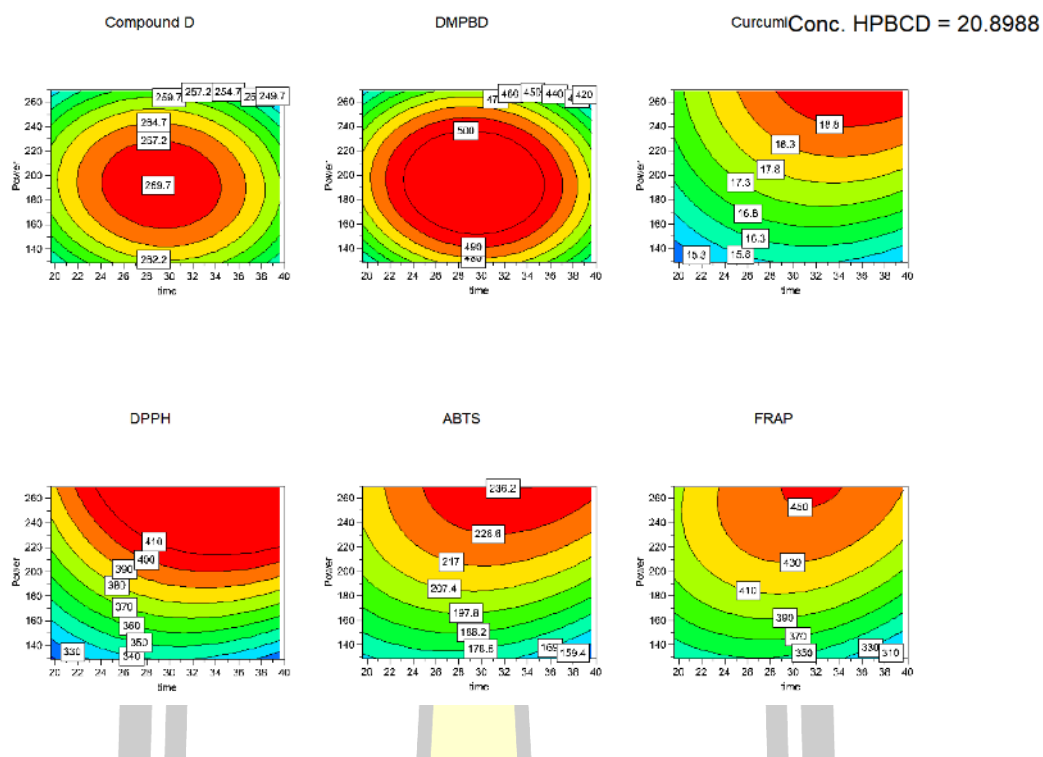
สำหรับ Compound D พบว่าค่าการตอบสนองสูงสุดอยู่ที่ 269.7 $\mu\text{g/ml}$ เมื่อช่วงเวลาสกัดอยู่ระหว่าง 24-34 นาที และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ 160-230 W ขณะที่ DMPBD มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 500 $\mu\text{g/ml}$ เมื่อช่วงเวลาสกัด 22-38 นาที และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ 140-250 W ส่วน Curcuminoid มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 18.8 $\mu\text{g/ml}$ เมื่อเวลาสกัดมากกว่า 28 นาที และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์มากกว่า 240 W

ในกรณีของสารต้านอนุมูลอิสระ DPPH พบว่าค่าการตอบสนองสูงสุดอยู่ที่ 410 $\mu\text{M TE}$ ที่เวลาสกัด 22 นาทีขึ้นไป และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ 200 W ขึ้นไป ขณะที่ ABTS มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 236.2 $\mu\text{M TE}$ ในช่วงเวลาสกัด 25-36 นาที และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์มากกว่า 230 W สำหรับ FRAP พบว่าค่าสูงสุดอยู่ที่ 450 $\mu\text{M TE}$ ในช่วงเวลาสกัด 28-31 นาที และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์มากกว่า 250 W

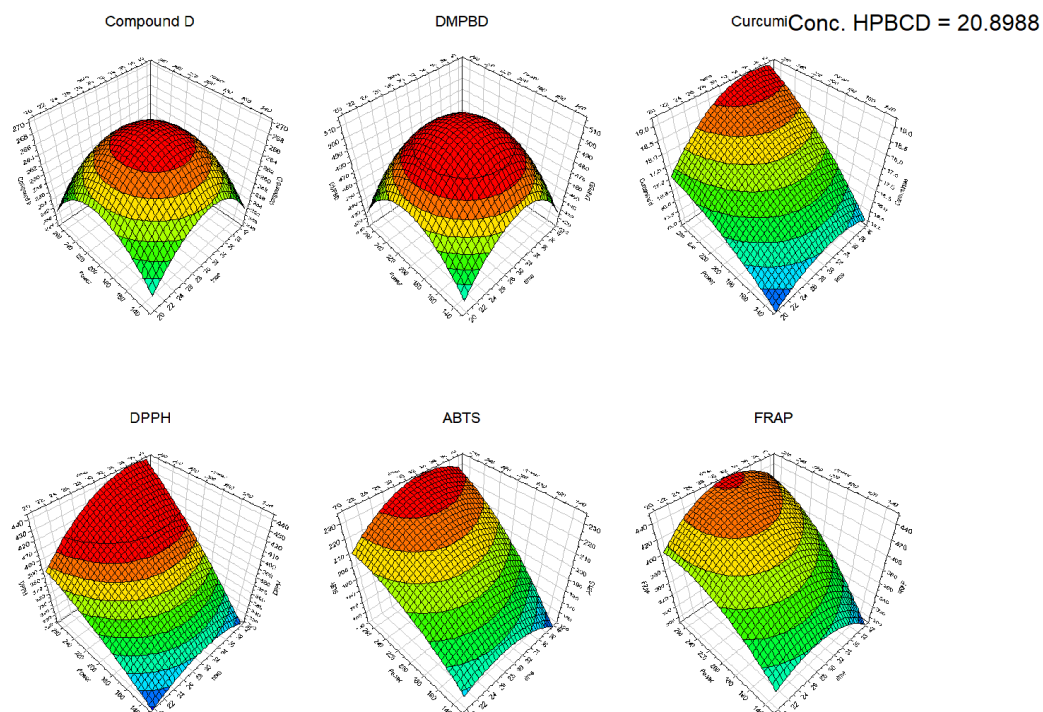
เมื่อพิจารณารูปแบบของผลการทดลอง พบว่าเวลาสกัดและพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์มีความสัมพันธ์กันในการกำหนดค่าการตอบสนองที่เหมาะสมของสารสำคัญ โดยการเพิ่มพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ในช่วงเริ่มต้นช่วยเร่งกระบวนการสกัด ทำให้สารออกฤทธิ์กระจายตัวได้ดีขึ้นและให้ค่าการตอบสนองสูงสุด อย่างไรก็ตาม เมื่อเวลาสกัดยาวนานในระดับหนึ่ง ค่าการตอบสนองอาจลดลง อาจเนื่องมาจากการสลายตัวของสารที่เกิดจากการได้รับพลังงานสูงเป็นเวลานาน

ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของการควบคุมเวลาสกัดและพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม การกำหนดสภาวะที่เหมาะสมของตัวแปรทั้งสองสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดได้สูงสุด โดยยังคงรักษาคุณภาพของสารออกฤทธิ์ไว้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ การทำความเข้าใจกลไกที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสารสำคัญภายใต้เงื่อนไขที่แตกต่างกัน จะเป็นประโยชน์ต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตเชิงอุตสาหกรรม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการสกัดสารออกฤทธิ์จากพืชสมุนไพร

(A) Contour Plot of Optimization Study Plan 4



(B) Response Surface Plot of Optimization Study Plan 4



ภาพที่ 4.71 Contour Plot และ Surface Plot ความสัมพันธ์ระหว่าง Time และ Power ใน
การศึกษา Optimization Study Plan 2

บทสรุปการวิเคราะห์ Contour Plot และ Surface Plot ใน Optimization Study Plan 4

จากการศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ต่อค่าการตอบสนองโดยใช้ Contour Plot และ Response Surface Plot พบว่าเวลาสกัด (Time) ความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทริน (HPBCD) และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (Power) ล้วนมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดสารสำคัญ โดยมีช่วงที่เหมาะสมของแต่ละตัวแปรที่ส่งผลให้ได้ค่าการตอบสนองสูงสุด

Contour Plot แสดงให้เห็นว่าโซนสีแดงเป็นบริเวณที่ค่าการตอบสนองอยู่ในระดับสูงสุด ซึ่งแตกต่างกันไปตามสารที่ทำการศึกษา โดยพบว่าการเพิ่มความเข้มข้นของ HPBCD และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ช่วยเพิ่มค่าการตอบสนองในช่วงที่เหมาะสม อย่างไรก็ตาม เมื่อค่าตัวแปรเพิ่มขึ้นเกินขีดจำกัด ค่าการตอบสนองอาจลดลงเนื่องจากปรากฏการณ์การอิ่มตัวของสาร หรือการเสื่อมสลายของสารออกฤทธิ์ภายใต้เงื่อนไขที่รุนแรง

สำหรับ Response Surface Plot แสดงให้เห็นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าการตอบสนองในลักษณะสามมิติ ซึ่งช่วยให้เข้าใจรูปแบบของผลกระทบระหว่างตัวแปรได้อย่างชัดเจน พบว่าในกรณีของ Compound D และ DMPBD ค่าการตอบสนองเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาสกัดและพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ในช่วงที่เหมาะสม ในขณะที่ Curcuminoid และสารต้านอนุมูลอิสระ เช่น DPPH, ABTS และ FRAP มีการตอบสนองที่ดีขึ้นเมื่อมีการปรับค่าความเข้มข้นของ HPBCD และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม

นอกจากนี้ ความเข้มข้นของ HPBCD ที่เพิ่มขึ้นช่วยเสริมประสิทธิภาพการสกัดโดยการสร้างโครงสร้างเชิงซ้อน (inclusion complex) กับสารออกฤทธิ์ ซึ่งช่วยเพิ่มการละลายและความเสถียรของสาร อย่างไรก็ตาม การใช้ HPBCD ในปริมาณที่มากเกินไปอาจนำไปสู่การอิ่มตัวของสารในระบบ ทำให้ความสามารถในการกักเก็บสารออกฤทธิ์ลดลง และส่งผลให้ค่าการตอบสนองลดลง

ผลการวิเคราะห์นี้เน้นให้เห็นถึงความสำคัญของการเลือกค่าตัวแปรที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัด การเข้าใจพฤติกรรมของสารแต่ละชนิดภายใต้เงื่อนไขที่ต่างกันจะช่วยให้สามารถปรับปรุงเทคนิคการสกัดให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ทั้งในระดับห้องปฏิบัติการ และการนำไปประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรม การควบคุมปัจจัยที่เหมาะสมไม่เพียงช่วยเพิ่มปริมาณสารออกฤทธิ์ที่ได้ แต่ยังช่วยรักษาคุณภาพของสารและลดการสูญเสียที่เกิดจากการสกัดที่ไม่เหมาะสมได้อีกด้วย

4.3.4.5 การระบุจุดที่เหมาะสม (Optimization) ใน Optimization Study Plan 4

การกำหนดจุดที่เหมาะสมใน Optimization Study Plan 4 เป็นการวิเคราะห์เพื่อนำไปสู่การหาค่าที่ให้ผลตอบแทนสูงสุดจากกระบวนการสกัดสารสำคัญ โดยมุ่งเน้นไปที่การเพิ่มปริมาณของสารสกัดที่สำคัญ ได้แก่ Compound D, DMPBD, และ Curcuminoid รวมถึงการเพิ่มประสิทธิภาพของสารที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ได้แก่ DPPH, ABTS และ FRAP โดยการศึกษาครั้งนี้ดำเนินการภายใต้ตัวแปรอิสระหลักสามตัว ในการวิเคราะห์เพื่อหาค่าที่เหมาะสม โดยใช้แบบจำลองเชิงสถิติร่วมกับเทคนิคการหาค่าสูงสุดเพื่อตรวจสอบค่าการตอบสนองที่ได้จากการทดลอง ผลการคำนวณแสดงในตารางที่ 4.22 ให้เห็นว่า ค่าการตอบสนองสูงสุดของ Compound D อยู่ที่ 271.274 $\mu\text{g/ml}$ ในขณะที่ DMPBD มีค่าสูงสุดที่ 525.203 $\mu\text{g/ml}$ และ Curcuminoid มีค่าสูงสุดที่ 20.5634 $\mu\text{g/ml}$ สำหรับฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ค่า DPPH สูงสุดอยู่ที่ 494.014 $\mu\text{M TE}$ ค่า ABTS สูงสุดที่ 262.412 $\mu\text{M TE}$ และค่า FRAP สูงสุดที่ 510.466 $\mu\text{M TE}$ จากค่าที่ได้แสดงให้เห็นว่ามีความเป็นไปได้ในการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัด โดยการเลือกค่าตัวแปรอิสระที่เหมาะสม

ตารางที่ 4.22 แสดงค่าเป้าหมายของการเพิ่มประสิทธิภาพของตัวแปรตอบสนองใน Optimization Study Plan 4 จากโปรแกรม MODDE 7.0

Response Variable	Optimization Objective	Weight	Predicted Minimum Value	Predicted Maximum Value
Compound D	Maximize	1	266.982	271.274
DMPBD	Maximize	1	504.643	525.203
Curcuminoid	Maximize	1	19.5551	20.5634
DPPH	Maximize	1	465.6	494.014
ABTS	Maximize	1	249.744	262.412
FRAP	Maximize	1	485.107	510.466

จากการตรวจสอบค่าที่เหมาะสมของตัวแปร พบว่าการใช้ความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทริน (Conc. HPBCD) ที่ประมาณ 24.59 mM เวลาสกัดที่ 30.25 นาที และกำลังคลื่นอัลตราซาวด์ที่ 226.28 วัตต์ ให้ค่าการตอบสนองของ Compound D ที่ 265.67 $\mu\text{g/ml}$, DMPBD ที่ 498.24 $\mu\text{g/ml}$ และ Curcuminoid ที่ 19.20 $\mu\text{g/ml}$ ขณะที่ค่าฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH, ABTS และ

FRAP ในเงื่อนไขนี้อยู่ที่ 437.98, 233.89 และ 460.42 μM Trolox ตามลำดับ ซึ่งแม้ว่าจะไม่ได้เป็นค่าที่สูงที่สุดที่คาดการณ์ไว้ แต่ยังคงอยู่ในช่วงที่มีแนวโน้มที่ดี

ตารางที่ 4.23 ผลการวิเคราะห์ค่าที่เหมาะสมของปัจจัยและค่าการตอบสนองใน Optimization Study Plan 4 จากโปรแกรม MODDE 7.0

No.	X3 (mM)	X5 (min)	X6 (W)	Y1 ($\mu\text{g/ml}$)	Y2 ($\mu\text{g/ml}$)	Y3 ($\mu\text{g/ml}$)	Y4 (μM TE)	Y5 (μM TE)	Y6 (μM TE)
1	24.59	30.25	226.28	265.66	498.24	19.2	437.98	233.89	460.42
2	25.95	30.69	237.11	262.85	484.59	19.61	451.39	240.76	473.28
3	26.76	30.95	243.64	260.84	474.75	19.82	458.65	244.69	480.68
4	27.65	31.21	256.75	257.07	456.34	20.09	469.05	250.91	492.02
5	23.78	30.13	219.16	267.04	504.86	18.92	429.08	229.4	452.09
6	27.65	31.21	256.75	257.07	456.34	20.09	469.05	250.91	492.02
7	23.78	30.13	219.16	267.04	504.86	18.92	429.08	229.4	452.09
8	23.78	30.13	219.16	267.04	504.86	18.92	429.08	229.4	452.09

จากตารางที่ 4.23 แสดงให้เห็นถึงผลกระทบของปัจจัยหลักต่อค่าการตอบสนองในกระบวนการสกัดสารออกฤทธิ์ โดยพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไซโคลเด็กซ์ทริน เวลาสกัด และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการสกัด

จากข้อมูลพบว่าความเข้มข้นของไซโคลเด็กซ์ทรินในช่วง 23.78 - 27.65 mM เป็นระดับที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดสารออกฤทธิ์ได้อย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม หากมีการเพิ่มปริมาณมากเกินไป อาจนำไปสู่ภาวะอิ่มตัวของสารสกัด ส่งผลให้ประสิทธิภาพของกระบวนการลดลง ในขณะที่เวลาสกัดที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 30.13 - 31.21 min เป็นช่วงเวลาที่ให้ค่าการตอบสนองของสารออกฤทธิ์สูงสุด การสกัดที่ยาวนานเกินไปอาจนำไปสู่การสลายตัวของสารสำคัญ เช่น สารฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์ ซึ่งไวต่อสภาวะที่มีพลังงานสูง

พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์มีบทบาทสำคัญต่อประสิทธิภาพการสกัด โดยช่วงที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 219.16 - 256.75 W ส่งผลให้ค่าการตอบสนองของสารออกฤทธิ์เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อ

พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์สูงเกินระดับที่เหมาะสม อาจทำให้เกิดความร้อนสะสมในระบบ ซึ่งส่งผลให้สารบางชนิดเสื่อมสลายและลดประสิทธิภาพของกระบวนการสกัด

ค่าการตอบสนองที่ได้จากการศึกษาชี้ให้เห็นว่าปริมาณ Compound D สูงสุดอยู่ที่ 267.04 $\mu\text{g/mL}$ ในขณะที่ DMPBD มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 504.86 $\mu\text{g/mL}$ และ Curcuminoid อยู่ที่ 20.09 $\mu\text{g/mL}$ สำหรับค่าการต้านอนุมูลอิสระ พบว่าการวิเคราะห์ด้วย DPPH ให้ค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 469.05 $\mu\text{M TE}$ ในขณะที่การวิเคราะห์ด้วย ABTS และ FRAP ให้ค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 250.91 และ 492.02 $\mu\text{M TE}$ ตามลำดับ

จากผลการวิเคราะห์ทั้งหมด แสดงให้เห็นว่าการควบคุมปัจจัยที่เหมาะสมมีผลโดยตรงต่อการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัด การกำหนดช่วงค่าที่เหมาะสมของแต่ละตัวแปรช่วยให้สามารถสกัดสารออกฤทธิ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ทั้งในแง่ของปริมาณและคุณภาพของสารสำคัญที่ได้รับ ความเข้าใจในพฤติกรรมของตัวแปรที่เกี่ยวข้องภายใต้สภาวะการสกัดที่แตกต่างกันจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4.3.4.6 การตรวจสอบความถูกต้องของค่าคาดการณ์ใน Optimization Study Plan 4

การตรวจสอบความถูกต้องของค่าคาดการณ์เป็นขั้นตอนสำคัญในการประเมินความแม่นยำของแบบจำลองที่ใช้ทำนายผลลัพธ์ของกระบวนการสกัด ใน Optimization Study Plan 4 ได้ดำเนินการทดลองโดยใช้เงื่อนไขที่กำหนด ได้แก่ ความเข้มข้นของ HPBCD 25 มิลลิโมลาร์ (mM), เวลาสกัด 31 นาที, กำลังของคลื่นอัลตราซาวด์ 237 วัตต์ (W), ไม่มีการเติมเอทานอลและสารเติมแต่งที่อุณหภูมิห้อง เพื่อประเมินความถูกต้องของค่าคาดการณ์ ได้มีการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากแบบจำลองกับค่าที่ได้จากการทดลองจริงโดยอาศัย Verification Triplicate ซึ่งเป็นการทดลองซ้ำสามครั้งเพื่อลดผลกระทบจากความแปรปรวนของการทดลองและเพิ่มความแม่นยำของผลลัพธ์ แสดงในตารางที่ 4.24 ในการตรวจสอบค่าคาดการณ์ ได้มีการนำค่าคาดการณ์ที่ได้จากแบบจำลองมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองจริงในรูปแบบ Verification Triplicate โดยพิจารณาทั้งช่วงความเชื่อมั่นของค่าคาดการณ์ และการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (% Relative Error, %RE) ซึ่งหากค่าคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง $\leq 5\%$ ถือว่าค่าคาดการณ์มีความแม่นยำเพียงพอ

ตารางที่ 4.24 แสดงการเปรียบเทียบค่าคาดการณ์และค่าตรวจสอบ (Verification) ใน Optimization Study Plan 4

Compound	Prediction (Mean)	Prediction (Lower)	Prediction (Upper)	Verification (1)	Verification (2)	Verification (3)	ค่าเฉลี่ย
Compound D ($\mu\text{g/ml}$)	263.688	261.365	266.012	262.26	264.562	263.652	263.491
DMPBD ($\mu\text{g/ml}$)	488.761	479.078	498.445	489.256	492.261	496.326	492.614
Curcuminoid ($\mu\text{g/ml}$)	19.48	19.056	19.904	18.269	19.114	19.591	18.991
DPPH ($\mu\text{M TE}$)	447.178	434.033	460.323	456.241	479.241	468.29	467.924
ABTS ($\mu\text{M TE}$)	238.946	233.292	244.601	240.365	244.359	246.226	243.650
FRAP ($\mu\text{M TE}$)	469.182	457.057	481.307	482.325	468.262	479.621	476.069

จากผลการวิเคราะห์พบว่า ค่าของ Compound D ซึ่งมีหน่วยเป็น $\mu\text{g/ml}$ มีค่าคาดการณ์เฉลี่ยอยู่ที่ 263.688 $\mu\text{g/ml}$ ขณะที่ค่าตรวจสอบจริงเฉลี่ยอยู่ที่ 263.491 $\mu\text{g/ml}$ ส่งผลให้ค่า %RE เท่ากับ 0.07% ซึ่งต่ำมากและอยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้ แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถทำนายค่าของสารประกอบนี้ได้อย่างแม่นยำ โดยค่าตรวจสอบจริงทั้งหมดอยู่ภายในช่วงค่าคาดการณ์ที่กำหนดไว้ระหว่าง 261.365 – 266.012 $\mu\text{g/ml}$

สำหรับ DMPBD ค่าคาดการณ์เฉลี่ยอยู่ที่ 488.761 $\mu\text{g/ml}$ ขณะที่ค่าตรวจสอบจริงเฉลี่ยอยู่ที่ 492.614 $\mu\text{g/ml}$ ส่งผลให้ค่า %RE เท่ากับ 0.79% ซึ่งยังอยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้ เนื่องจากค่าตรวจสอบจริงอยู่ในช่วงค่าคาดการณ์ที่กำหนดไว้ระหว่าง 479.078 – 498.445 $\mu\text{g/ml}$ สะท้อนว่าแบบจำลองสามารถทำนายค่าของสารนี้ได้อย่างแม่นยำ

ในส่วนของ Curcuminoid ซึ่งเป็นสารสำคัญที่ต้องการศึกษาและมีหน่วยเป็น $\mu\text{g/ml}$ ค่าคาดการณ์เฉลี่ยอยู่ที่ 19.480 $\mu\text{g/ml}$ ขณะที่ค่าตรวจสอบจริงเฉลี่ยอยู่ที่ 18.991 $\mu\text{g/ml}$ ส่งผลให้ค่า %RE เท่ากับ 2.51% ซึ่งยังคงอยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้ แม้ว่าค่าตรวจสอบจริงจะมีแนวโน้มต่ำกว่าค่าคาดการณ์เล็กน้อย แต่ยังคงอยู่ในช่วงค่าคาดการณ์ที่กำหนดไว้ระหว่าง 19.056 – 19.904 $\mu\text{g/ml}$ แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถใช้ทำนายค่าของสารประกอบกลุ่มเคอร์คูมินอยด์ได้อย่างแม่นยำ

เมื่อพิจารณาค่าผลลัพธ์ของ DPPH ซึ่งเป็นค่าที่ใช้วัดศักยภาพของสารสกัดในการกำจัดอนุมูลอิสระ และมีหน่วยเป็น $\mu\text{M TE}$ พบว่าค่าคาดการณ์เฉลี่ยอยู่ที่ 447.178 $\mu\text{M TE}$ ขณะที่ค่าตรวจสอบ

จริงเฉลี่ยอยู่ที่ 467.924 $\mu\text{M TE}$ ส่งผลให้ค่า %RE เท่ากับ 4.64% ซึ่งสูงกว่าสารตัวอื่นเล็กน้อย แม้ว่าค่าคลาดเคลื่อนจะอยู่ใกล้กับขีดจำกัดที่กำหนดไว้ที่ 5% แต่ก็ยังคงอยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้ ค่าตรวจสอบจริงบางค่ามีแนวโน้มสูงกว่าช่วงค่าคาดการณ์ที่กำหนดไว้ระหว่าง 434.033 – 460.323 $\mu\text{M TE}$ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากความแปรปรวนของกระบวนการสกัดหรือข้อจำกัดของการทดลอง อย่างไรก็ตาม ค่าเบี่ยงเบนที่พบยังอยู่ในระดับที่สามารถยอมรับได้ในเชิงสถิติ

สำหรับค่าการทดสอบ ABTS ซึ่งมีหน่วยเป็น $\mu\text{M TE}$ ค่าคาดการณ์เฉลี่ยอยู่ที่ 238.946 $\mu\text{M TE}$ ขณะที่ค่าตรวจสอบจริงเฉลี่ยอยู่ที่ 243.650 $\mu\text{M TE}$ ส่งผลให้ค่า %RE เท่ากับ 1.97% ซึ่งอยู่ในระดับที่สามารถยอมรับได้ โดยค่าตรวจสอบจริงทั้งหมดอยู่ในช่วงค่าคาดการณ์ที่กำหนดไว้ระหว่าง 233.292 – 244.601 $\mu\text{M TE}$ จึงสามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองสามารถใช้พยากรณ์ค่าการทดสอบ ABTS ได้อย่างแม่นยำ

สุดท้ายคือค่าการทดสอบ FRAP ซึ่งใช้วัดศักยภาพของสารต้านอนุมูลอิสระผ่านปฏิกิริยาการรีดักชัน และมีหน่วยเป็น $\mu\text{M TE}$ ค่าคาดการณ์เฉลี่ยอยู่ที่ 469.182 $\mu\text{M TE}$ ขณะที่ค่าตรวจสอบจริงเฉลี่ยอยู่ที่ 476.069 $\mu\text{M TE}$ ส่งผลให้ค่า %RE เท่ากับ 1.47% ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำมากและสามารถยอมรับได้ โดยค่าตรวจสอบจริงทั้งหมดอยู่ในช่วงค่าคาดการณ์ที่กำหนดไว้ระหว่าง 457.057 – 481.307 $\mu\text{M TE}$ สะท้อนว่าแบบจำลองสามารถพยากรณ์ค่าของสารต้านอนุมูลอิสระ FRAP ได้อย่างแม่นยำ

จากผลการวิเคราะห์ทั้งหมดพบว่า ค่าคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (%RE) ของสารส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 0.07% - 4.64% ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์ 5% ที่กำหนดไว้ในเกณฑ์การยอมรับของแบบจำลอง ยกเว้นค่า DPPH ที่มีค่าคลาดเคลื่อนใกล้เคียงกับขีดจำกัด 5% แต่ก็ยังคงอยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้ในเชิงสถิติ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า แบบจำลองที่ใช้มีความแม่นยำสูงและสามารถใช้เป็นแนวทางในการพยากรณ์ผลลัพธ์ของกระบวนการสกัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม ค่าคลาดเคลื่อนของ DPPH ที่สูงกว่าสารตัวอื่นอาจเป็นข้อบ่งชี้ถึงความจำเป็นในการปรับปรุงแบบจำลองให้เหมาะสมยิ่งขึ้นในอนาคต เพื่อเพิ่มความแม่นยำของการทำนายสำหรับตัวแปรดังกล่าว

4.3.4.7 บทสรุปผลการศึกษารูปแบบการปรับสภาวะการสกัด Optimization Study Plan 4

การศึกษานี้มุ่งเน้นการกำหนดสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการสกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากเหง้าไพล โดยใช้ Central Composite Design (CCD) ภายใต้แนวคิดของ Response Surface Methodology (RSM) ซึ่งพิจารณาปัจจัยหลัก ได้แก่ ความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทรีน (Conc. HPBCD, X3), เวลาสกัด (X5) และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (X6) ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการสกัดสารออกฤทธิ์และฤทธิ์ทางชีวภาพของสารสกัด

ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าค่าการตอบสนองของสารสำคัญ เช่น Compound D, DMPBD, Curcumin, Demethoxycurcumin (DMC), Bisdemethoxycurcumin (BDMC) รวมถึง

ค่าการต้านอนุมูลอิสระ (DPPH, ABTS และ FRAP) ถูกกำหนดโดยสภาวะการสกัดที่แตกต่างกัน โดยช่วงค่าที่เหมาะสมที่สุดพบว่า การใช้พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ในช่วง 219.16 - 256.75 W ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ในช่วง 23.78 - 27.65 mM และเวลาสกัดในช่วง 30.13 - 31.21 min เป็นเงื่อนไขที่ให้ค่าการตอบสนองที่สมดุลระหว่างปริมาณของสารสำคัญและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ

ภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสมนี้ พบว่า Compound D มีค่าเฉลี่ย 263.491 $\mu\text{g/mL}$, DMPBD ที่ 492.614 $\mu\text{g/mL}$ และ Curcumin มีค่า 18.991 $\mu\text{g/mL}$ ขณะที่ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดที่วัดจาก DPPH, ABTS และ FRAP ให้ค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 467.924 $\mu\text{M TE}$, 243.650 $\mu\text{M TE}$ และ 476.069 $\mu\text{M TE}$ ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์เป็น 280 W และความเข้มข้นของไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์เป็น 30 mM พบว่าค่าการตอบสนองบางค่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดย DMPBD สูงสุดที่ 530.82 $\mu\text{g/mL}$ และ Curcumin ที่ 19.06 $\mu\text{g/mL}$ ขณะที่ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระที่วัดจาก DPPH, ABTS และ FRAP สูงขึ้นที่ 448.81 $\mu\text{M TE}$, 233.58 $\mu\text{M TE}$ และ 440.50 $\mu\text{M TE}$ ตามลำดับ

แม้ว่าการเพิ่มค่าปัจจัยบางตัวอาจช่วยเพิ่มผลลัพธ์ของสารสกัด แต่จากการตรวจสอบความสัมพันธ์เชิงเส้นและค่ากำลังสองของแบบจำลอง พบว่าเมื่อค่าของปัจจัยสูงเกินไป ค่าการตอบสนองกลับลดลง อาจเกิดจากการสลายตัวของสารสำคัญที่ได้รับพลังงานสูงเกินไป หรือเกิดภาวะอึดตัวของตัวทำละลายที่ทำให้ประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดลดลง ดังนั้น การเลือกใช้ค่าปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดที่ 210 W, 20 mM ของไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ และเวลาสกัด 30 min เป็นเงื่อนไขที่ให้ค่าการตอบสนองที่สมดุลระหว่างปริมาณของสารออกฤทธิ์และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ

การตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองพบว่า ค่า R^2 อยู่ระหว่าง 0.987 ถึง 0.991 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้อย่างดีเยี่ยม และสามารถพยากรณ์ผลลัพธ์ของกระบวนการสกัดได้อย่างแม่นยำ ค่า Q^2 ที่อยู่ระหว่าง 0.808 ถึง 0.914 สะท้อนให้เห็นถึงประสิทธิภาพของแบบจำลองในการคาดการณ์ข้อมูลใหม่ นอกจากนี้ ค่าความสามารถของแบบจำลองที่ถูกปรับแก้ให้เหมาะสม (R^2 Adjusted) ก็ยังอยู่ในระดับสูง ซึ่งยืนยันถึงเสถียรภาพของแบบจำลองและความน่าเชื่อถือของผลการทดลอง

จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่าการเลือกค่าปัจจัยที่เหมาะสมมีผลอย่างมากต่อปริมาณสารออกฤทธิ์และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัด โดยการใช้พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ที่ 210 W, ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ที่ 20 mM และเวลาสกัด 30 min เป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งให้สมดุลระหว่างประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดและคุณภาพของสารออกฤทธิ์ การกำหนดค่าปัจจัยที่เหมาะสมไม่เพียงแต่ช่วยเพิ่มปริมาณสารสำคัญที่สกัดได้ แต่ยังช่วยรักษาคุณภาพของสารสกัด ลดการเสื่อมสลายของสาร และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอางและเภสัชกรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4.3.5 ผลการวิเคราะห์ Optimization study Plan 5

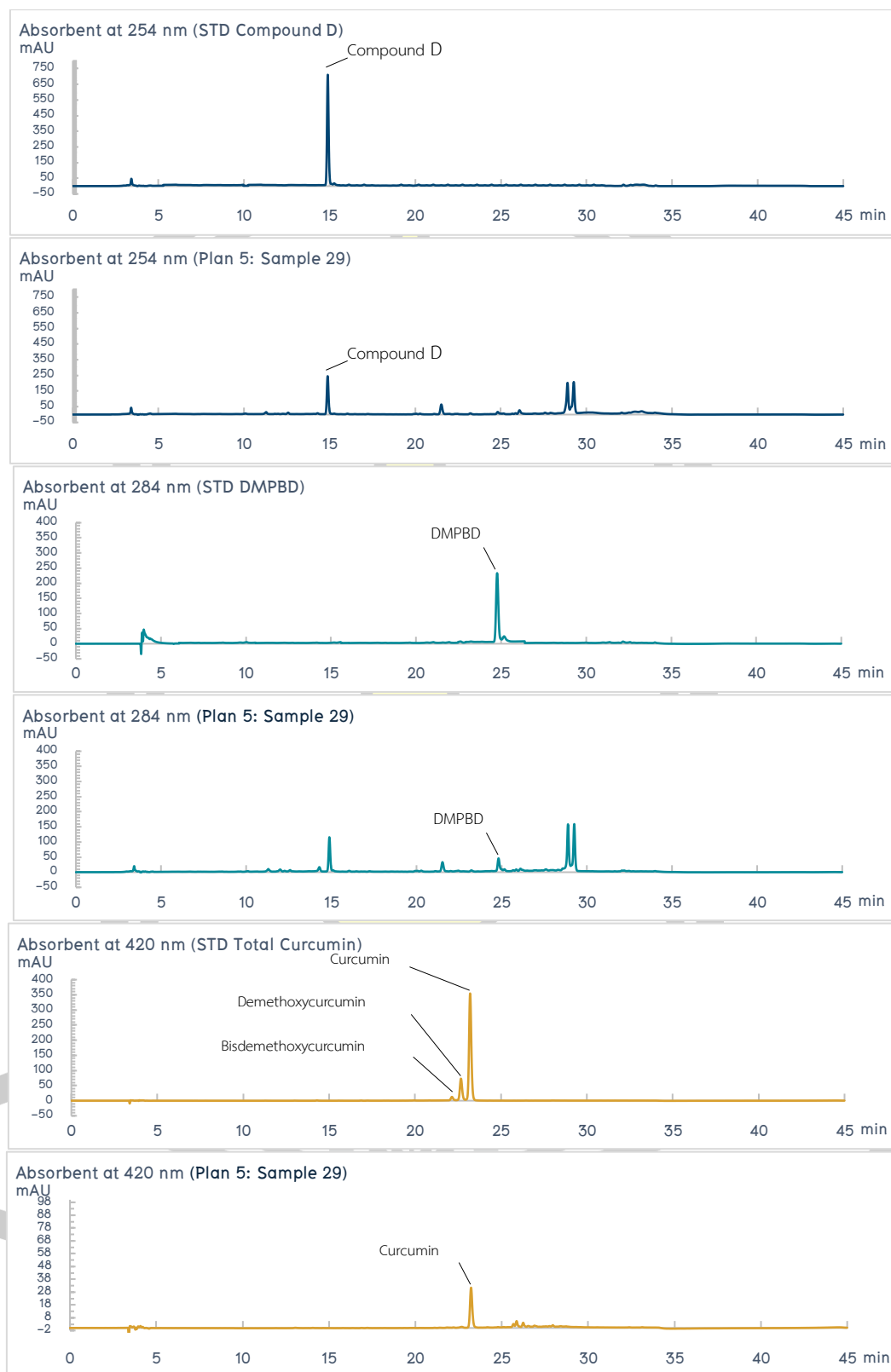
การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินประสิทธิภาพของ Shaking Extraction เปรียบเทียบกับ Ultrasonic Extraction ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้ในการทดลองก่อนหน้านี้สำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดสารออกฤทธิ์จากเหง้าไพล โดยมีการปรับเปลี่ยนเงื่อนไขการสกัดจากระบบ HPBCD ร่วมกับเอทานอลและสารลดแรงตึงผิว Tween 80 ภายใต้ Ultrasonic Extraction มาเป็น Shaking Extraction เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงเทคนิคที่ใช้ต่อปริมาณสารสำคัญที่สกัดได้ การปรับเปลี่ยนนี้ส่งผลให้มีการแก้ไขปัจจัยในการศึกษา โดย ตัดปัจจัยพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (X7) ออกไป เนื่องจากเป็นตัวแปรที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับ Ultrasonic Extraction และแทนที่ด้วย อุณหภูมิ (X9) เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิที่ต่างกันต่อการสกัดสารออกฤทธิ์ การทดลองดำเนินการภายใต้ Shaking Incubator ที่ควบคุมความเร็วรอบคงที่ 200 rpm ตลอดระยะเวลาการสกัด เพื่อให้สามารถประเมินผลของ Shaking Extraction ต่อประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดได้อย่างถูกต้อง การเปลี่ยนแปลงเทคนิคการสกัดในแผนการทดลองนี้มีเป้าหมายเพื่อวิเคราะห์ว่า Shaking Extraction ซึ่งใช้พลังงานกลในรูปแบบการเขย่าอย่างต่อเนื่อง สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดได้มากน้อยเพียงใด เมื่อเปรียบเทียบกับ Ultrasonic Extraction ที่อาศัยแรงดันจากคลื่นอัลตราซาวด์ ข้อมูลรายละเอียดของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองในแผนนี้แสดงใน ตารางที่ 4.25

จากตารางค่าการตอบสนองที่ได้จาก MODDE 7 และผลการวิเคราะห์ด้วย HPLC Chromatograms (ภาพที่ 4.73) พบว่า ปริมาณของสารสำคัญที่สกัดได้จากเหง้าไพลภายใต้เทคนิค Shaking Extraction มีแนวโน้มแตกต่างจากเทคนิค Ultrasonic Extraction อย่างชัดเจน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงเทคนิคการสกัดมีผลต่อประสิทธิภาพในการดึงสารออกมา โดยเฉพาะอย่างยิ่งใน สาร สำ คัญ ก ลุ่ม Curcuminoids (Curcumin, Demethoxycurcumin และ Bisdemethoxycurcumin) รวมถึงสาร DMPBD และ Compound D นอกจากนี้ การเปลี่ยนแปลงสภาวะการสกัดยังส่งผลต่อค่าการต้านอนุมูลอิสระ DPPH, ABTS และ FRAP ซึ่งเป็นตัวชี้วัดสำคัญของคุณภาพสารสกัด

พหุ ประสิทธิภาพ

ตารางที่ 4.25 แสดงผลการศึกษาการสกัดสารสำคัญจากเหง้าไพล์ชันตอน Optimization study
Plan 5ด้วย Central Composite Design

DESIGN POINT	PROCESS FACTOR					RESPONSE					
	X3 (mM)	X5 (min)	X9 (°C)	X7 (%EtOH)	X8 (%ADD)	Y1 (µg/ml)	Y2 (µg/ml)	Y3 (µg/ml)	Y4 (µM)	Y5 (µM)	Y6 (µM)
N1	10	60	40	20	15	91.571	221.022	68.4453	282.397	141.588	229.6
N2	30	60	40	20	5	89.416	220.007	66.2925	226.424	18.367	175.4
N3	10	180	40	20	5	91.266	221.306	68.3772	285.464	146.481	240
N4	30	180	40	20	15	92.696	223.882	69.0076	303.317	103.065	201.8
N5	10	60	60	20	5	89.993	219.011	67.1482	254.659	90.965	277
N6	30	60	60	20	15	92.332	223.226	68.7573	296.228	109.738	208.6
N7	10	180	60	20	15	90.728	220.334	67.6533	264.967	190.787	196.2
N8	30	180	60	20	5	92.964	224.55	69.2624	310.536	56.446	186
N9	10	60	40	30	5	90.678	220.245	67.6193	264.001	50.307	232.8
N10	30	60	40	30	15	92.124	222.85	68.6137	292.167	103.777	206.4
N11	10	180	40	30	15	91.859	222.374	68.4317	287.011	61.25	224
N12	30	180	40	30	5	90.053	219.859	67.1186	249.821	110.805	223.4
N13	10	60	60	30	15	92.475	223.483	68.8551	298.999	256.713	196.6
N14	30	60	60	30	5	89.142	217.94	66.033	219.076	4.666	242.6
N15	10	180	60	30	5	90.024	218.975	67.1345	250.272	135.289	242
N16	30	180	60	30	15	91.61	219.705	69.3549	278.153	104.933	255.4
N17	10	120	50	25	10	92.349	223.256	68.7686	296.55	179.844	279.6
N18	30	120	50	25	10	92.408	223.826	68.8095	297.71	108.492	262
N19	20	60	50	25	10	92.144	222.979	68.4863	288.558	119.492	259.4
N20	20	180	50	25	10	92.584	223.217	68.9301	301.126	143.101	264.4
N21	20	120	40	25	10	94.155	227.251	70.2934	339.734	258.136	303.2
N22	20	120	60	25	10	94.041	226.768	70.1091	339.513	286.339	319.2
N23	20	120	50	20	10	92.991	224.875	69.2101	309.054	162.051	270.8
N24	20	120	50	30	10	92.597	223.703	68.9393	301.384	156.891	289.6
N25	20	120	50	25	5	91.654	223.068	68.2907	283.015	133.581	281.4
N26	20	120	50	25	15	93.1	224.609	69.2852	311.181	189.186	260.6
N27	20	120	50	25	10	92.946	225.442	69.3558	311.179	199.15	300.2
N28	20	120	50	25	10	93.169	225.104	69.4741	316.53	178.688	296
N29	20	120	50	25	10	93.438	224.941	69.2352	321.763	181.446	311.4



ภาพที่ 4.72 โครมาโทแกรมของตัวอย่างสารสกัดจากเหง้าโพลในขั้นตอน Optimization study Plan 5 และสารมาตรฐานวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC

4.3.5.1 การวิเคราะห์ความสอดคล้องของแบบจำลอง (Model Adequacy Check)

การวิเคราะห์ความสอดคล้องของแบบจำลอง (Model Adequacy Check) ใน Optimization Study Plan 5 เป็นขั้นตอนสำคัญที่ใช้ประเมินคุณภาพและความถูกต้องของแบบจำลองที่สร้างขึ้นจากการทดลอง เพื่อให้แน่ใจว่าแบบจำลองมีความแม่นยำและสามารถใช้ในการพยากรณ์ค่าการตอบสนองได้อย่างน่าเชื่อถือ

จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติในตาราง Model Validation Summary (ตารางที่ 4.26) และแสดงผลผ่าน Summary of Fit (ภาพที่ 4.74) พบว่า ค่า R^2 ของทุกตัวแปรตอบสนองอยู่ในช่วงสูงมาก โดยค่า R^2 สำหรับ Compound D เท่ากับ 0.9935, DMPBD เท่ากับ 0.9979, Curcuminoid เท่ากับ 0.9961, DPPH เท่ากับ 0.9938, ABTS เท่ากับ 0.9954 และ FRAP เท่ากับ 0.9911 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้ในระดับสูงมากกว่า 99% สำหรับทุกตัวแปร ซึ่งเป็นข้อบ่งชี้ที่ดีถึงความสามารถของแบบจำลองในการจับแนวโน้มของข้อมูล

ตารางที่ 4.26 แสดง Model Validation Summary ของขั้นตอน Optimization study Plan 5

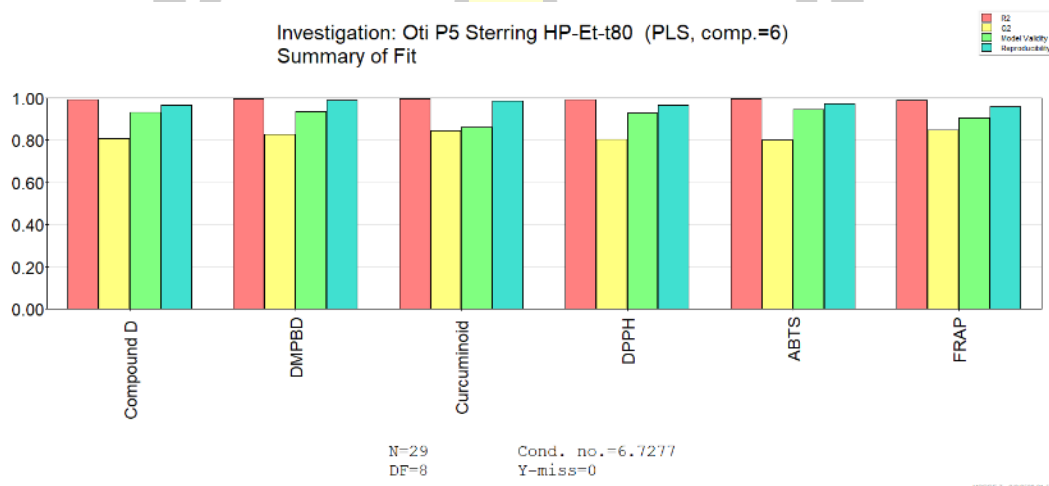
Parameters	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6
N	29	29	29	29	29	29
R^2	0.993505	0.997959	0.996132	0.993821	0.99543	0.991146
R^2 Adj.	0.97727	0.992859	0.986457	0.978374	0.984005	0.969012
Q^2	0.807549	0.829878	0.843814	0.803846	0.801045	0.84718
RSD	0.199401	0.204324	0.119565	4.3092	8.51084	7.04527

นอกจากนี้ ค่าความสัมพันธ์ที่ถูกปรับแก้ (Adjusted R^2) ของทุกตัวแปรยังคงอยู่ในระดับสูง โดย Compound D มีค่า Adjusted R^2 เท่ากับ 0.9773, DMPBD เท่ากับ 0.9929, Curcuminoid เท่ากับ 0.9865, DPPH เท่ากับ 0.9784, ABTS เท่ากับ 0.9840 และ FRAP เท่ากับ 0.9690 แสดงให้เห็นว่า แม้ว่าจำนวนตัวแปรอิสระที่ใช้ในแบบจำลองจะมากขึ้น แต่แบบจำลองยังสามารถรักษาความแม่นยำได้ดี ซึ่งหมายความว่าแบบจำลองไม่ได้เกิดปัญหาการปรับตัวมากเกินไป (Overfitting) และยังคงมีศักยภาพในการพยากรณ์ข้อมูลชุดใหม่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในส่วนของ ค่า Q^2 ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ความสามารถในการพยากรณ์ของแบบจำลอง (Predictive Ability) พบว่า ทุกค่ามีค่าอยู่ในช่วง 0.80 – 0.85 โดย Compound D มีค่า Q^2 เท่ากับ 0.8075, DMPBD เท่ากับ 0.8299, Curcuminoid เท่ากับ 0.8438, DPPH เท่ากับ 0.8038, ABTS เท่ากับ 0.8010 และ FRAP เท่ากับ 0.8472 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองมีศักยภาพในการพยากรณ์ข้อมูลชุดใหม่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยทั่วไป ค่า Q^2 ที่สูงกว่า 0.5 ถือว่ายอมรับได้ แต่ค่าที่มากกว่า 0.8 ขึ้น

ไปบ่งชี้ว่าแบบจำลองมีความสามารถในการพยากรณ์สูง ซึ่งเป็นข้อบ่งชี้ที่ดีว่าความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและค่าการตอบสนองมีแนวโน้มที่จะถูกต้องแม่นยำ

อีกตัวแปรที่ใช้ตรวจสอบความสอดคล้องของแบบจำลองคือ ค่า Residual Standard Deviation (RSD) ซึ่งเป็นตัวชี้วัดระดับของความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในแบบจำลอง พบว่าค่า RSD ของ Compound D, DMPBD และ Curcuminoid มีค่าอยู่ที่ 0.1994, 0.2043 และ 0.1196 ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำมาก แสดงให้เห็นว่าค่าที่พยากรณ์จากแบบจำลองมีความแม่นยำสูงและคลาดเคลื่อนจากค่าจริงเพียงเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม ในกรณีของตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับความสามารถต้านอนุมูลอิสระ เช่น DPPH, ABTS และ FRAP ค่า RSD สูงกว่า (4.3092, 8.5108 และ 7.0453 ตามลำดับ) ซึ่งอาจบ่งบอกถึงความแปรปรวนของข้อมูลจริงในกลุ่มตัวแปรเหล่านี้ ซึ่งมักจะเกิดขึ้นจากความซับซ้อนของกลไกปฏิกิริยาเคมีภายในสารสกัดที่ได้รับอิทธิพลจากหลายปัจจัย อย่างไรก็ตาม ค่าความคลาดเคลื่อนเหล่านี้ยังอยู่ในระดับที่สามารถยอมรับได้



ภาพที่ 4.73 กราฟ Summary of Fit แสดงผลค่า R² และ Q² สำหรับแต่ละตัวแปรของ ขั้นตอน Optimization study Plan 5

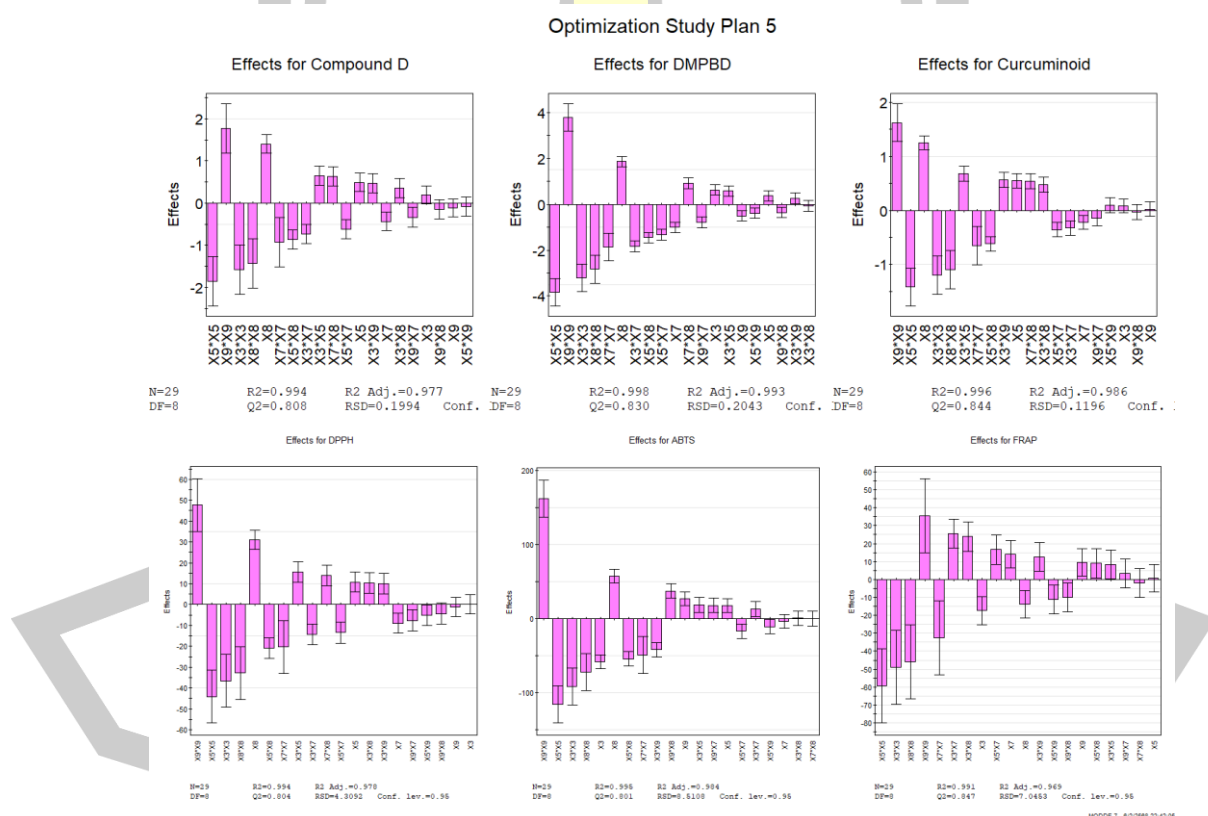
ภาพ Summary of Fit สนับสนุนข้อสังเกตดังกล่าวโดยแสดงให้เห็นว่า ค่า R², Model Validity และ Reproducibility ของทุกตัวแปรมีค่าที่สูงและใกล้เคียงกัน ซึ่งสะท้อนถึงความแม่นยำของแบบจำลองโดยรวม นอกจากนี้ ค่า Reproducibility ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ความสามารถในการทำซ้ำของแบบจำลอง (Repeatability) ก็มีค่าที่สูงมากกว่า 0.96 สำหรับทุกตัวแปร ยกเว้น FRAP ที่มีค่าประมาณ 0.96 ซึ่งยังคงถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ดีมาก

จากการวิเคราะห์ทั้งหมดข้างต้น สามารถสรุปได้ว่า แบบจำลองที่ใช้ใน Optimization Study Plan 5 มีความแม่นยำและมีความสอดคล้องกับข้อมูลการทดลองในระดับสูงมาก โดยสามารถ

อธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้ดี อีกทั้งยังมีความสามารถในการพยากรณ์ค่าการตอบสนองของตัวแปรเป้าหมายได้อย่างแม่นยำ แม้ว่าจะมีค่าความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยในตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ แต่โดยรวมแล้ว ความสอดคล้องของแบบจำลองยังอยู่ในระดับที่ดีและสามารถนำไปใช้สำหรับการพยากรณ์ผลลัพธ์ของการสกัดในสภาวะที่แตกต่างกันได้เป็นอย่างดีเชื่อก็คือ

4.3.5.2 การวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัย (Effect Analysis)

การวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัย (Effect Analysis) เป็นขั้นตอนสำคัญในการศึกษาผลของตัวแปรอิสระที่ใช้ในการทดลองต่อค่าการตอบสนองที่ได้จากกระบวนการสกัดสารสำคัญใน Optimization Study Plan 5 โดยการศึกษาครั้งนี้ใช้ Shaking Extraction ซึ่งแตกต่างจากแผนการศึกษาก่อนหน้านี้ (Plan 1-4) ที่ใช้ Ultrasonic Extraction นอกจากนี้ ยังมีการเพิ่มตัวแปรใหม่ที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิในการสกัด (X9 - Extraction Temperature) เพื่อศึกษาผลกระทบของปัจจัยอุณหภูมิที่มีต่อประสิทธิภาพของการสกัดสารสำคัญ (ภาพที่ 4.75)



ภาพที่ 4.74 ผลการวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยต่อค่าการตอบสนองใน Optimization Study Plan 5

การวิเคราะห์ผลกระทบหลัก (Main Effects Analysis) ของ Optimization Study Plan 5

การศึกษานี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยอิสระที่มีต่อค่าการตอบสนองโดยตรง โดยไม่พิจารณาผลของปัจจัยอื่นร่วมด้วย ผลการวิเคราะห์ระบุว่าปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อค่าการตอบสนอง ได้แก่ X3 (ความเข้มข้นของ HPBCD), X5 (เวลาสกัด), X7 (ความเข้มข้นของเอทานอล), X8 (ความเข้มข้นของสารเติมแต่ง) และ X9 (อุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด) ซึ่งแต่ละปัจจัยมีอิทธิพลแตกต่างกันไปตามค่าการตอบสนองที่ศึกษา

สำหรับปริมาณ Compound D พบว่าปัจจัย X8 (1.40299) และ X5 (0.489791) มีผลกระทบเชิงบวกที่ชัดเจน โดยเฉพาะ X8 ซึ่งช่วยเพิ่มปริมาณสารที่สกัดได้อย่างมีนัยสำคัญ ในทางกลับกัน X7 (-0.434245) และ X9 (-0.117221) มีแนวโน้มลดปริมาณ Compound D ที่สกัดได้นอกจากนี้ X3 (0.192139) มีผลในเชิงบวก แต่มีอิทธิพลในระดับที่ต่ำกว่าปัจจัยอื่น

ในกรณีของปริมาณ DMPBD พบว่า X8 (1.86302) มีผลเชิงบวกสูงสุด ขณะที่ X5 (0.37473) และ X3 (0.623856) ส่งผลกระทบบวกเล็กน้อยต่อค่าการตอบสนอง ตรงกันข้าม X7 (-1.00319) และ X9 (-0.514469) มีผลกระทบเชิงลบอย่างชัดเจน โดยเฉพาะ X7 ที่มีแนวโน้มลดประสิทธิภาพการสกัด DMPBD

สำหรับปริมาณ Curcuminoid พบว่า X8 (1.25458) เป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยเพิ่มปริมาณ Curcuminoid ที่สกัดได้ ขณะที่ X5 (0.549436) มีอิทธิพลในเชิงบวกในระดับปานกลาง ส่วน X7 (-0.219565) และ X9 (0.0252344) มีผลกระทบต่อการตอบสนองเพียงเล็กน้อย ด้าน X3 (0.0848073) แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของปริมาณ Curcuminoid ที่สกัดได้แต่ในระดับต่ำ

สำหรับฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH พบว่า X8 (30.9723) มีบทบาทสำคัญในการเสริมฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระมากที่สุด รองลงมาคือ X5 (10.7878) ที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการในทางตรงกันข้าม X7 (-8.89467) และ X9 (-1.18945) ส่งผลกระทบบวกต่อการตอบสนอง ขณะที่ X3 (0.172051) มีผลกระทบเชิงบวกเพียงเล็กน้อย

สำหรับฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ABTS พบว่า X8 (56.9951) เป็นปัจจัยหลักที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระอย่างมีนัยสำคัญ ขณะที่ X5 (17.2438) และ X7 (18.78) มีบทบาทเสริมในเชิงบวก แม้ว่า X3 (-58.8532) จะมีแนวโน้มลดฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระอย่างมาก แต่ X9 (26.8684) สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพได้ในระดับหนึ่ง

สำหรับฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ FRAP พบว่า X8 (-13.7091) และ X3 (-17.4565) มีผลลดประสิทธิภาพของฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ในขณะที่ X5 (44.52) มีบทบาทสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการ นอกจากนี้ X7 (13.9695) และ X9 (9.4975) มีผลกระทบเชิงบวกในระดับปานกลาง

จากผลการวิเคราะห์พบว่าปัจจัย X8 และ X5 มีแนวโน้มส่งผลเชิงบวกต่อค่าการตอบสนอง โดยเฉพาะ X8 ซึ่งช่วยเสริมประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดได้อย่างมีนัยสำคัญ ตรงกันข้าม X3 และ X7 มีแนวโน้มลดประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดในหลายค่าการตอบสนอง โดยเฉพาะฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ นอกจากนี้ X9 มีบทบาทสนับสนุนในบางกรณี การควบคุมระดับของปัจจัยเหล่านี้ อย่างเหมาะสมเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดและคุณภาพของสารสกัดที่ได้

การวิเคราะห์ผลกระทบของการปฏิสัมพันธ์ (Interaction Effects Analysis) ใน Optimization Study Plan 5

การศึกษานี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยอิสระที่มีต่อค่าการตอบสนองโดยตรง โดยไม่พิจารณาผลของปัจจัยอื่นร่วมด้วย ผลการวิเคราะห์ระบุว่าปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อค่าการตอบสนอง ได้แก่ X3 (ความเข้มข้นของ HPBCD), X5 (เวลาสกัด), X7 (ความเข้มข้นของเอทานอล), X8 (ความเข้มข้นของสารเติมแต่ง) และ X9 (อุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด) ซึ่งแต่ละปัจจัยมีอิทธิพลแตกต่างกันไปตามค่าการตอบสนองที่ศึกษา

สำหรับปริมาณ Compound D พบว่าปัจจัย X8 (1.40299) และ X5 (0.489791) มีผลกระทบเชิงบวกที่ชัดเจน โดยเฉพาะ X8 ซึ่งช่วยเพิ่มปริมาณสารที่สกัดได้อย่างมีนัยสำคัญ ในทางกลับกัน X7 (-0.434245) และ X9 (-0.117221) มีแนวโน้มลดปริมาณ Compound D ที่สกัดได้ นอกจากนี้ X3 (0.192139) มีผลในเชิงบวก แต่มีอิทธิพลในระดับที่ต่ำกว่าปัจจัยอื่น

ในกรณีของปริมาณ DMPBD พบว่า X8 (1.86302) มีผลเชิงบวกสูงสุด ขณะที่ X5 (0.37473) และ X3 (0.623856) ส่งผลกระทบบวกเล็กน้อยต่อค่าการตอบสนอง ตรงกันข้าม X7 (-1.00319) และ X9 (-0.514469) มีผลกระทบเชิงลบอย่างชัดเจน โดยเฉพาะ X7 ที่มีแนวโน้มลดประสิทธิภาพการสกัด DMPBD

สำหรับปริมาณ Curcuminoid พบว่า X8 (1.25458) เป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยเพิ่มปริมาณ Curcuminoid ที่สกัดได้ ขณะที่ X5 (0.549436) มีอิทธิพลในเชิงบวกในระดับปานกลาง ส่วน X7 (-0.219565) และ X9 (0.0252344) มีผลกระทบต่อการตอบสนองเพียงเล็กน้อย ด้าน X3 (0.0848073) แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของปริมาณ Curcuminoid ที่สกัดได้แต่ในระดับต่ำ

สำหรับฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH พบว่า X8 (30.9723) มีบทบาทสำคัญในการเสริมฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระมากที่สุด รองลงมาคือ X5 (10.7878) ที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการ ในทางตรงกันข้าม X7 (-8.89467) และ X9 (-1.18945) ส่งผลกระทบบวกต่อการตอบสนอง ขณะที่ X3 (0.172051) มีผลกระทบเชิงบวกเพียงเล็กน้อย

สำหรับฤทธิ์ด้านอนุมูลอิสระ ABTS พบว่า X8 (56.9951) เป็นปัจจัยหลักที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระอย่างมีนัยสำคัญ ขณะที่ X5 (17.2438) และ X7 (18.78) มีบทบาทเสริมในเชิงบวก แม้ว่า X3 (-58.8532) จะมีแนวโน้มลดฤทธิ์ด้านอนุมูลอิสระอย่างมาก แต่ X9 (26.8684) สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพได้ในระดับหนึ่ง

สำหรับฤทธิ์ด้านอนุมูลอิสระ FRAP พบว่า X8 (-13.7091) และ X3 (-17.4565) มีผลลดประสิทธิภาพของฤทธิ์ด้านอนุมูลอิสระ ในขณะที่ X5 (44.52) มีบทบาทสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการ นอกจากนี้ X7 (13.9695) และ X9 (9.4975) มีผลกระทบเชิงบวกในระดับปานกลาง

จากผลการวิเคราะห์พบว่าปัจจัย X8 และ X5 มีแนวโน้มส่งผลเชิงบวกต่อค่าการตอบสนอง โดยเฉพาะ X8 ซึ่งช่วยเสริมประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดได้อย่างมีนัยสำคัญ ตรงกันข้าม X3 และ X7 มีแนวโน้มลดประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดในหลายค่าการตอบสนอง โดยเฉพาะฤทธิ์ด้านอนุมูลอิสระ นอกจากนี้ X9 มีบทบาทสนับสนุนในบางกรณี การควบคุมระดับของปัจจัยเหล่านี้ อย่างเหมาะสมเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดและคุณภาพของสารสกัดที่ได้

การวิเคราะห์ผลกระทบเชิงกำลังสอง (Quadratic Effects Analysis) ใน Optimization Study Plan 5

การศึกษานี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยอิสระที่มีต่อค่าการตอบสนองโดยตรง โดยไม่พิจารณาผลของปัจจัยอื่นร่วมด้วย ผลการวิเคราะห์ระบุว่าปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อค่าการตอบสนอง ได้แก่ X3 (ความเข้มข้นของ HPBCD), X5 (เวลาสกัด), X7 (ความเข้มข้นของเอทานอล), X8 (ความเข้มข้นของสารเติมแต่ง) และ X9 (อุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด) ซึ่งแต่ละปัจจัยมีอิทธิพลแตกต่างกันไปตามค่าการตอบสนองที่ศึกษา

สำหรับปริมาณ Compound D พบว่าปัจจัย X8 (1.40299) และ X5 (0.489791) มีผลกระทบเชิงบวกที่ชัดเจน โดยเฉพาะ X8 ซึ่งช่วยเพิ่มปริมาณสารที่สกัดได้อย่างมีนัยสำคัญ ในทางกลับกัน X7 (-0.434245) และ X9 (-0.117221) มีแนวโน้มลดปริมาณ Compound D ที่สกัดได้ นอกจากนี้ X3 (0.192139) มีผลในเชิงบวก แต่มีอิทธิพลในระดับที่ต่ำกว่าปัจจัยอื่น

ในกรณีของปริมาณ DMPBD พบว่า X8 (1.86302) มีผลเชิงบวกสูงสุด ขณะที่ X5 (0.37473) และ X3 (0.623856) ส่งผลกระทบเชิงบวกเล็กน้อยต่อค่าการตอบสนอง ตรงกันข้าม X7 (-1.00319) และ X9 (-0.514469) มีผลกระทบเชิงลบอย่างชัดเจน โดยเฉพาะ X7 ที่มีแนวโน้มลดประสิทธิภาพการสกัด DMPBD

สำหรับปริมาณ Curcuminoid พบว่า X8 (1.25458) เป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยเพิ่มปริมาณ Curcuminoid ที่สกัดได้ ขณะที่ X5 (0.549436) มีอิทธิพลในเชิงบวกในระดับปานกลาง ส่วน X7 (-0.219565) และ X9 (0.0252344) มีผลกระทบต่อการตอบสนองเพียงเล็กน้อย ด้าน X3 (0.0848073) แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของปริมาณ Curcuminoid ที่สกัดได้แต่ในระดับต่ำ

สำหรับฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH พบว่า X8 (30.9723) มีบทบาทสำคัญในการเสริมฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระมากที่สุด รองลงมาคือ X5 (10.7878) ที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการในทางตรงกันข้าม X7 (-8.89467) และ X9 (-1.18945) ส่งผลกระทบเชิงลบต่อการตอบสนอง ขณะที่ X3 (0.172051) มีผลกระทบเชิงบวกเพียงเล็กน้อย

สำหรับฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ABTS พบว่า X8 (56.9951) เป็นปัจจัยหลักที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระอย่างมีนัยสำคัญ ขณะที่ X5 (17.2438) และ X7 (18.78) มีบทบาทเสริมในเชิงบวก แม้ว่า X3 (-58.8532) จะมีแนวโน้มลดฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระอย่างมาก แต่ X9 (26.8684) สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพได้ในระดับหนึ่ง

สำหรับฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ FRAP พบว่า X8 (-13.7091) และ X3 (-17.4565) มีผลลดประสิทธิภาพของฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ในขณะที่ X5 (44.52) มีบทบาทสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการ นอกจากนี้ X7 (13.9695) และ X9 (9.4975) มีผลกระทบเชิงบวกในระดับปานกลาง

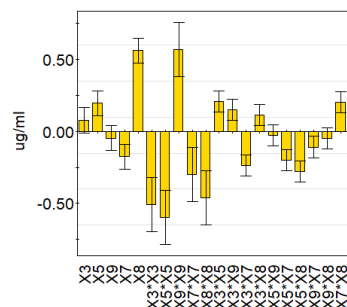
จากผลการวิเคราะห์พบว่าปัจจัย X8 และ X5 มีแนวโน้มส่งผลเชิงบวกต่อการตอบสนอง โดยเฉพาะ X8 ซึ่งช่วยเสริมประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดได้อย่างมีนัยสำคัญ ตรงกันข้าม X3 และ X7 มีแนวโน้มลดประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดในหลายค่าการตอบสนอง โดยเฉพาะฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ นอกจากนี้ X9 มีบทบาทสนับสนุนในบางกรณี การควบคุมระดับของปัจจัยเหล่านี้ อย่างเหมาะสมเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดและคุณภาพของสารสกัดที่ได้

4.3.5.3 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Model Building) ใน Optimization Study Plan 5

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใน Optimization Study Plan 5 เป็นกระบวนการที่สำคัญในการทำความเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระที่ใช้ในการสกัดสารออกฤทธิ์กับค่าการตอบสนองที่ได้ แบบจำลองเชิงสถิติที่สร้างขึ้นนี้ช่วยในการทำนายผลการทดลองและหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการสกัดสาร ซึ่งบ่งบอกว่าปัจจัยที่เลือกใช้ในกระบวนการสกัดมีความสัมพันธ์กับค่าการตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ (รูปที่ 4.76)

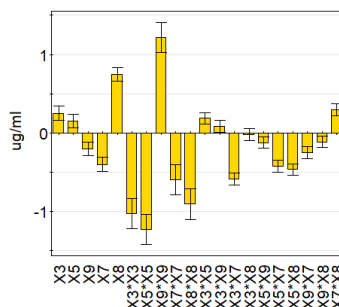
Optimization Study Plan 5

Scaled & Centered Coefficients for Compound



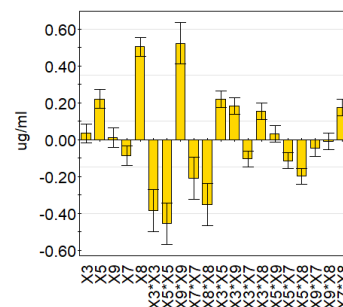
N=29
DF=8
R²=0.994
Q²=0.808
R² Adj.=0.977
RSD=0.1994
Conf.

Scaled & Centered Coefficients for DMPBD



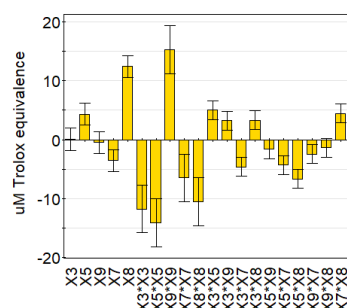
N=29
DF=8
R²=0.998
Q²=0.830
R² Adj.=0.993
RSD=0.2043
Conf.

Scaled & Centered Coefficients for Curcuminol



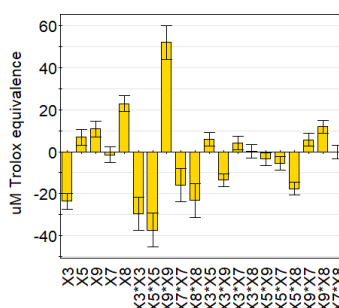
N=29
DF=8
R²=0.996
Q²=0.844
R² Adj.=0.986
RSD=0.1196
Conf.

Scaled & Centered Coefficients for DPPH



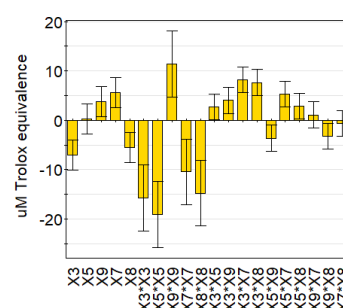
N=29
DF=8
R²=0.994
Q²=0.804
R² Adj.=0.978
RSD=4.3092
Conf.

Scaled & Centered Coefficients for ABTS



N=29
DF=8
R²=0.995
Q²=0.801
R² Adj.=0.984
RSD=8.5108
Conf.

Scaled & Centered Coefficients for FRAP



N=29
DF=8
R²=0.991
Q²=0.847
R² Adj.=0.969
RSD=7.0453
Conf.

MOORE 7 - 5/2/2008 12:43:03

ภาพที่ 4.75 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของปัจจัยที่มีผลต่อค่าการตอบสนอง ใน Optimization Study Plan 5

• การสร้างแบบจำลองสำหรับ Compound D ของ Optimization Study Plan 5

การศึกษาการสกัด Compound D ใน Optimization Study Plan 5 ใช้การถดถอยเชิงพหุ (Multiple Regression Analysis) เพื่อสร้างแบบจำลองที่ช่วยอธิบายพฤติกรรมของกระบวนการสกัดได้อย่างแม่นยำ โดยวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยเชิงเส้น ผลกระทบเชิงกำลังสอง และปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณ Compound D ที่สกัดได้ ซึ่งแต่ละปัจจัยมีบทบาทสำคัญในประสิทธิภาพการสกัด โดย HPBCD ทำหน้าที่เป็นตัวช่วยละลายเพื่อเพิ่มการละลายของสารสำคัญ เวลาสกัดส่งผลต่อการสกัดอย่างต่อเนื่อง ความเข้มข้นของเอทานอลและสารเติมแต่งช่วยเพิ่มอัตราการสกัด ขณะที่อุณหภูมิอาจส่งผลต่อความเสถียรของสารประกอบ

สมการเชิงพหุนามที่ใช้พยากรณ์ค่าการตอบสนองของ Compound D สามารถแสดงได้ดังนี้

$$Y1 = 93.20 + 0.08X3 + 0.20X5 - 0.05X9 - 0.17X7 + 0.56X8 - 0.51X3^2 - 0.60X5^2 + 0.57X9^2 - 0.30X7^2 - 0.46X8^2 + 0.21X3X5 + 0.15X3X9 - 0.24X3X7 + 0.11X3X8 - 0.03X5X9 - 0.20X5X7 - 0.28X5X8 - 0.11X9X7 - 0.05X9X8 + 0.20X7X8$$

จากสมการ พบว่า X8 (สารเติมแต่ง) มีผลบวกต่อปริมาณ Compound D ที่สกัดได้อย่างชัดเจน แสดงว่าการเติมสารช่วยส่งเสริมการละลายและเพิ่มผลผลิต ขณะที่ X7 (เอทานอล) มีผลเชิงลบเมื่อใช้ในปริมาณสูง อาจเกิดจากการละลายที่มากเกินไปทำให้สารสำคัญบางส่วนสูญเสียไป X5 (เวลาสกัด) มีแนวโน้มเพิ่มผลผลิตอย่างมีนัยสำคัญ แต่หากใช้เวลานานเกินไปอาจทำให้เกิดภาวะอิมัตวและลดประสิทธิภาพการสกัด X3 (HPBCD) มีบทบาทในการเสริมการละลายของสารสำคัญ ส่วน X9 (อุณหภูมิ) สามารถส่งผลต่ออัตราการสกัด โดยหากสูงเกินไปอาจทำให้สารบางชนิดเสื่อมสลาย

ผลกระทบเชิงกำลังสองของ X3, X5, X7, X8 และ X9 แสดงให้เห็นว่าเมื่อค่าของปัจจัยเหล่านี้สูงเกินกว่าระดับที่เหมาะสม ปริมาณ Compound D ที่สกัดได้อาจลดลง ซึ่งเป็นไปได้ว่าเกิดการเสื่อมสลายของสารสำคัญหรือสภาวะที่ไม่เอื้อต่อการละลาย นอกจากนี้ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยบางคู่มีบทบาทสำคัญ โดยพบว่า X3X5 มีผลเสริมกัน หมายความว่าหากใช้ HPBCD และเพิ่มเวลาสกัดให้เหมาะสม จะช่วยเพิ่มปริมาณ Compound D ในขณะที่ X5X7 และ X5X8 มีแนวโน้มลดปริมาณที่สกัดได้ ซึ่งอาจเกิดจากการใช้เวลานานร่วมกับเอทานอลและสารเติมแต่งที่ทำให้สมดุลการละลายเปลี่ยนไป

แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นได้รับการประเมินความถูกต้องโดยพิจารณาค่าทางสถิติ ค่า R^2 เท่ากับ 0.994 แสดงว่าแบบจำลองสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้ในระดับสูง ค่า Adjusted R^2 เท่ากับ 0.977 บ่งชี้ถึงความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง และค่า RSD (Root Standard Deviation) เท่ากับ 0.1994 สะท้อนถึงความแม่นยำของการทำนาย นอกจากนี้ ค่า p-value ของ Lack of Fit มากกว่า 0.05 แสดงว่าแบบจำลองมีความเหมาะสมและไม่มีปัญหาในการอธิบายข้อมูล

จากผลการศึกษา สมการที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้ทำนายปริมาณ Compound D ได้อย่างแม่นยำ ปัจจัยสำคัญที่ควบคุมการสกัดคือ X8 (สารเติมแต่ง) ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการ ขณะที่การใช้เอทานอลและอุณหภูมิที่สูงเกินไปอาจลดปริมาณสารที่สกัดได้ ความเข้าใจเกี่ยวกับผลกระทบของปัจจัยเหล่านี้จะช่วยกำหนดสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการสกัด Compound D ให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด

● การสร้างแบบจำลองสำหรับ DMPBD ของ Optimization Study Plan 5

การศึกษาการสกัด DMPBD ใน Optimization Study Plan 5 ใช้การถดถอยเชิงพหุ (Multiple Regression Analysis) เพื่อพัฒนาแบบจำลองที่สามารถอธิบายพฤติกรรมของกระบวนการสกัดได้อย่างแม่นยำ โดยวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยเชิงเส้น ผลกระทบเชิงกำลังสอง และปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณ DMPBD ที่สกัดได้ โดยแต่ละปัจจัยมีบทบาทสำคัญต่อการเพิ่มหรือลดปริมาณสารที่สกัดได้ HPBCD ช่วยเสริมการละลายของสารสำคัญ เวลาสกัด ควบคุมอัตราการดึงสารออกจากวัสดุ ความเข้มข้นของเอทานอลและสารเติมแต่งส่งผลต่อความสามารถในการละลายของสารเป้าหมาย ขณะที่อุณหภูมิอาจส่งผลต่อเสถียรภาพของสารสำคัญ

สมการเชิงพหุนามที่ใช้พยากรณ์ค่าการตอบสนองของ DMPBD สามารถแสดงได้ดังนี้

$$Y_2 = 225.16 + 0.25X_3 + 0.15X_5 - 0.21X_9 - 0.40X_7 + 0.75X_8 - 1.03X_3^2 - 1.23X_5^2 + 1.22X_9^2 - 0.60X_7^2 - 0.91X_8^2 + 0.18X_3X_5 + 0.08X_3X_9 - 0.59X_3X_7 - 0.02X_3X_8 - 0.12X_5X_9 - 0.43X_5X_7 - 0.47X_5X_8 - 0.25X_9X_7 - 0.11X_9X_8 + 0.29X_7X_8$$

จากสมการ พบว่า X_8 (สารเติมแต่ง) มีผลบวกอย่างชัดเจนต่อปริมาณ DMPBD ที่สกัดได้ สะท้อนว่าการเพิ่มสารเติมแต่งช่วยเพิ่มอัตราการสกัด ในขณะที่ X_7 (เอทานอล) มีผลเชิงลบเมื่อใช้ในระดับที่สูง อาจเป็นเพราะการใช้เอทานอลมากเกินไปทำให้เกิดสภาวะที่ไม่เหมาะสมต่อการละลายของ DMPBD X_5 (เวลาสกัด) มีแนวโน้มเพิ่มผลผลิต แต่หากใช้เวลานานเกินไปอาจเกิดภาวะอึดตัวและลดประสิทธิภาพของกระบวนการ X_3 (HPBCD) มีบทบาทสำคัญในการเสริมการละลายของสารสำคัญ ส่วน X_9 (อุณหภูมิ) สามารถกระตุ้นหรือทำลายสารขึ้นอยู่กับระดับที่ใช้

ผลกระทบเชิงกำลังสองของ X_3 , X_5 , X_7 , X_8 และ X_9 แสดงให้เห็นว่าหากปัจจัยเหล่านี้เกินกว่าระดับที่เหมาะสม ปริมาณ DMPBD ที่สกัดได้จะลดลง ซึ่งอาจเกิดจากภาวะอึดตัวของสารสกัด หรือการเสื่อมสลายของสารสำคัญ นอกจากนี้ ปฏิสัมพันธ์ของปัจจัยมีบทบาทสำคัญ พบว่า X_3X_5 มีผลเสริมกัน หมายถึงการใช้ HPBCD ร่วมกับเวลาสกัดที่เหมาะสมช่วยเพิ่มการสกัด DMPBD ในขณะที่ X_5X_7 และ X_5X_8 มีแนวโน้มลดปริมาณที่สกัดได้ ซึ่งอาจเป็นเพราะปฏิกิริยาของสารละลายที่ทำให้สมดุลของกระบวนการเปลี่ยนไป

แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นได้รับการประเมินความถูกต้องโดยพิจารณาค่าทางสถิติ ค่า R^2 เท่ากับ 0.998 แสดงว่าแบบจำลองสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้เกือบทั้งหมด ค่า Adjusted R^2 เท่ากับ 0.993 บ่งชี้ว่าแบบจำลองมีความน่าเชื่อถือสูง และค่า RSD (Root Standard Deviation)

เท่ากับ 0.2043 บ่งบอกถึงความแม่นยำของการพยากรณ์ นอกจากนี้ ค่า p-value ของ Lack of Fit มากกว่า 0.05 แสดงว่าแบบจำลองมีความเหมาะสมและสามารถใช้อธิบายกระบวนการสกัด DMPBD ได้อย่างถูกต้อง

จากผลการศึกษา สมการที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้ทำนายปริมาณ DMPBD ได้อย่างแม่นยำ ปัจจัยที่มีอิทธิพลสูงสุดคือ X8 (สารเติมแต่ง) ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการ ในขณะที่การใช้เอทานอลและอุณหภูมิที่สูงเกินไปอาจลดปริมาณสารที่สกัดได้ การเข้าใจผลกระทบของปัจจัยเหล่านี้จะช่วยให้กำหนดสภาวะที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้การสกัด DMPBD มีประสิทธิภาพสูงสุด

● การสร้างแบบจำลองสำหรับ Curcuminoid ของ Optimization Study Plan 5

การศึกษาการสกัด Curcuminoid ใน Optimization Study Plan 5 ใช้การถดถอยเชิงพหุ (Multiple Regression Analysis) เพื่อพัฒนาแบบจำลองที่สามารถอธิบายพฤติกรรมของกระบวนการสกัดได้อย่างแม่นยำ โดยวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยเชิงเส้น ผลกระทบเชิงกำลังสอง และปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณ Curcuminoid ที่สกัดได้ โดยแต่ละปัจจัยมีบทบาทสำคัญต่อกระบวนการสกัด HPBCD ทำหน้าที่เป็นตัวช่วยละลายเพื่อเพิ่มความสามารถในการละลายของสารสำคัญ เวลาสกัดเป็นตัวกำหนดอัตราการดึงสารออกมา ความเข้มข้นของเอทานอลและสารเติมแต่งมีผลต่อความสามารถในการละลายของสารเป้าหมาย ขณะที่อุณหภูมิสามารถส่งผลต่อความเสถียรของสาร Curcuminoid

สมการเชิงพหุนามที่ใช้พยากรณ์ค่าการตอบสนองของ Curcuminoid สามารถแสดงได้ดังนี้

$$Y3 = 69.38 + 0.03X3 + 0.22X5 + 0.01X9 - 0.09X7 + 0.50X8 - 0.39X3^2 - 0.46X5^2 + 0.52X9^2 - 0.21X7^2 - 0.35X8^2 + 0.22X3X5 + 0.18X3X9 - 0.11X3X7 + 0.15X3X8 + 0.03X5X9 - 0.11X5X7 - 0.20X5X8 - 0.05X9X7 - 0.01X9X8 + 0.17X7X8$$

จากสมการ พบว่า X8 (สารเติมแต่ง) มีผลบวกอย่างชัดเจนต่อปริมาณ Curcuminoid ที่สกัดได้ สะท้อนว่าการเติมสารช่วยเพิ่มอัตราการสกัด ขณะที่ X7 (เอทานอล) มีผลเชิงลบเมื่อใช้ในระดับที่สูง อาจเป็นเพราะการละลายของสารเป้าหมายลดลงเมื่อมีเอทานอลมากเกินไป X5 (เวลาสกัด) มีแนวโน้มช่วยเพิ่มปริมาณสารที่สกัดได้ แต่หากใช้เวลานานเกินไปอาจเกิดภาวะอึดตัวและลดประสิทธิภาพการสกัด X3 (HPBCD) มีบทบาทสำคัญในการเพิ่มการละลายของสารสำคัญ ส่วน X9 (อุณหภูมิ) อาจช่วยเร่งกระบวนการสกัดหรือทำให้สารสำคัญเสื่อมสลายได้ ขึ้นอยู่กับระดับที่ใช้

ผลกระทบเชิงกำลังสองของ X3, X5, X7, X8 และ X9 แสดงให้เห็นว่าเมื่อปัจจัยเหล่านี้เกินกว่าระดับที่เหมาะสม ปริมาณ Curcuminoid ที่สกัดได้อาจลดลง ซึ่งอาจเป็นผลจากการเสื่อมสลายของสารสำคัญหรือสภาวะที่ไม่เหมาะสมต่อการละลาย นอกจากนี้ การปฏิสัมพันธ์ของปัจจัยบางคู่ เช่น X3X5 และ X3X9 มีผลเสริมกัน หมายความว่า การใช้ HPBCD ควบคู่กับเวลาสกัดที่เหมาะสม ช่วยเพิ่มปริมาณ Curcuminoid ที่สกัดได้ ขณะที่ X5X7 และ X5X8 มีแนวโน้มลดปริมาณที่สกัดได้ ซึ่งอาจเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างสารละลายที่เปลี่ยนสมดุลของกระบวนการ

แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นได้รับการประเมินความถูกต้องโดยพิจารณาค่าทางสถิติ ค่า R^2 เท่ากับ 0.996 แสดงว่าแบบจำลองสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้เกือบทั้งหมด ค่า Adjusted R^2 เท่ากับ 0.986 บ่งชี้ว่าแบบจำลองมีความน่าเชื่อถือสูง และค่า RSD (Root Standard Deviation) เท่ากับ 0.1196 บ่งบอกถึงความแม่นยำของการพยากรณ์ นอกจากนี้ ค่า p-value ของ Lack of Fit มากกว่า 0.05 แสดงว่าแบบจำลองมีความเหมาะสมและสามารถใช้เพื่ออธิบายกระบวนการสกัด Curcuminoid ได้อย่างถูกต้อง

จากผลการศึกษา สมการที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้ทำนายปริมาณ Curcuminoid ได้อย่างแม่นยำ ปัจจัยที่มีอิทธิพลสูงสุดคือ X8 (สารเติมแต่ง) ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการ ในขณะที่การใช้เอทานอลและอุณหภูมิที่สูงเกินไปอาจลดปริมาณสารที่สกัดได้ ความเข้าใจผลกระทบของปัจจัยเหล่านี้จะช่วยกำหนดสภาวะที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้การสกัด Curcuminoid มีประสิทธิภาพสูงสุด

● การสร้างแบบจำลองสำหรับค่าการตอบสนอง DPPH ของ Optimization Study Plan 5

การศึกษาการสกัด DPPH ใน Optimization Study Plan 5 ใช้การถดถอยเชิงพหุ (Multiple Regression Analysis) เพื่อพัฒนาแบบจำลองที่สามารถอธิบายพฤติกรรมของกระบวนการสกัดได้อย่างแม่นยำ โดยวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยเชิงเส้น ผลกระทบเชิงกำลังสอง และปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีผลต่อการต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดที่ประเมินโดย DPPH โดย HPBCD ทำหน้าที่เพิ่มความสามารถในการละลายของสารต้านอนุมูลอิสระ เวลาสกัดควบคุมอัตราการดึงสารออกจากวัสดุ ความเข้มข้นของเอทานอลและสารเติมแต่งมีผลต่อการละลายของสารเป้าหมาย ขณะที่อุณหภูมิส่งผลต่อความเสถียรของสารต้านอนุมูลอิสระ

สมการเชิงพหุนามที่ใช้พยากรณ์ค่าการตอบสนองของ DPPH สามารถแสดงได้ดังนี้

$$Y_4 = 315.68 + 0.07X_3 + 4.32X_5 - 0.48X_9 - 3.57X_7 + 12.42X_8 - 11.76X_3^2 - 14.16X_5^2 + 15.31X_9^2 - 6.51X_7^2 - 10.53X_8^2 + 5.03X_3X_5 + 3.20X_3X_9 - 4.60X_3X_7 + 3.29X_3X_8 - 1.62X_5X_9 - 4.33X_5X_7 - 6.69X_5X_8 - 2.43X_9X_7 - 1.38X_9X_8 + 4.46X_7X_8$$

จากสมการ พบว่า X_8 (สารเติมแต่ง) มีผลบวกอย่างชัดเจนต่อค่าการต้านอนุมูลอิสระของสารสกัด ซึ่งหมายความว่า การเติมสารช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระ ขณะที่ X_7 (เอทานอล) มีผลเชิงลบเมื่อใช้ในระดับที่สูง อาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงสมดุลของการละลายของสารต้านอนุมูลอิสระ X_5 (เวลาสกัด) มีแนวโน้มช่วยเพิ่มค่าการต้านอนุมูลอิสระของสารสกัด แต่หากใช้เวลานานเกินไป อาจทำให้เกิดภาวะอิ่มตัวและลดประสิทธิภาพ X_3 (HPBCD) ช่วยปรับปรุงการละลายของสารสำคัญ ส่วน X_9 (อุณหภูมิ) อาจเร่งการทำงานของสารต้านอนุมูลอิสระหรือทำให้สารเสื่อมสลายได้ ขึ้นอยู่กับระดับที่ใช้

ผลกระทบเชิงกำลังสองของ X_3 , X_5 , X_7 , X_8 และ X_9 แสดงให้เห็นว่าหากใช้ในระดับที่สูงเกินไป อาจทำให้ค่าการต้านอนุมูลอิสระลดลง ซึ่งเป็นผลจากการเสื่อมสลายของสารสำคัญ นอกจากนี้ การปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยบางคู่ เช่น X_3X_5 และ X_3X_9 มีผลเสริมกัน หมายความว่า การใช้ HPBCD ควบคู่กับเวลาสกัดที่เหมาะสมช่วยเพิ่มค่าการต้านอนุมูลอิสระของสารสกัด ขณะที่ X_5X_7 และ X_5X_8 มีแนวโน้มลดค่าการตอบสนอง ซึ่งอาจเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างสารละลายที่เปลี่ยนสมดุลของกระบวนการ

แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นได้รับการประเมินความถูกต้องโดยพิจารณาค่าทางสถิติ ค่า R^2 เท่ากับ 0.994 แสดงว่าแบบจำลองสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้เกือบทั้งหมด ค่า Adjusted R^2 เท่ากับ 0.978 บ่งชี้ว่าแบบจำลองมีความน่าเชื่อถือสูง และค่า RSD (Root Standard Deviation) เท่ากับ 4.3092 บ่งบอกถึงความแม่นยำของการพยากรณ์ นอกจากนี้ ค่า p-value ของ Lack of Fit มากกว่า 0.05 แสดงว่าแบบจำลองมีความเหมาะสมและสามารถใช้อธิบายกระบวนการสกัด DPPH ได้อย่างถูกต้อง

จากผลการศึกษา สมการที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้ทำนายค่าการต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดได้อย่างแม่นยำ ปัจจัยที่มีอิทธิพลสูงสุดคือ X_8 (สารเติมแต่ง) ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของสารสกัด ในขณะที่การใช้เอทานอลและอุณหภูมิที่สูงเกินไปอาจลดค่าการต้านอนุมูลอิสระ ความเข้าใจผลกระทบของปัจจัยเหล่านี้จะช่วยกำหนดสภาวะที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้การสกัดสารต้านอนุมูลอิสระ DPPH มีประสิทธิภาพสูงสุด

● การสร้างแบบจำลองสำหรับค่าการตอบสนอง ABTS ของ Optimization Study Plan 5

การศึกษาการสกัด ABTS ใน Optimization Study Plan 5 ใช้การถดถอยเชิงพหุ (Multiple Regression Analysis) เพื่อพัฒนาแบบจำลองที่สามารถอธิบายพฤติกรรมของกระบวนการสกัดได้อย่างแม่นยำ โดยวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยเชิงเส้น ผลกระทบเชิงกำลังสอง และปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีผลต่อค่าการต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดที่ประเมินโดย ABTS โดย HPBCD ทำหน้าที่เพิ่มความสามารถในการละลายของสารต้านอนุมูลอิสระ เวลาสกัดควบคุมอัตราการดึงสารออกจากวัสดุ ความเข้มข้นของเอทานอลและสารเติมแต่งมีผลต่อการละลายของสารเป้าหมาย ขณะที่อุณหภูมิส่งผลต่อความเสถียรของสารต้านอนุมูลอิสระ

สมการเชิงพหุนามที่ใช้พยากรณ์ค่าการตอบสนองของ ABTS สามารถแสดงได้ดังนี้

$$Y5 = 189.39 - 23.59X3 + 6.91X5 + 10.77X9 - 1.49X7 + 22.85X8 - 29.55X3^2 - 37.36X5^2 + 52.08X9^2 - 15.94X7^2 - 23.18X8^2 + 5.88X3X5 - 13.55X3X9 + 4.09X3X7 + 0.16X3X8 - 3.51X5X9 - 5.48X5X7 - 17.59X5X8 + 5.69X9X7 + 11.88X9X8 - 0.06X7X8$$

จากสมการ พบว่า X8 (สารเติมแต่ง) มีผลบวกอย่างชัดเจนต่อค่าการต้านอนุมูลอิสระของสารสกัด ซึ่งหมายความว่าสารเติมแต่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระ ขณะที่ X3 (HPBCD) มีผลลบในระดับสูง แสดงว่าหากใช้มากเกินไปอาจส่งผลต่อโครงสร้างของสารสำคัญ X5 (เวลาสกัด) และ X9 (อุณหภูมิ) มีแนวโน้มช่วยเพิ่มค่าการต้านอนุมูลอิสระของสารสกัด แต่หากใช้มากเกินไปอาจทำให้สารสำคัญบางส่วนเสื่อมสลาย X7 (เอทานอล) ไม่มีผลกระทบที่ชัดเจนต่อปริมาณ ABTS ที่วัดได้

ผลกระทบเชิงกำลังสองของ X3, X5, X7, X8 และ X9 แสดงให้เห็นว่าหากใช้ในระดับที่สูงเกินไป อาจทำให้ค่าการต้านอนุมูลอิสระลดลง ซึ่งเป็นผลจากการเสื่อมสลายของสารสำคัญ นอกจากนี้ การปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยบางคู่ เช่น X3X5 และ X9X7 มีผลเสริมกัน หมายความว่า การใช้ HPBCD ควบคู่กับเวลาสกัดที่เหมาะสมช่วยเพิ่มค่าการต้านอนุมูลอิสระของสารสกัด ขณะที่ X5X8 และ X3X9 มีแนวโน้มลดค่าการตอบสนอง ซึ่งอาจเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างสารละลายที่เปลี่ยนสมดุลของกระบวนการ

แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นได้รับการประเมินความถูกต้องโดยพิจารณาค่าทางสถิติ ค่า R^2 เท่ากับ 0.995 แสดงว่าแบบจำลองสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้เกือบทั้งหมด ค่า Adjusted R^2 เท่ากับ 0.984 บ่งชี้ว่าแบบจำลองมีความน่าเชื่อถือสูง และค่า RSD (Root Standard Deviation) เท่ากับ 8.5108 บ่งบอกถึงความแม่นยำของการพยากรณ์ นอกจากนี้ ค่า p-value ของ Lack of Fit

มากกว่า 0.05 แสดงว่าแบบจำลองมีความเหมาะสมและสามารถใช้อธิบายกระบวนการสกัด ABTS ได้อย่างถูกต้อง

จากผลการศึกษา สมการที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้ทำนายค่าการต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดได้อย่างแม่นยำ ปัจจัยที่มีอิทธิพลสูงสุดคือ X8 (สารเติมแต่ง) ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของสารสกัด ในขณะที่การใช้ HPBCD และอุณหภูมิในปริมาณที่สูงเกินไปอาจลดค่าการต้านอนุมูลอิสระ ความเข้าใจผลกระทบของปัจจัยเหล่านี้จะช่วยกำหนดสภาวะที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้การสกัดสารต้านอนุมูลอิสระ ABTS มีประสิทธิภาพสูงสุด

● การสร้างแบบจำลองสำหรับค่าการตอบสนอง FRAP ของ Optimization Study Plan 5

การศึกษาการสกัด FRAP ใน Optimization Study Plan 5 ใช้การถดถอยเชิงพหุ (Multiple Regression Analysis) เพื่อพัฒนาแบบจำลองที่สามารถอธิบายพฤติกรรมของกระบวนการสกัดได้อย่างแม่นยำ โดยวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยเชิงเส้น ผลกระทบเชิงกำลังสอง และปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีผลต่อค่าการต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดที่ประเมินโดย FRAP ปัจจัยที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย ความเข้มข้นของ HPBCD (X3), เวลาสกัด (X5), ความเข้มข้นของเอทานอล (X7), ความเข้มข้นของสารเติมแต่ง (X8) และอุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด (X9) โดย HPBCD ช่วยเพิ่มการละลายของสารต้านอนุมูลอิสระ เวลาสกัดควบคุมอัตราการดึงสารออกจากวัสดุ ความเข้มข้นของเอทานอลและสารเติมแต่งมีผลต่อความสามารถในการละลายของสารเป้าหมาย ขณะที่อุณหภูมิส่งผลต่อความเสถียรของสารสำคัญ

สมการเชิงพหุนามที่ใช้พยากรณ์ค่าการตอบสนองของ FRAP สามารถแสดงได้ดังนี้

$$Y_6 = 296.43 - 7.00X_3 + 0.28X_5 + 3.81X_9 + 5.60X_7 - 5.50X_8 - 15.75X_3^2 - 19.06X_5^2 + 11.40X_9^2 - 10.45X_7^2 - 14.74X_8^2 + 2.70X_3X_5 + 4.03X_3X_9 + 8.19X_3X_7 + 7.68X_3X_8 - 3.60X_5X_9 + 5.35X_5X_7 + 2.89X_5X_8 + 1.11X_9X_7 - 3.22X_9X_8 - 0.62X_7X_8$$

จากสมการ พบว่า X7 (ความเข้มข้นของเอทานอล) และ X9 (อุณหภูมิ) มีผลบวกต่อค่าการต้านอนุมูลอิสระของสารสกัด หมายความว่า การเพิ่มความเข้มข้นของเอทานอลและอุณหภูมิช่วยเพิ่มค่าการตอบสนอง FRAP ในขณะที่ X8 (สารเติมแต่ง) มีผลเชิงลบเมื่อใช้ในระดับที่สูงเกินไป อาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงสมดุลของระบบสกัด X3 (HPBCD) และ X5 (เวลาสกัด) มีแนวโน้มช่วยเพิ่มค่าการต้านอนุมูลอิสระของสารสกัด แต่หากใช้มากเกินไปอาจทำให้สารบางส่วนเสื่อมสภาพ

ผลกระทบเชิงกำลังสองของ X3, X5, X7, X8 และ X9 แสดงให้เห็นว่าเมื่อปัจจัยเหล่านี้สูงเกินระดับที่เหมาะสม อาจทำให้ค่าการต้านอนุมูลอิสระลดลง เนื่องจากการเสื่อมสลายของสารสำคัญ นอกจากนี้ การปฏิสัมพันธ์ของปัจจัยพบว่า X3X5 และ X3X7 มีผลเสริมกัน หมายความว่า การใช้ HPBCD ควบคู่กับเวลาสกัดและเอทานอลในระดับที่เหมาะสมช่วยเพิ่มค่าการตอบสนอง FRAP ในขณะที่ X9X8 และ X7X8 มีแนวโน้มลดค่าการตอบสนอง อาจเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างสารละลายที่เปลี่ยนแปลงสมดุลของระบบ

แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นได้รับการประเมินความถูกต้องโดยพิจารณาค่าทางสถิติ ค่า R^2 เท่ากับ 0.991 แสดงว่าแบบจำลองสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้เกือบทั้งหมด ค่า Adjusted R^2 เท่ากับ 0.969 บ่งชี้ว่าแบบจำลองมีความน่าเชื่อถือสูง และค่า RSD (Root Standard Deviation) เท่ากับ 7.0453 บ่งบอกถึงความแม่นยำของการพยากรณ์ นอกจากนี้ ค่า p-value ของ Lack of Fit มากกว่า 0.05 แสดงว่าแบบจำลองมีความเหมาะสมและสามารถใช้อธิบายกระบวนการสกัด FRAP ได้อย่างถูกต้อง

จากผลการศึกษา สมการที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้ทำนายค่าการต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดได้อย่างแม่นยำ ปัจจัยที่มีอิทธิพลสูงสุดคือ X7 (เอทานอล) และ X9 (อุณหภูมิ) ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของสารสกัด ในขณะที่ใช้ HPBCD และสารเติมแต่งในระดับสูงอาจลดค่าการตอบสนอง FRAP ความเข้าใจผลกระทบของปัจจัยเหล่านี้จะช่วยกำหนดสภาวะที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้การสกัดสารต้านอนุมูลอิสระ FRAP มีประสิทธิภาพสูงสุด

4.3.5.4 การวิเคราะห์ Contour Plot และ Surface Plot ในการศึกษา Optimization Study Plan 5

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีผลต่อค่าการตอบสนองในการสกัดสารออกฤทธิ์จากเหง้าไพลภายใต้ Optimization Study Plan 5 ได้รับการวิเคราะห์ผ่าน Contour Plot และ Response Surface Plot เพื่อประเมินแนวโน้มของผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อผลลัพธ์แต่ละตัวแปรเป้าหมาย การใช้ S haking extraction แทนที่ ultrasonic extraction พร้อมกับเพิ่มปัจจัยอุณหภูมิในการสกัด (X9) เข้ามาในแบบจำลอง ทำให้สามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรได้ในบริบทที่แตกต่างจากแผนก่อนหน้านี้ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่อาจส่งผลต่อประสิทธิภาพการสกัดสารสำคัญ โดยภาพ Contour Plot และ Surface Plot ช่วยแสดงให้เห็นถึงผลกระทบของตัวแปรอิสระในลักษณะของการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาณ และสามารถใช้เป็นแนวทางในการกำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกระบวนการสกัด

ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทรีน (Conc. HPBCD) และเวลาสกัด (Time) ต่อค่าการตอบสนองใน Optimization Study Plan 5

การศึกษานี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยหลัก ได้แก่ ความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทรีน (Conc. HPBCD) และเวลาสกัด (Time) ที่มีต่อค่าการตอบสนองของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ โดยใช้ Contour Plot และ Response Surface Plot (ภาพที่ 4.77) เป็นเครื่องมือหลักในการประเมินแนวโน้มของปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการสกัด

จากผลการวิเคราะห์ Contour Plot พบว่าค่าการตอบสนองของสารเป้าหมาย ได้แก่ Compound D, DMPBD, Curcuminoid และค่าการต้านอนุมูลอิสระ (DPPH, ABTS และ FRAP) มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงไปตามความเข้มข้นของ Conc. HPBCD และเวลาสกัด โดยเฉพาะ Compound D ที่มีค่าการตอบสนองเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อ Conc. HPBCD อยู่ในช่วง 18-28 mM และเวลาสกัดอยู่ที่ 110-160 นาที อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มหรือลด Conc. HPBCD ออกจากช่วงดังกล่าว ค่าการตอบสนองกลับลดลง ซึ่งอาจเป็นผลจากการสกัดที่ถึงจุดสมดุลหรือเกิดภาวะการสกัดสารออกฤทธิ์จนหมดไปจากตัวอย่าง สำหรับ DMPBD พบแนวโน้มคล้ายกัน โดยค่าการตอบสนองสูงสุดอยู่ในช่วง Conc. HPBCD ที่ 17-27 mM และเวลาสกัด 100-150 นาที แสดงให้เห็นว่าไฮโคลเด็กซ์ทรีนมีบทบาทสำคัญในการเพิ่มการละลายของสารเป้าหมายภายในขอบเขตที่เหมาะสม แต่หากใช้ในปริมาณที่สูงเกินไป ประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดอาจลดลง

ในกรณีของ Curcuminoid พบว่าค่าการตอบสนองเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อเวลาสกัดยาวขึ้น โดยมีค่าตอบสนองสูงสุดที่ Conc. HPBCD 18-29 mM และเวลาสกัด 110-170 นาที การใช้ Conc. HPBCD ในปริมาณที่ต่ำกว่าช่วงดังกล่าวอาจไม่เพียงพอในการเพิ่มการละลายของสารเป้าหมาย ขณะที่ปริมาณที่มากเกินไปอาจส่งผลต่อการละลาย นอกจากนี้ ค่าการต้านอนุมูลอิสระ เช่น DPPH, ABTS และ FRAP พบว่ามีแนวโน้มตอบสนองสูงสุดเมื่อ Conc. HPBCD อยู่ในช่วงที่เหมาะสม ได้แก่ 17-28 mM สำหรับ DPPH ที่เวลาสกัด 100-160 นาที, 11-24 mM สำหรับ ABTS ที่เวลาสกัด 70-170 นาที และ 13-24 mM สำหรับ FRAP ที่เวลาสกัด 90-140 นาที อย่างไรก็ตาม การใช้ Conc. HPBCD ในปริมาณที่สูงเกินไปอาจเป็นสัญญาณว่าการสกัดเข้าสู่ภาวะสมดุล ทำให้สารเป้าหมายที่มีอยู่ในตัวอย่างหมดไป ส่งผลให้ค่าการตอบสนองไม่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง

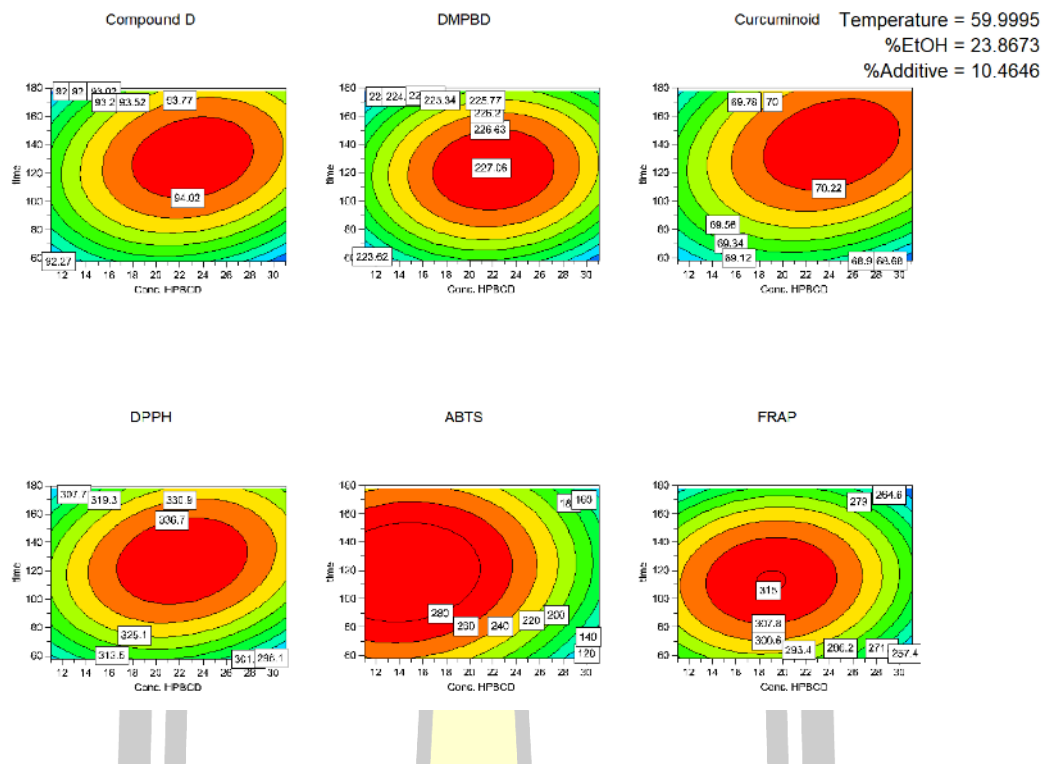
Response Surface Plot สนับสนุนผลการวิเคราะห์ข้างต้น โดยแสดงให้เห็นว่า ค่าการตอบสนองสูงสุดของสารเป้าหมายเกิดขึ้นเมื่อเวลาสกัดอยู่ในช่วงที่เหมาะสมและ Conc. HPBCD อยู่ในระดับปานกลาง ซึ่งช่วยเพิ่มความสามารถในการละลายของสารเป้าหมายโดยไม่เกิดการสูญเสียหรือการลดลงของประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม เมื่อ Conc. HPBCD มีค่ามากเกินไป อาจสะท้อนถึงภาวะที่การสกัดดำเนินไปจนถึงจุดสมดุลแล้ว และไม่มีสารเป้าหมายที่เหลืออยู่ในตัวอย่างให้สกัด

เพิ่มเติม นอกจากนี้ เวลาสกดยังเป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลโดยตรงต่อประสิทธิภาพของกระบวนการ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อตัวทำละลายและสารช่วยสกดอยู่ในระดับที่เหมาะสมร่วมด้วย

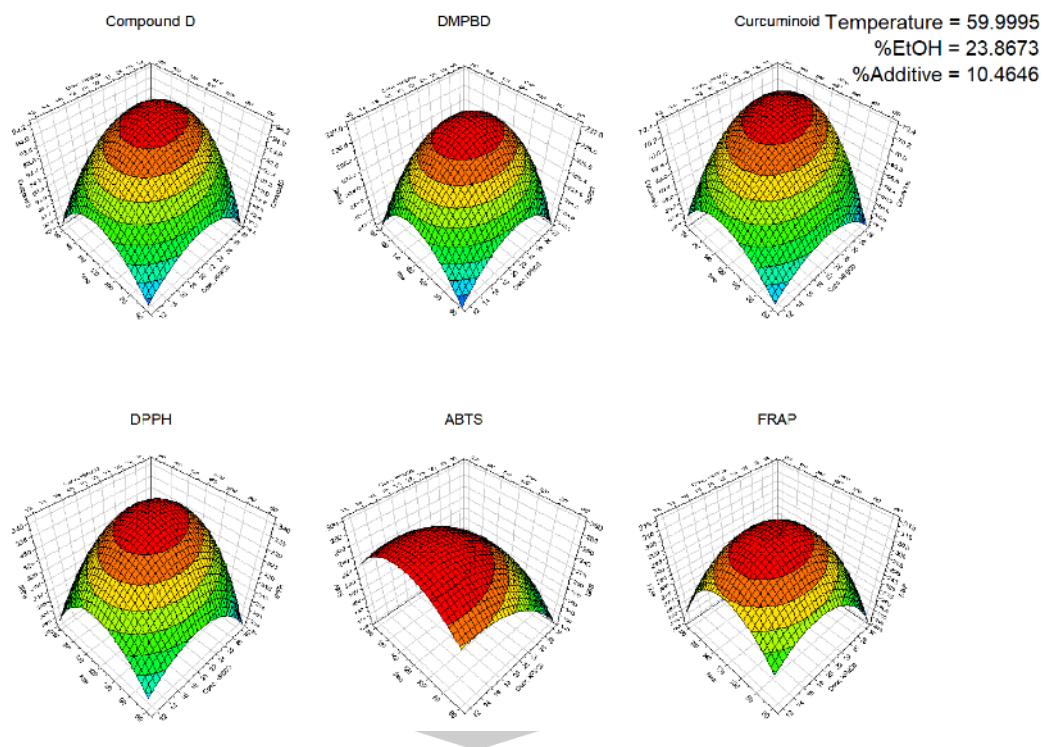
ผลการศึกษารูปได้ว่า Conc. HPBCD และเวลาสกดเป็นปัจจัยที่มีผลกระทบโดยตรงต่อค่าการตอบสนองของสารเป้าหมาย โดย Conc. HPBCD ในระดับปานกลางสามารถเพิ่มค่าการตอบสนองได้อย่างมีประสิทธิภาพ ขณะที่เวลาสกดที่ยาวขึ้นช่วยให้สามารถสกดสารออกฤทธิ์ได้มากขึ้น อย่างไรก็ตาม การใช้ Conc. HPBCD ในปริมาณที่สูงเกินไปอาจเป็นสัญญาณของการสกดที่ถึงขีดจำกัดของระบบ ส่งผลให้ประสิทธิภาพของกระบวนการไม่เพิ่มขึ้น ดังนั้น การกำหนดขอบเขตที่เหมาะสมของทั้งสองปัจจัยจึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดในการสกดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากเหง้าไพล



(A) Contour Plot of Optimization Study Plan 5



(B) Response Surface Plot of Optimization Study Plan 5



ภาพที่ 4.76 Contour Plot และ Surface Plot ความสัมพันธ์ระหว่าง Conc. HPBCD และ Time ในการศึกษา Optimization Study Plan 5

ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทริน (Conc. HPBCD) และอุณหภูมิ ในการสกัด (Temperature) ต่อค่าการตอบสนองใน Optimization Study Plan 5

จากการวิเคราะห์ผลของ Contour Plot และ Response Surface Plot (ภาพที่ 4.78) ใน Optimization Study Plan 5 พบว่าความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทริน (Conc. HPBCD) และ อุณหภูมิในการสกัด (Temperature) มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าการตอบสนองของสารที่ทำการ สกัด ได้แก่ Compound D, DMPBD, Curcuminoid รวมถึงค่าการตอบสนองเชิงฤทธิ์ทางชีวภาพ เช่น DPPH, ABTS และ FRAP การเปลี่ยนแปลงของค่าการตอบสนองแสดงให้เห็นถึงบทบาทของตัว แปรทั้งสองในกระบวนการสกัด

จากการพิจารณา Contour Plot พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าการตอบสนองของสารสกัดมี แนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะ Compound D และ DMPBD ซึ่งค่าการตอบสนอง เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนในช่วงอุณหภูมิ 50°C ถึง 70°C อย่างไรก็ตาม การเพิ่มอุณหภูมิสูงเกินไปอาจทำให้ ค่าการตอบสนองลดลง อันเป็นผลจากสมดุลระหว่างการละลายของสารออกฤทธิ์และการสลายตัวที่ เกิดขึ้นในอุณหภูมิที่สูงเกินไป ความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทรินยังมีบทบาทสำคัญ โดยสามารถเพิ่มค่า การตอบสนองในช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมได้

เมื่อวิเคราะห์ผลจาก Response Surface Plot พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงเชิงเส้นโค้งของค่า การตอบสนอง เมื่อความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทรินเพิ่มขึ้นพร้อมกับอุณหภูมิที่เหมาะสม ค่าการ ตอบสนองของสารสกัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนถึงระดับสูงสุดก่อนจะลดลงในภายหลัง แสดงให้เห็นถึง ขีดจำกัดของปริมาณสารที่สามารถถูกกักเก็บโดยไฮโคลเด็กซ์ทรินและอิทธิพลของอุณหภูมิต่อ เสถียรภาพของสารออกฤทธิ์

สำหรับ Curcuminoid พบว่าความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทรินมีอิทธิพลมากกว่าอุณหภูมิ โดยการเพิ่มความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทรินทำให้ค่าการตอบสนองของ Curcuminoid เพิ่มขึ้นถึง ระดับหนึ่งก่อนที่จะเริ่มลดลง ซึ่งอาจเกิดจากอิทธิพลของความอึดตัวในระบบและผลของ อุณหภูมิที่อาจกระทบต่อเสถียรภาพของสาร

ในกรณีของค่าการตอบสนองเชิงฤทธิ์ทางชีวภาพ เช่น DPPH, ABTS และ FRAP พบว่าการ เพิ่มอุณหภูมิส่งผลในลักษณะเดียวกันกับสารสกัด โดยอุณหภูมิที่สูงขึ้นสามารถเพิ่มค่าการตอบสนอง ได้ในช่วงที่เหมาะสม แต่หากอุณหภูมิสูงเกินไป อาจทำให้สารต้านอนุมูลอิสระเสื่อมสลาย ซึ่งนำไปสู่ ค่าการตอบสนองที่ลดลง ความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทรินในระดับที่เหมาะสมช่วยเพิ่มความสามารถ ในการกักเก็บสารออกฤทธิ์และรักษาเสถียรภาพของสารต้านอนุมูลอิสระ ทำให้ค่าการตอบสนอง สูงขึ้น

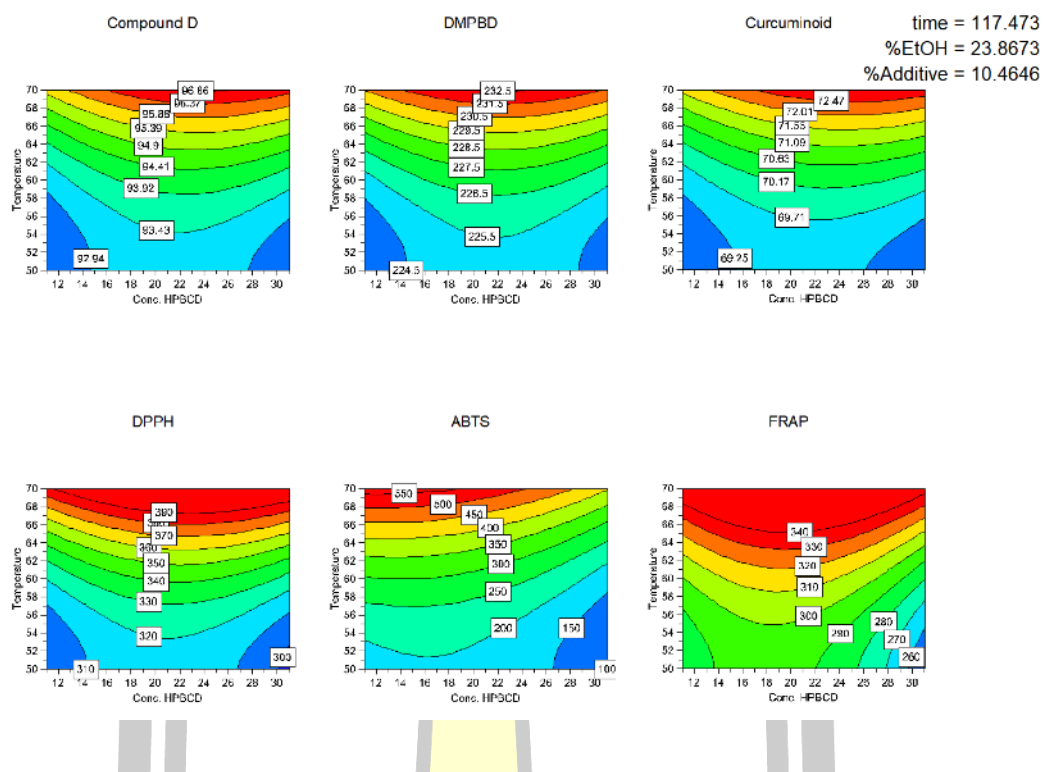
การวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าโซนสีแดงในแผนภาพสะท้อนถึงค่าที่เหมาะสมที่สุดในการศึกษา ซึ่งสามารถระบุช่วงของแต่ละปัจจัยที่มีผลต่อการสกัดได้อย่างชัดเจน ความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทริน

ที่เหมาะสมในแต่ละการศึกษาพบว่า Compound D อยู่ในช่วง 10-30 mM, DMPBD อยู่ในช่วง 16-30 mM, Curcuminoid อยู่ในช่วง 18-30 mM, DPPH อยู่ในช่วง 12-30 mM, ABTS อยู่ในช่วง 12-24 mM และ FRAP อยู่ในช่วง 12-30 mM ในขณะที่ช่วงของอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการสกัดของ Compound D, DMPBD และ Curcuminoid อยู่ที่ 68°C ขึ้นไป ส่วน DPPH อยู่ที่ 66°C ขึ้นไป, ABTS อยู่ที่ 68°C ขึ้นไป และ FRAP เริ่มต้นที่ 64°C ขึ้นไป ซึ่งเป็นช่วงที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดได้ดีที่สุด

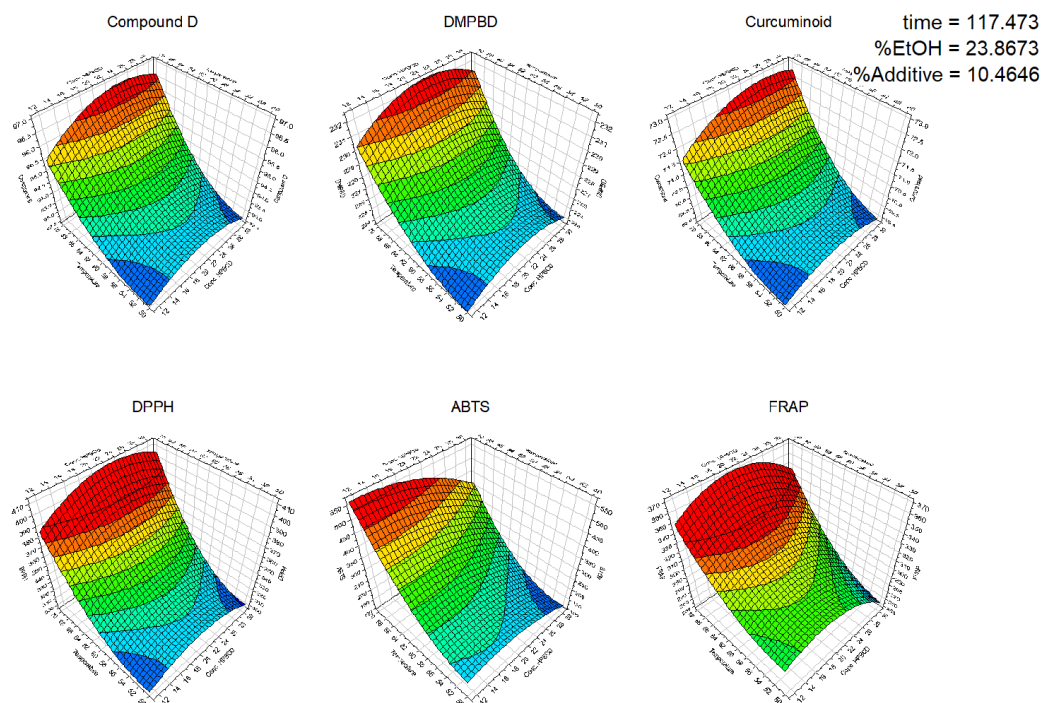
โดยสรุป ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไซโคลเด็กซ์ทรินและอุณหภูมิในการสกัดมีอิทธิพลอย่างชัดเจนต่อค่าการตอบสนองใน Optimization Study Plan 5 หากทั้งสองปัจจัยอยู่ในช่วงที่เหมาะสม ค่าการตอบสนองของสารสกัด รวมถึงฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ จะเพิ่มขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม หากค่าของตัวแปรทั้งสองเกินขีดจำกัด อาจทำให้ประสิทธิภาพของการสกัดลดลง ดังนั้น การควบคุมตัวแปรให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมจึงเป็นปัจจัยสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัด



(A) Contour Plot of Optimization Study Plan 5



(B) Response Surface Plot of Optimization Study Plan 5



ภาพที่ 4.77 Contour Plot และ Surface Plot ความสัมพันธ์ระหว่าง Conc. HPBCD และ Temperature ในการศึกษา Optimization Study Plan 5

ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทรีน (Conc. HPBCD) และความเข้มข้นของเอทานอล (%EtOH) ต่อค่าการตอบสนองใน Optimization Study Plan 5

จากการวิเคราะห์ Contour Plot และ Response Surface Plot (ภาพที่ 4.79) พบว่าความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทรีน (Conc. HPBCD) และความเข้มข้นของเอทานอล (%EtOH) มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าการตอบสนองของสารออกฤทธิ์และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในกระบวนการสกัดสารสำคัญจากเหง้าโพลด้วยเทคนิค Shaking extraction

สำหรับ Compound D และ DMPBD พบว่าการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทรีนช่วยเพิ่มปริมาณของสารสกัดได้ในช่วงที่เหมาะสม อย่างไรก็ตาม เมื่อใช้ความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทรีนสูงเกินไป อาจทำให้ปริมาณสารลดลงเนื่องจากอิทธิพลของความอึดตัวของสารสกัดที่จับอยู่ในโครงสร้างของไฮโคลเด็กซ์ทรีน ส่งผลให้ประสิทธิภาพของการสกัดลดลง ความเข้มข้นของเอทานอลมีผลโดยตรงต่อกระบวนการละลายของสารออกฤทธิ์ โดยพบว่าที่ระดับที่เหมาะสม ปริมาณสารสกัดจะอยู่ในระดับสูงสุด แต่หากใช้ในระดับที่สูงเกินไป อาจทำให้ประสิทธิภาพการละลายเปลี่ยนแปลง ซึ่งอาจเป็นผลจากแรงระหว่างโมเลกุลที่ทำให้เกิดการตกตะกอนของสารสกัดบางชนิด

ในกรณีของ Curcuminoid พบว่าความเข้มข้นของเอทานอลมีอิทธิพลสูงต่อปริมาณสารที่สกัดได้ โดยเมื่อใช้เอทานอลในช่วงที่เหมาะสม ปริมาณ Curcuminoid ที่สกัดได้จะมีค่าสูงสุด แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นมากเกินไป อาจส่งผลให้ปริมาณสารลดลง เนื่องจากเอทานอลเข้มข้นสูงสามารถละลายสารที่มีขั้วต่ำได้ดีขึ้น แต่ลดความสามารถในการละลายสารที่มีขั้ว ส่งผลให้ Curcuminoid ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีขั้วปานกลางมีการละลายลดลงในระดับที่สูงเกินไป

สำหรับค่าการตอบสนองของ DPPH, ABTS และ FRAP ซึ่งเป็นตัวชี้วัดฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ พบว่าทั้งความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทรีนและเอทานอลมีผลต่อความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระอย่างมีนัยสำคัญ โดยที่ระดับความเข้มข้นที่เหมาะสมของทั้งสองตัวแปร ค่าการตอบสนองของสารต้านอนุมูลอิสระจะอยู่ในระดับสูงสุด อย่างไรก็ตาม หากใช้ไฮโคลเด็กซ์ทรีนในระดับที่สูงเกินไป อาจทำให้ค่าการตอบสนองลดลงเนื่องจากปริมาณสารที่ถูกจับอยู่กับไฮโคลเด็กซ์ทรีนมากเกินไป ส่งผลให้สารออกฤทธิ์ไม่สามารถทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระได้เต็มที่ ในขณะที่ความเข้มข้นของเอทานอลที่สูงเกินไปอาจมีผลต่อโครงสร้างของสารต้านอนุมูลอิสระบางชนิด ทำให้ค่าการตอบสนองลดลง

จากการวิเคราะห์ภาพประกอบการทดลอง โชนสีแดงในแผนภาพสะท้อนถึงค่าที่เหมาะสมที่สุดในการศึกษา ซึ่งสามารถระบุช่วงของแต่ละปัจจัยที่มีผลต่อการสกัดได้อย่างชัดเจน ความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทรีนที่เหมาะสมพบว่า Compound D อยู่ในช่วง 17-29 mM, DMPBD 18-28 mM, Curcuminoid 18-27 mM, DPPH 18-27 mM, ABTS 12-21 mM และ FRAP 14-26 mM ในขณะที่ช่วงของความเข้มข้นของเอทานอลที่เหมาะสมสำหรับ Compound D อยู่ที่ 18-28%, DMPBD 18-

25%, Curcuminoid 20-27%, DPPH 20-26%, ABTS 21-29% และ FRAP 22-29% ซึ่งเป็นช่วงที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดได้ดีที่สุด

ทั้งความเข้มข้นของไซโคลเด็กซ์ทรินและเอทานอลเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการสกัดสารออกฤทธิ์และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ อย่างไรก็ตาม การเลือกใช้ค่าที่เหมาะสมของตัวแปรทั้งสองมีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากการใช้ค่าที่สูงเกินไปอาจก่อให้เกิดผลกระทบที่ไม่พึงประสงค์ได้ ดังนั้น การวิเคราะห์ Contour Plot และ Response Surface Plot สามารถใช้เป็นแนวทางในการกำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดโดยใช้ไซโคลเด็กซ์ทรินและเอทานอลได้อย่างมีประสิทธิภาพ



ภาพที่ 4.78 Contour Plot และ Surface Plot ความสัมพันธ์ระหว่าง Conc. HPBCD และ %EtOH ในการศึกษา Optimization Study Plan 5

ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทรีน (Conc. HPBCD) และความเข้มข้นของสารเติมแต่ง (%Additive) ต่อค่าการตอบสนองใน Optimization Study Plan 5

จากการวิเคราะห์ Contour Plot และ Response Surface Plot (ภาพที่ 4.80) พบว่าความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทรีน (Conc. HPBCD) และความเข้มข้นของสารเติมแต่ง (%Additive) ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าการตอบสนองของสารสกัด โดยเฉพาะ Compound D, DMPBD และ Curcuminoid รวมถึงฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของ DPPH, ABTS และ FRAP ซึ่งแสดงให้เห็นถึงบทบาทของปัจจัยทั้งสองในการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัด

สำหรับ Compound D การเพิ่มขึ้นของ Conc. HPBCD มีแนวโน้มช่วยเพิ่มค่าการตอบสนองในช่วงความเข้มข้นที่เหมาะสม อย่างไรก็ตาม เมื่อระดับไฮโคลเด็กซ์ทรีนสูงเกินไป อาจเกิดการกักเก็บสารภายในโครงสร้าง ทำให้การละลายของสารออกฤทธิ์ลดลง ในขณะที่ %Additive ส่งผลลักษณะเดียวกัน โดยการใช้ในระดับปานกลางช่วยเพิ่มค่าการตอบสนอง แต่หากสูงเกินไปอาจส่งผลให้สารสกัดเกิดการตกตะกอน

ค่าการตอบสนองของ DMPBD แสดงแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ Conc. HPBCD และ %Additive ในระดับที่เหมาะสม โดยเฉพาะเมื่อความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทรีนอยู่ในช่วงปานกลาง อย่างไรก็ตาม หากปริมาณสารเติมแต่งสูงเกินไป อาจรบกวนโครงสร้างของสารสกัด ส่งผลให้ค่าการตอบสนองลดลง

ในกรณีของ Curcuminoid พบว่าการเพิ่มขึ้นของ Conc. HPBCD ส่งผลบวกต่อค่าการตอบสนอง โดยเฉพาะที่ระดับปานกลางถึงสูง ขณะที่ %Additive ในระดับต่ำถึงปานกลางช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการสกัด แต่หากความเข้มข้นของสารเติมแต่งสูงเกินไป อาจทำให้เกิดความไม่สมดุลในระบบและส่งผลให้ค่าการตอบสนองลดลง

สำหรับค่าการตอบสนองของ DPPH, ABTS และ FRAP พบว่าการเพิ่มขึ้นของ Conc. HPBCD และ %Additive มีอิทธิพลต่อฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัด โดย DPPH และ FRAP มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงความเข้มข้นปานกลางของทั้งสองปัจจัย อย่างไรก็ตาม หากปริมาณสารเติมแต่งสูงเกินไป อาจรบกวนสมดุลของระบบสารสกัด ทำให้ค่าการตอบสนองลดลง สำหรับ ABTS แสดงความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยมีช่วงความเข้มข้นที่เหมาะสมของทั้งสองปัจจัยซึ่งช่วยเสริมประสิทธิภาพได้สูงสุด

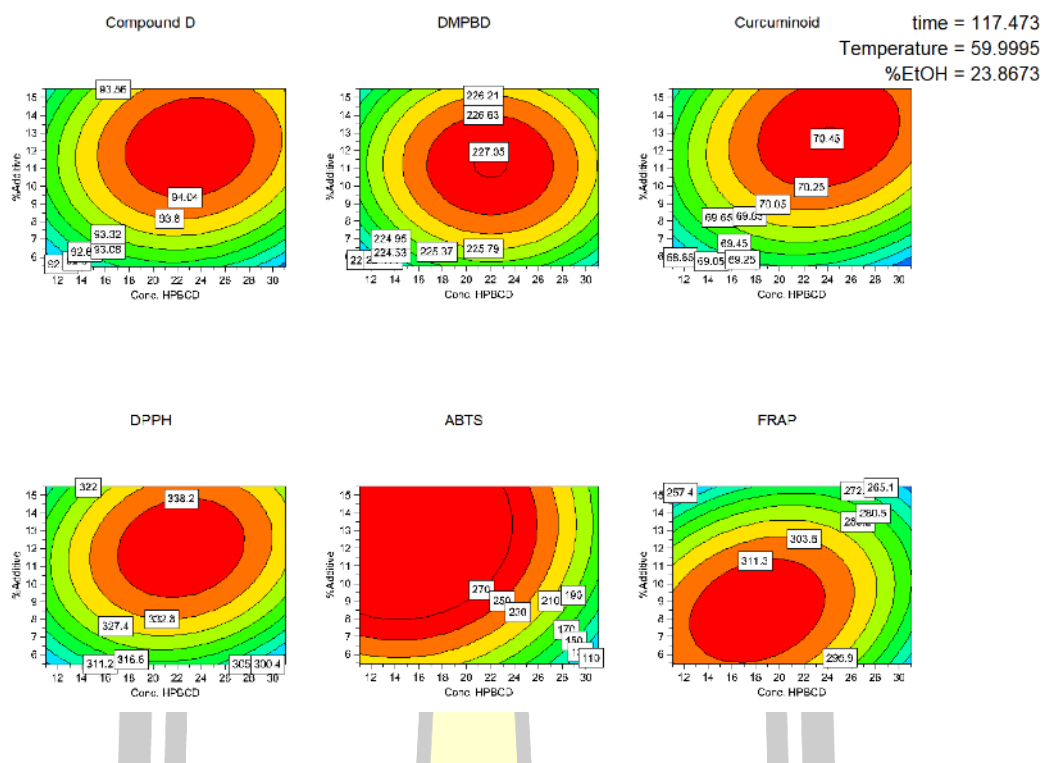
การวิเคราะห์ Response Surface Plot พบว่าค่าการตอบสนองของสารสกัดมีแนวโน้มสูงสุดเมื่อ Conc. HPBCD และ %Additive อยู่ในช่วงที่เหมาะสม อย่างไรก็ตาม หากใช้ปริมาณสารเติมแต่งมากเกินไป อาจส่งผลเสียต่อคุณสมบัติของสารออกฤทธิ์ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการควบคุมปริมาณสารเติมแต่งเพื่อให้ได้ค่าการตอบสนองที่ดีที่สุด

จากการพิจารณาภาพ Contour Plot และ Response Surface Plot พบว่าโซนสีแดงในแผนภาพสะท้อนถึงค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการสกัดสารสำคัญ โดยช่วงความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทรีนที่เหมาะสม ได้แก่ Compound D ในช่วง 18-28 mM, DMPBD 17-27 mM, Curcuminoid 18-30 mM, DPPH 18-28 mM, ABTS 12-26 mM และ FRAP 13-24 mM ส่วนความเข้มข้นของสารเติมแต่งที่ให้ผลดีต่อการสกัด ได้แก่ Compound D ที่ 10-15%, DMPBD 8-14%, Curcuminoid 10-16%, DPPH 9-14%, ABTS 7-15% และ FRAP 5-11%

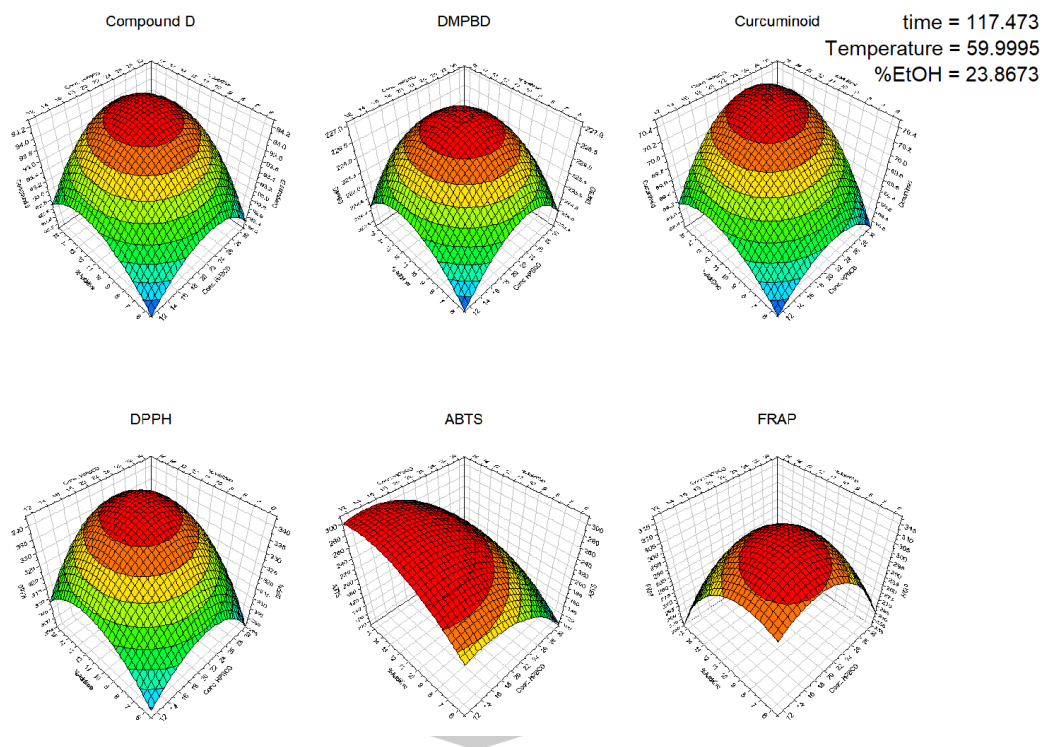
ความเข้มข้นของ Conc. HPBCD และ %Additive มีผลต่อค่าการตอบสนองของสารสกัดแตกต่างกันไปตามประเภทของสาร การใช้ความเข้มข้นที่เหมาะสมช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการสกัดได้อย่างมีนัยสำคัญ ขณะที่การใช้ปริมาณสารเติมแต่งสูงเกินไปอาจรบกวนกระบวนการสกัดและลดค่าการตอบสนองของสารออกฤทธิ์ ดังนั้น ควรมีการควบคุมปัจจัยเหล่านี้อย่างเหมาะสมเพื่อให้ได้ค่าการตอบสนองที่ดีที่สุดโดยไม่ส่งผลเสียต่อคุณสมบัติของสารออกฤทธิ์ ผลการศึกษานี้ยืนยันว่าการกำหนดช่วงความเข้มข้นของ Conc. HPBCD และ %Additive อย่างเหมาะสมเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดได้สูงสุด



(A) Contour Plot of Optimization Study Plan 5



(B) Response Surface Plot of Optimization Study Plan 5



ภาพที่ 4.79 Contour Plot และ Surface Plot ความสัมพันธ์ระหว่าง Conc. HPBCD และ %Additive ในการศึกษา Optimization Study Plan 5

ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาสกัด (Time) และอุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด (Temperature) ต่อค่าการตอบสนองใน Optimization Study Plan 5

จากการวิเคราะห์ Contour Plot และ Response Surface Plot (รูปที่ 4.81) พบว่าเวลาสกัด (Time) และอุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด (Temperature) เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อค่าการตอบสนองของสารสกัดใน Optimization Study Plan 5 โดยสังเกตได้ว่าเมื่ออุณหภูมิและเวลาสกัดเพิ่มขึ้น ปริมาณสารที่ถูกสกัดออกมามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม หากทั้งสองปัจจัยมีค่าที่สูงเกินไป อาจทำให้สารออกฤทธิ์บางชนิดเสื่อมสลาย ส่งผลให้ค่าการตอบสนองลดลง ดังนั้น การกำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสมของกระบวนการสกัดจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการสกัด

สำหรับ Compound D พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาสกัด ปริมาณสารที่ถูกสกัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 68°C และเวลาสกัดอยู่ระหว่าง 80-170 นาที อย่างไรก็ตาม เมื่อเวลาสกัดยาวนานเกินไป ค่าการตอบสนองเริ่มลดลง ซึ่งอาจเกิดจากการสลายตัวของสารเมื่อสัมผัสกับอุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน ทั้งนี้ อุณหภูมิเป็นปัจจัยที่มีผลกระทบมากกว่าเวลา เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงช่วยกระตุ้นการละลายของสารออกฤทธิ์จากโครงสร้างพืชได้ดีขึ้น

ในกรณีของ DMPBD มีแนวโน้มค่าการตอบสนองคล้ายกับ Compound D กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นและเวลาสกัดเพิ่มขึ้น ปริมาณสารที่สกัดได้ก็เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ช่วงเวลาสกัดที่เหมาะสมอยู่ที่ 80-160 นาที และอุณหภูมิที่สูงกว่า 68°C การสกัดที่นานเกินไปอาจไม่ได้เพิ่มปริมาณสารมากขึ้น และในบางกรณีอาจส่งผลให้สารเกิดการเสื่อมสลาย

สำหรับ Curcuminoid พบว่าอุณหภูมิเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าการตอบสนอง โดยช่วงเวลาสกัดที่เหมาะสมอยู่ที่ 100-180 นาที และอุณหภูมิที่สูงกว่า 68°C ส่งผลให้ค่าการตอบสนองเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม จากการวิเคราะห์ข้อมูลในแผนภาพยังไม่สามารถสรุปได้ว่าอุณหภูมิที่สูงเกินไปจะทำให้ปริมาณ Curcuminoid ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้น จำเป็นต้องพิจารณาปัจจัยอื่นๆ เพิ่มเติมในการวิเคราะห์แนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงของสารสกัดในช่วงอุณหภูมิที่สูงขึ้น

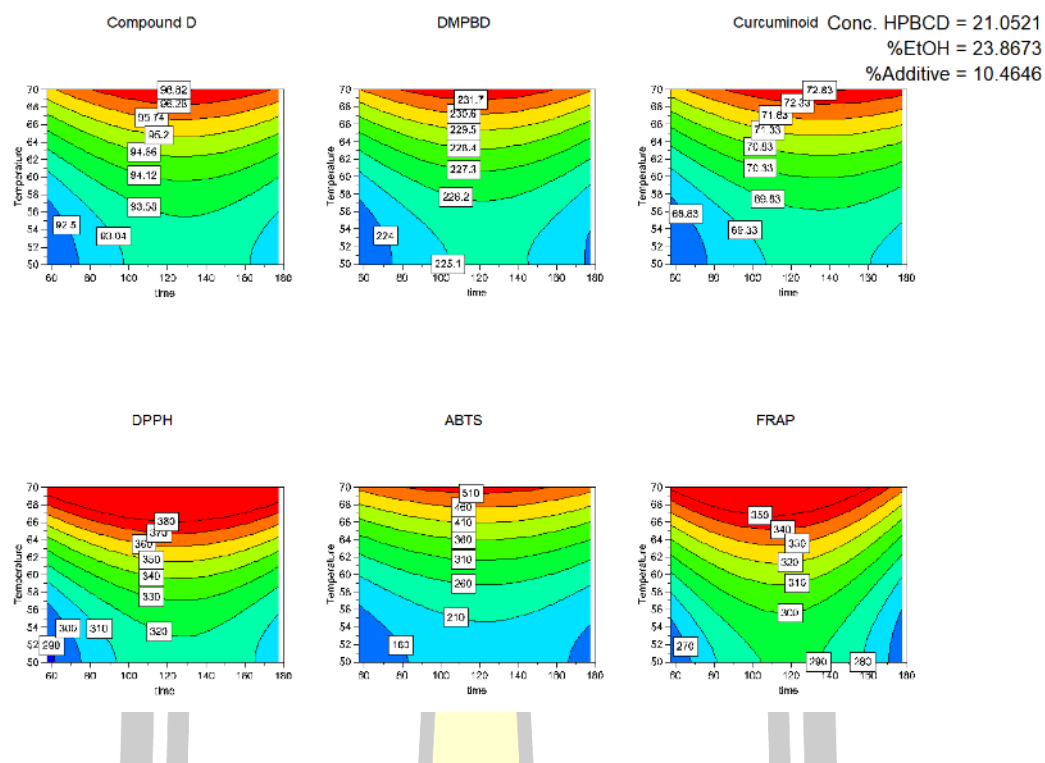
สำหรับค่าการตอบสนองของสารต้านอนุมูลอิสระ ได้แก่ DPPH, ABTS และ FRAP พบว่ามีแนวโน้มคล้ายกับสารออกฤทธิ์อื่น ๆ โดยช่วงเวลาที่เหมาะสมอยู่ที่ 60-180 นาที ทั้งนี้ อุณหภูมิที่สูงกว่า 64°C สำหรับ DPPH, 69°C สำหรับ ABTS และ 65°C สำหรับ FRAP ส่งผลให้ค่าการตอบสนองอยู่ในระดับสูงสุด อย่างไรก็ตาม เมื่ออุณหภูมิและเวลาสกัดเกินค่าที่เหมาะสม อาจทำให้สารต้านอนุมูลอิสระบางชนิดเกิดการสลายตัวหรือออกซิเดชัน ซึ่งส่งผลให้ค่าการตอบสนองลดลง

จากการวิเคราะห์ Response Surface Plot พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาสกัดมีลักษณะเป็นกราฟโค้งสะท้อนถึงค่าที่เหมาะสมที่สุดของทั้งสองปัจจัย เมื่อเวลาสกัดและอุณหภูมิอยู่ในช่วงที่พอเหมาะ ค่าการตอบสนองจะเพิ่มขึ้นถึงระดับสูงสุด แต่หากเกินค่าที่เหมาะสม ค่าการตอบสนองจะลดลง ซึ่งเป็นผลจากการเสื่อมสลายของสารเมื่อสัมผัสกับความร้อนเป็นเวลานาน

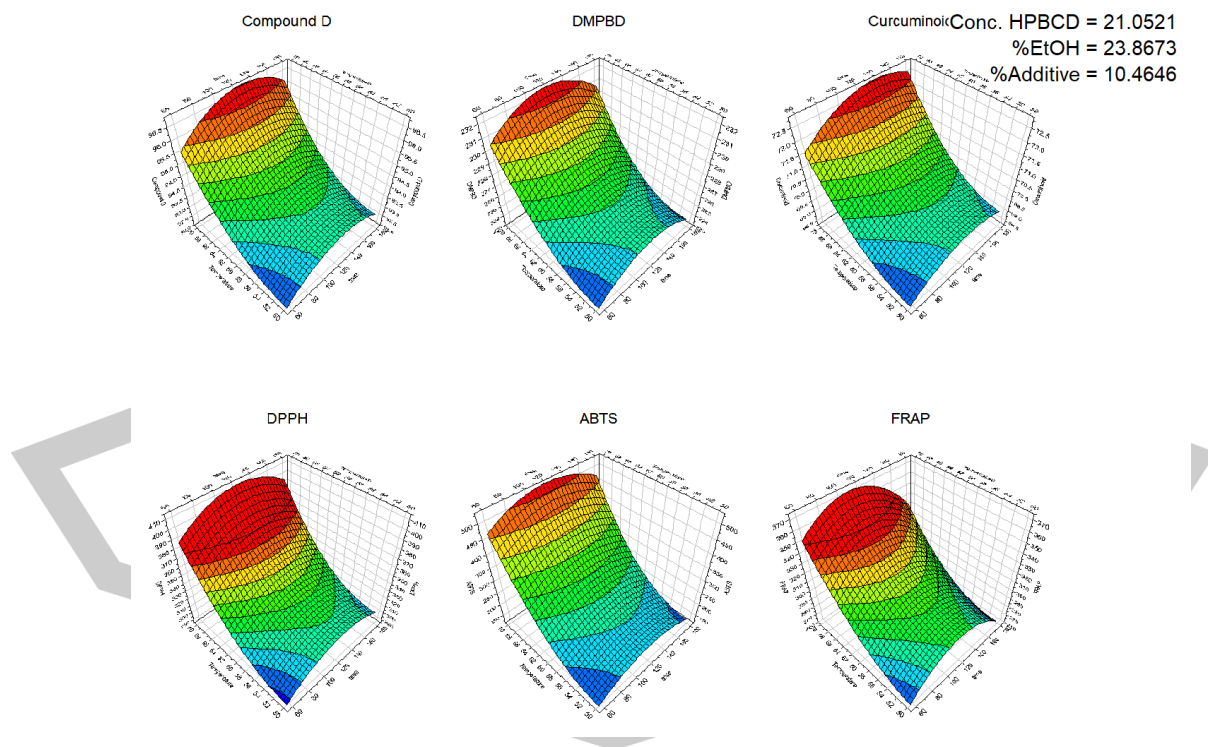
จากผลการศึกษาี้ สามารถสรุปได้ว่าอุณหภูมิและเวลาสกัดเป็นปัจจัยที่ส่งผลโดยตรงต่อค่าการตอบสนองของสารสกัด การเพิ่มขึ้นของทั้งสองปัจจัยช่วยเพิ่มปริมาณสารที่สกัดได้ แต่หากใช้อุณหภูมิหรือเวลาสกัดที่สูงเกินไป อาจทำให้สารออกฤทธิ์เกิดการเสื่อมสลาย การกำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสมของการสกัดจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดให้ได้ปริมาณสารสำคัญในระดับสูงสุด พร้อมทั้งลดความเสี่ยงของการสูญเสียสารที่อาจเกิดจากปัจจัยด้านความร้อนและเวลาที่ยาวเกินไป



(A) Contour Plot of Optimization Study Plan 5



(B) Response Surface Plot of Optimization Study Plan 5



ภาพที่ 4.80 Contour Plot และ Surface Plot ความสัมพันธ์ระหว่าง Time และ Temperature ในการศึกษา Optimization Study Plan 5

ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาสกัด (Time) และความเข้มข้นของเอทานอล (%EtOH) ต่อค่าการตอบสนองใน Optimization Study Plan 5

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาสกัด (Time) และความเข้มข้นของเอทานอล (% EtOH) ต่อค่าการตอบสนองใน Optimization Study Plan 5 พบว่าทั้งสองปัจจัยมีอิทธิพลสำคัญต่อปริมาณสารออกฤทธิ์และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดที่ได้จากกระบวนการสกัดแบบ Shaking Extraction การวิเคราะห์ผ่าน Contour Plot และ Response Surface Plot (ภาพที่ 4.82) แสดงให้เห็นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าการตอบสนองเมื่อมีการปรับค่าของปัจจัยทั้งสอง

จากแผนภาพ พบว่า Compound D และ DMPBD มีค่าการตอบสนองเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาสกัด โดยมีช่วงเวลาที่เหมาะสมสำหรับ Compound D อยู่ที่ 110-160 นาที และสำหรับ DMPBD อยู่ที่ 100-150 นาที อย่างไรก็ตาม เมื่อเวลาสกัดเกินกว่าระดับที่เหมาะสม ค่าการตอบสนองเริ่มลดลง ซึ่งสะท้อนให้เห็นผ่านการเปลี่ยนแปลงของโซนสีจากสีแดงไปเป็นสีส้มและสีเหลืองในแผนภาพ แสดงให้เห็นถึงจุดที่ประสิทธิภาพการสกัดลดลง

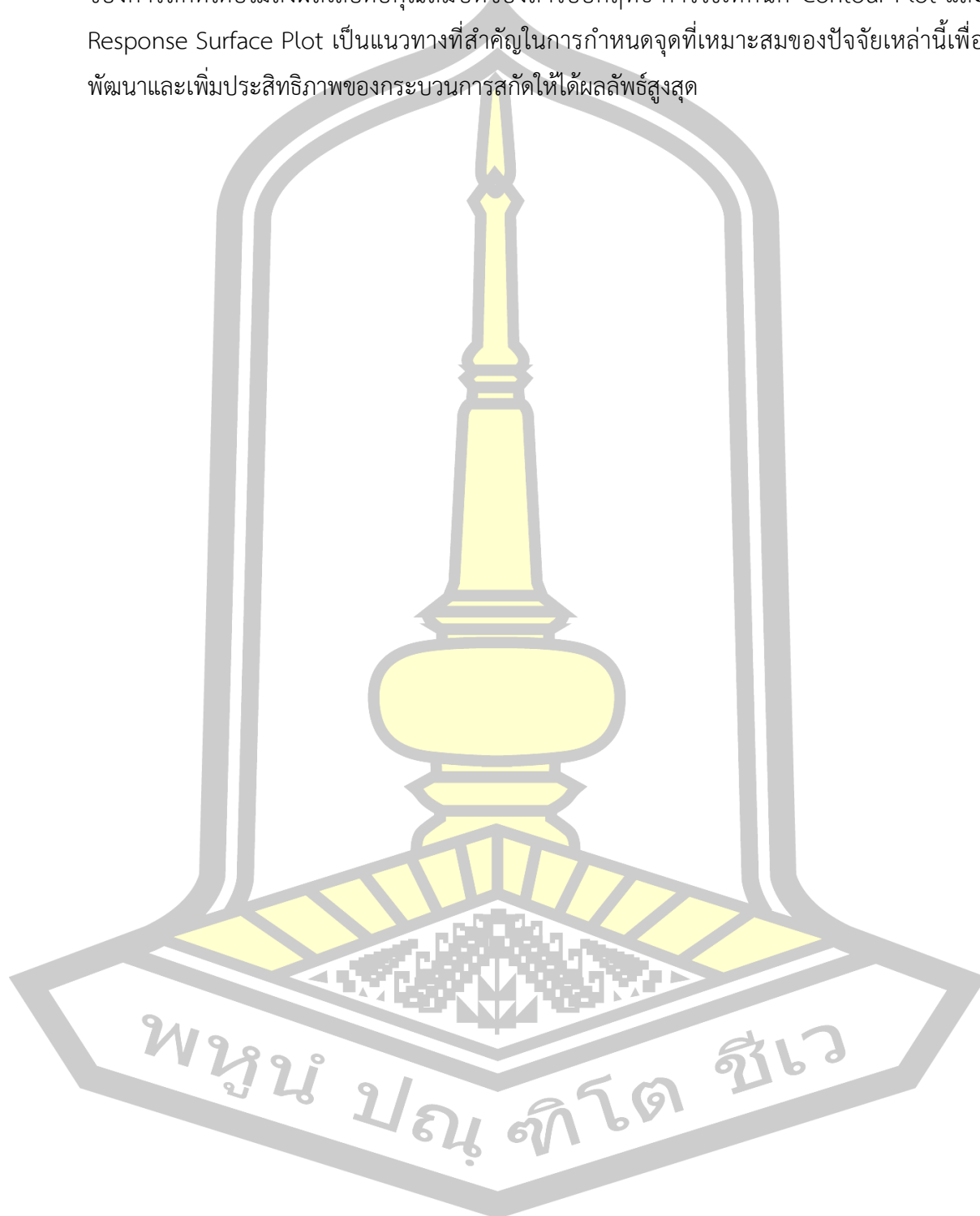
ในส่วนของความเข้มข้นของเอทานอล พบว่ามีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของการสกัดอย่างมีนัยสำคัญ โดยค่าการตอบสนองสูงสุดของ Compound D ปรากฏในช่วงความเข้มข้นของเอทานอลที่ 20-25% และสำหรับ DMPBD อยู่ที่ 19-25% ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติของสารออกฤทธิ์ที่ต้องการตัวทำละลายที่มีความเข้มข้นของเอทานอลในระดับที่เหมาะสมเพื่อให้การละลายเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

ในกรณีของ Curcuminoid มีแนวโน้มการตอบสนองที่คล้ายคลึงกัน โดยพบว่าช่วงเวลาสกัดที่เหมาะสมอยู่ที่ 110-160 นาที และช่วงความเข้มข้นของเอทานอลที่ 20-26% อย่างไรก็ตาม เมื่อเวลาสกัดนานเกินไป หรือความเข้มข้นของเอทานอลสูงกว่าช่วงที่เหมาะสม ค่าการตอบสนองเริ่มลดลง ซึ่งสะท้อนให้เห็นจากการเปลี่ยนแปลงของโซนสีในแผนภาพ แสดงให้เห็นถึงขีดจำกัดของปัจจัยดังกล่าวที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการสกัด

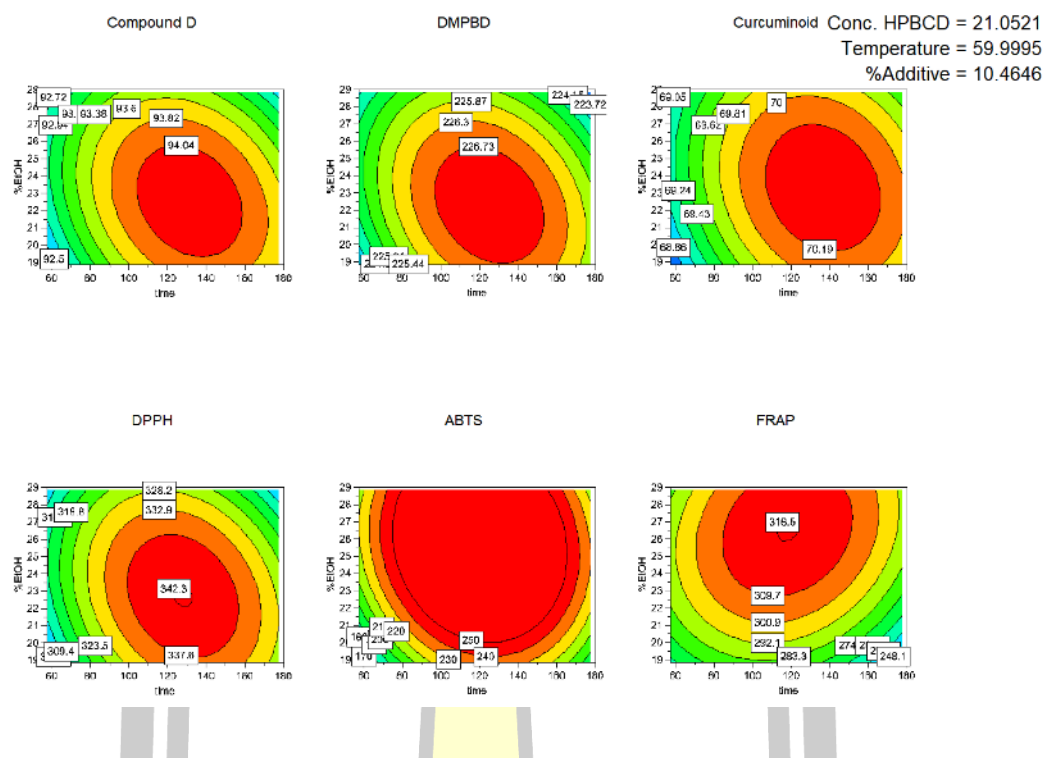
สำหรับค่าการตอบสนองของสารต้านอนุมูลอิสระ ได้แก่ DPPH, ABTS และ FRAP พบว่าแนวโน้มของค่าการตอบสนองมีลักษณะใกล้เคียงกัน โดยค่าการตอบสนองของ DPPH สูงสุดเมื่อเวลาสกัดอยู่ที่ 100-160 นาที และความเข้มข้นของเอทานอลอยู่ในช่วง 19-26% ขณะที่ ABTS มีค่าการตอบสนองสูงสุดในช่วง 70-170 นาที และช่วงความเข้มข้นของเอทานอลที่ 19-30% ส่วน FRAP พบว่ามีค่าการตอบสนองสูงสุดเมื่อเวลาสกัดอยู่ในช่วง 90-150 นาที และที่ความเข้มข้นของเอทานอล 22-30%

จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า เวลาสกัดและความเข้มข้นของเอทานอลเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อค่าการตอบสนองของสารออกฤทธิ์และสารต้านอนุมูลอิสระ การเลือกช่วงเวลาสกัดที่เหมาะสมช่วยให้สามารถดึงสารออกฤทธิ์ออกมาได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยไม่ก่อให้เกิดการสลายตัว

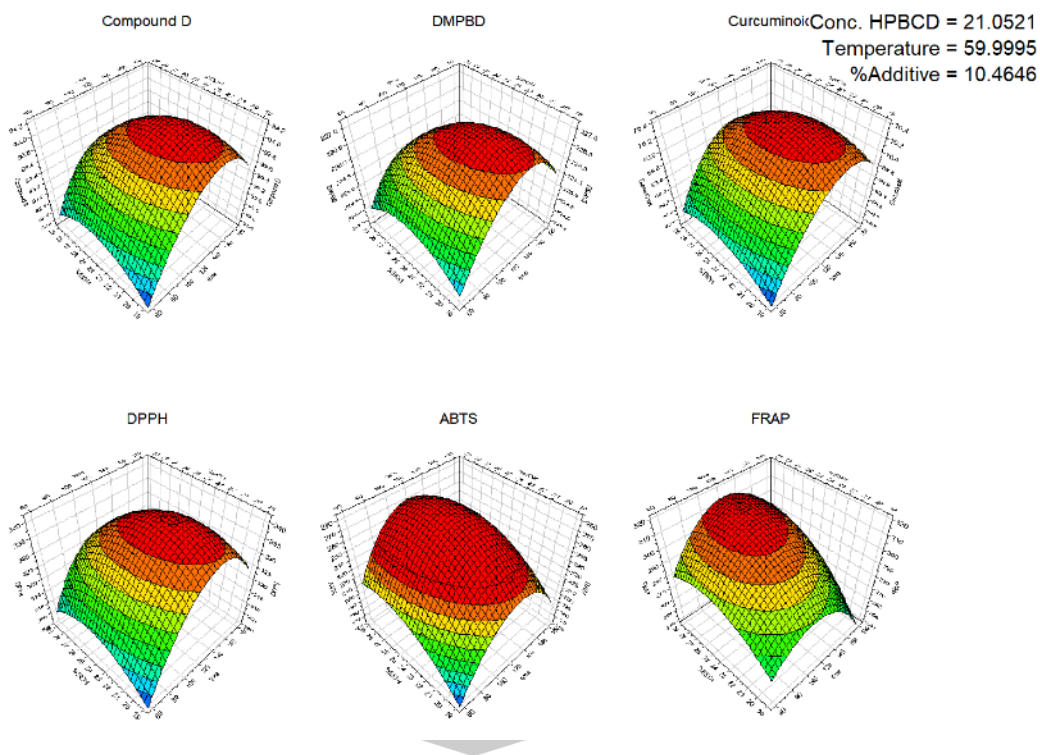
ของสาร ขณะที่การปรับความเข้มข้นของเอทานอลให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมจะช่วยเสริมประสิทธิภาพของการสกัดโดยไม่ส่งผลเสียต่อคุณสมบัติของสารออกฤทธิ์ การใช้เทคนิค Contour Plot และ Response Surface Plot เป็นแนวทางที่สำคัญในการกำหนดจุดที่เหมาะสมของปัจจัยเหล่านี้เพื่อพัฒนาและเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดให้ได้ผลลัพธ์สูงสุด



(A) Contour Plot of Optimization Study Plan 5



(B) Response Surface Plot of Optimization Study Plan 5



ภาพที่ 4.81 Contour Plot และ Surface Plot ความสัมพันธ์ระหว่าง Time และ %EtOH ใน
การศึกษา Optimization Study Plan 5

ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาสกัด (Time) และความเข้มข้นของสารเติมแต่ง (% Additive) ต่อค่าการตอบสนองใน Optimization Study Plan 5

จากการวิเคราะห์ Contour Plot และ Response Surface Plot (ภาพที่ 4.83) ใน Optimization Study Plan 5 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างเวลาสกัด (Time) และความเข้มข้นของสารเติมแต่ง (%Additive) ต่อค่าการตอบสนอง พบว่าทั้งสองปัจจัยมีบทบาทสำคัญต่อประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดและคุณสมบัติของสารสกัด โดยค่าการตอบสนองของ Compound D, DMPBD, Curcuminoid รวมถึงสารที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ได้แก่ DPPH, ABTS และ FRAP แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ที่ชัดเจนกับการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยทั้งสอง

จากแผนภาพ Contour Plot พบว่าโซนสีแดงเป็นช่วงที่ค่าการตอบสนองสูงสุดสำหรับสารแต่ละชนิด หลังจากนั้นค่าการตอบสนองจะลดลงตามลำดับ ซึ่งสะท้อนให้เห็นจากการเปลี่ยนสีจากสีแดงไปเป็นสีส้มและสีเหลือง ในกรณีของ Compound D และ Curcuminoid พบว่าช่วงเวลาสกัดที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 90-160 นาที และ 90-170 นาที ตามลำดับ โดยมีความเข้มข้นของสารเติมแต่งอยู่ในช่วง 9-14% สำหรับ Compound D และ 9-15% สำหรับ Curcuminoid อย่างไรก็ตาม หากระยะเวลาสกัดนานเกินไป หรือใช้ปริมาณสารเติมแต่งสูงเกินไป อาจส่งผลให้ค่าการตอบสนองลดลง ซึ่งอาจเป็นผลจากการสลายตัวของสารออกฤทธิ์ หรือการเปลี่ยนแปลงสมดุลระหว่างสารออกฤทธิ์และสารเติมแต่งภายในระบบ

สำหรับ DMPBD พบว่าค่าการตอบสนองสูงสุดเกิดขึ้นเมื่อเวลาสกัดอยู่ในช่วง 90-140 นาที และมีความเข้มข้นของสารเติมแต่งที่เหมาะสมในช่วง 8-14% ผลการวิเคราะห์ชี้ให้เห็นว่าสารเติมแต่งมีบทบาทสำคัญในการรักษาเสถียรภาพของสารที่สกัดได้ อย่างไรก็ตาม การใช้สารเติมแต่งในปริมาณที่มากเกินไป อาจทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่ส่งผลให้ค่าการตอบสนองของ DMPBD ลดลง

ในส่วนของสารต้านอนุมูลอิสระ ได้แก่ DPPH, ABTS และ FRAP พบว่าค่าการตอบสนองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาสกัด โดยค่าการตอบสนองของ DPPH สูงสุดเมื่อเวลาสกัดอยู่ที่ 80-160 นาที และความเข้มข้นของสารเติมแต่งอยู่ระหว่าง 8-15% ในขณะที่ ABTS มีค่าการตอบสนองสูงสุดในช่วง 60-150 นาที และความเข้มข้นของสารเติมแต่งอยู่ที่ 10-15% ส่วน FRAP มีค่าการตอบสนองสูงสุดในช่วง 80-140 นาที โดยมีระดับความเข้มข้นของสารเติมแต่งที่เหมาะสมอยู่ที่ 6-12% อย่างไรก็ตาม หากใช้สารเติมแต่งในปริมาณที่สูงเกินไป อาจส่งผลต่อการลดลงของประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระ ซึ่งอาจเกิดจากปฏิกิริยาที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างทางเคมีของสารออกฤทธิ์

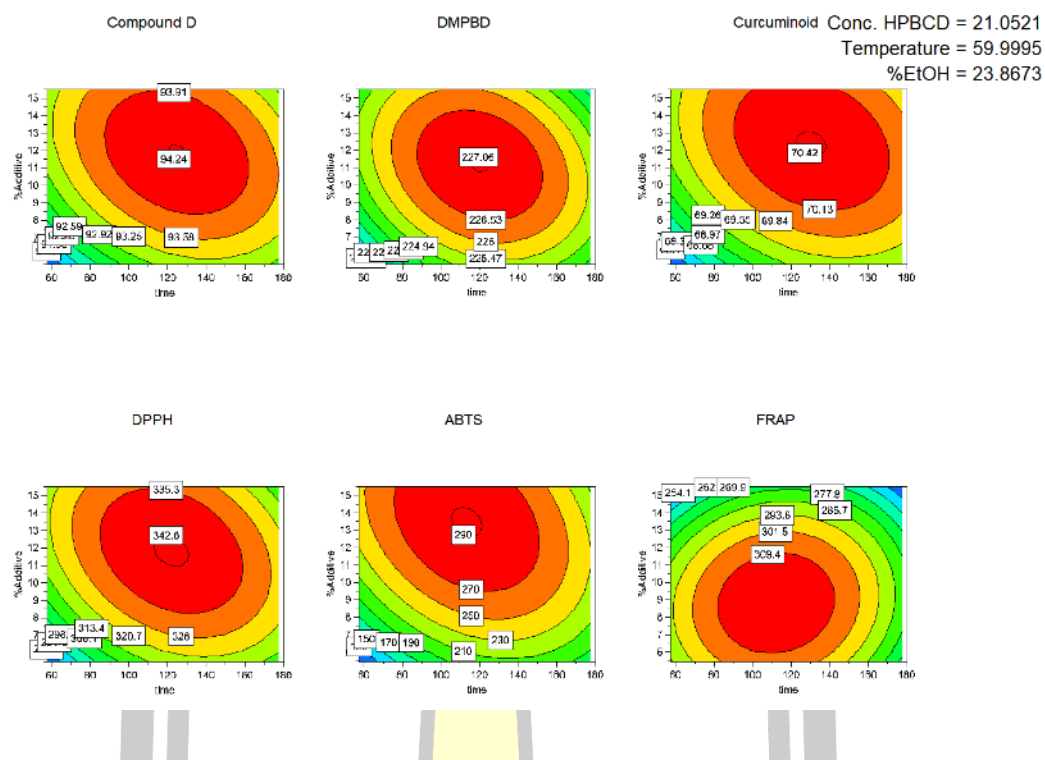
จาก Response Surface Plot พบว่าค่าการตอบสนองมีแนวโน้มเป็นเส้นโค้งพาราโบลา โดยค่าการตอบสนองสูงสุดของ Compound D, DMPBD และ Curcuminoid เกิดขึ้นเมื่อเวลาสกัดและปริมาณสารเติมแต่งอยู่ในช่วงที่เหมาะสม ซึ่งบ่งชี้ว่าทั้งสองปัจจัยนี้มีความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นกับค่าการตอบสนอง โดยการเพิ่มเวลาสกัดและปริมาณสารเติมแต่งสามารถช่วยให้การสกัดมี

ประสิทธิภาพสูงขึ้นจนถึงจุดสูงสุด ก่อนที่ค่าการตอบสนองจะลดลงหากปัจจัยเหล่านี้เกินระดับที่เหมาะสม

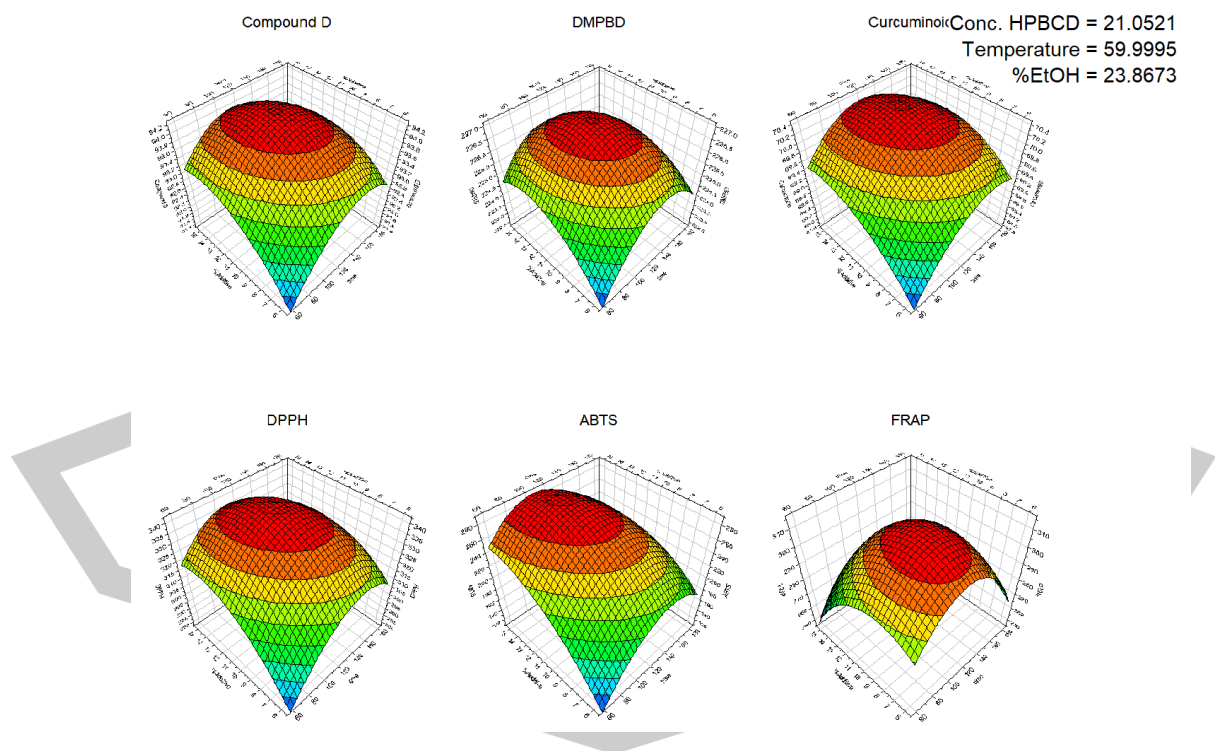
ผลการศึกษานี้สรุปได้ว่า เวลาสกดและความเข้มข้นของสารเติมแต่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบโดยตรงต่อค่าการตอบสนองของสารที่ถูกสกด โดยมีแนวโน้มเป็นพาราโบลา ซึ่งหมายความว่าค่าที่เหมาะสมของทั้งสองปัจจัยที่จะให้ผลลัพธ์สูงสุด การควบคุมปัจจัยเหล่านี้ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งสำคัญเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกด และสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลเพื่อกำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการพัฒนากระบวนการผลิตที่มีประสิทธิภาพสูงสุด



(A) Contour Plot of Optimization Study Plan 5



(B) Response Surface Plot of Optimization Study Plan 5



ภาพที่ 4.82 Contour Plot และ Surface Plot ความสัมพันธ์ระหว่าง Time และ %Additive
ในการศึกษา Optimization Study Plan 5

ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด (Temperature) และความเข้มข้นของเอทานอล (%EtOH) ต่อค่าการตอบสนองใน Optimization Study Plan 5

จากการวิเคราะห์ Contour Plot และ Response Surface Plot (ภาพที่ 4.84) ใน Optimization Study Plan 5 พบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการสกัดและความเข้มข้นของเอทานอลเป็นปัจจัยที่ส่งผลโดยตรงต่อปริมาณสารออกฤทธิ์ที่สกัดได้ รวมถึงฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัด ค่าการตอบสนองของ Compound D, DMPBD, Curcuminoid และสารต้านอนุมูลอิสระ ได้แก่ DPPH, ABTS และ FRAP มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปัจจัยทั้งสองอยู่ในช่วงที่เหมาะสม และลดลงเมื่ออยู่นอกช่วงที่กำหนด

จากแผนภาพ Contour Plot พบว่าโซนสีแดงเป็นบริเวณที่ค่าการตอบสนองของสารออกฤทธิ์สูงสุด ซึ่งสะท้อนถึงช่วงสภาวะที่เหมาะสมในการสกัด โดยในกรณีของ Compound D, DMPBD และ Curcuminoid พบว่าค่าการตอบสนองเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 69°C ขึ้นไป สำหรับ DPPH และ ABTS พบว่าการตอบสนองอยู่ในระดับสูงสุดเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 68°C ส่วน FRAP มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่อุณหภูมิสูงกว่า 64°C แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิเป็นตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อการละลายและปลดปล่อยสารออกฤทธิ์

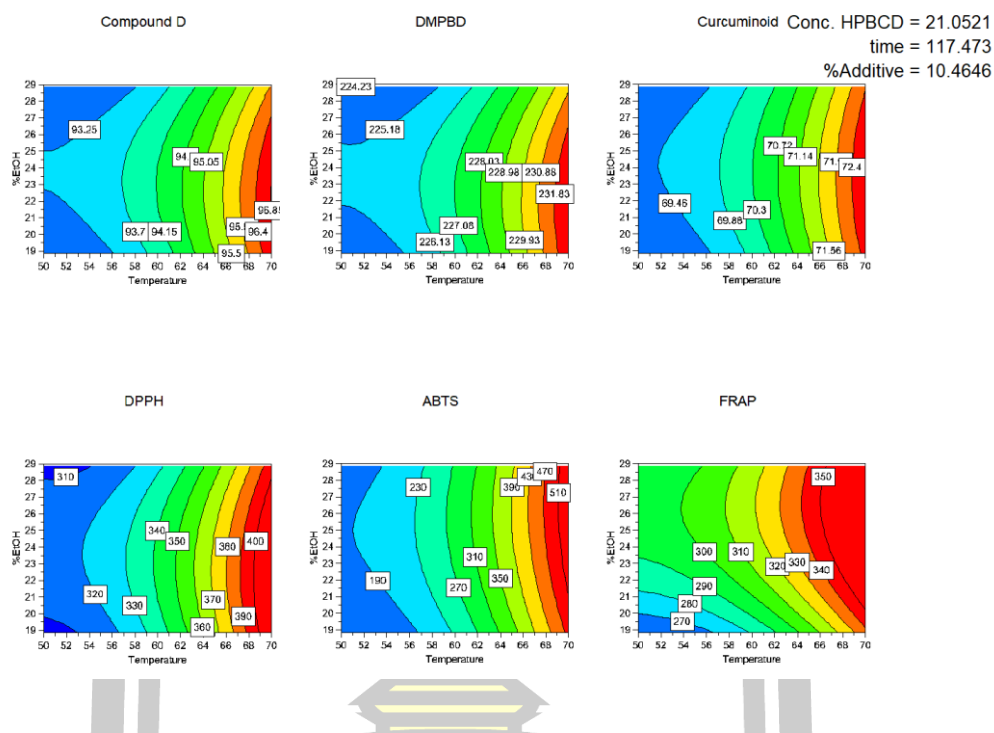
ในด้านของความเข้มข้นของเอทานอล พบว่าค่าที่เหมาะสมสำหรับ Compound D อยู่ระหว่าง 10-28% ในขณะที่ DMPBD, Curcuminoid, DPPH, ABTS และ FRAP มีค่าการตอบสนองสูงสุดเมื่อใช้เอทานอลในช่วง 19-29% การใช้เอทานอลช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดโดยทำหน้าที่เป็นตัวทำละลายที่สามารถดึงสารออกฤทธิ์ออกจากโครงสร้างของพืชได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม การใช้เอทานอลในระดับที่สูงเกินไปอาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสมดุลการละลายและอาจส่งผลให้สารบางชนิดตกตะกอนหรือสลายตัว

จากการวิเคราะห์ Response Surface Plot พบว่าค่าการตอบสนองของสารออกฤทธิ์มีแนวโน้มเป็นโค้งพาราโบลา ซึ่งหมายความว่ามีความเหมาะสมของอุณหภูมิและความเข้มข้นของเอทานอลที่ให้ผลการสกัดสูงสุด เมื่ออุณหภูมิและความเข้มข้นของเอทานอลเพิ่มขึ้นจนถึงระดับที่เหมาะสม ค่าการตอบสนองจะสูงขึ้น แต่หากเกินช่วงที่กำหนด ค่าการตอบสนองจะลดลง ซึ่งอาจเป็นผลจากการสลายตัวของสารออกฤทธิ์หรือการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสารสำคัญ

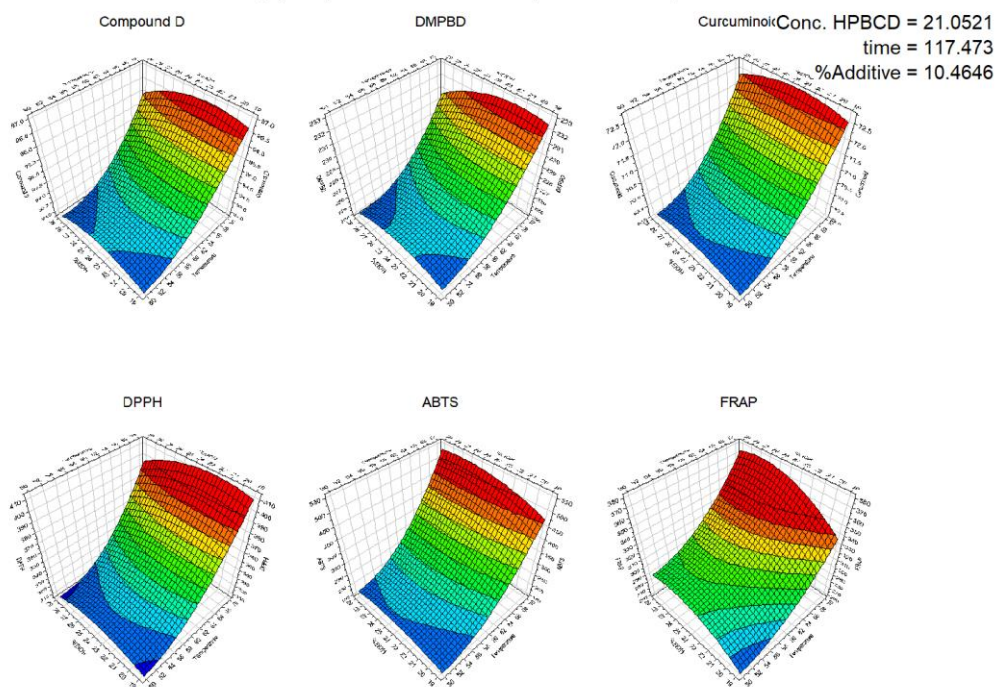
จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่าอุณหภูมิและความเข้มข้นของเอทานอลเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการสกัด โดยค่าการตอบสนองมีแนวโน้มเป็นพาราโบลา ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีค่าที่เหมาะสมของปัจจัยทั้งสองที่ให้ผลลัพธ์สูงสุด การควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมจะช่วยรักษาคุณสมบัติของสารออกฤทธิ์ และการใช้ความเข้มข้นของเอทานอลที่เหมาะสมจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการสกัดโดยไม่ทำให้สารสำคัญสูญเสียคุณสมบัติทางชีวภาพ ข้อมูล

เหล่านี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดสารออกฤทธิ์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตในอนาคต

(A) Contour Plot of Optimization Study Plan 5



(B) Response Surface Plot of Optimization Study Plan 5



ภาพที่ 4.83 Contour Plot และ Surface Plot ความสัมพันธ์ระหว่าง Temperature และ %EtOH ในการศึกษา Optimization Study Plan 5

ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด (Temperature) และความเข้มข้นของสารเติมแต่ง (%Additive) ต่อค่าการตอบสนองใน Optimization Study Plan 5

การศึกษาค่าผลของอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารเติมแต่งที่มีต่อค่าการตอบสนองใน Optimization Study Plan 5 ให้ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับแนวโน้มของปริมาณสารออกฤทธิ์และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระที่ได้จากกระบวนการสกัด โดยใช้ Contour Plot และ Response Surface Plot เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าการตอบสนองภายใต้เงื่อนไขที่แตกต่าง

จากการวิเคราะห์ Contour Plot พบว่าอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารเติมแต่งส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อปริมาณสารออกฤทธิ์ที่สกัดได้ โดยเฉพาะในกรณีของ Compound D และ DMPBD ซึ่งแสดงค่าการตอบสนองสูงสุดเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 69°C และความเข้มข้นของสารเติมแต่งอยู่ระหว่าง 7-15% ผลลัพธ์นี้ชี้ให้เห็นว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมสามารถเพิ่มการละลายของสารออกฤทธิ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม จากข้อมูลที่มีอยู่ ยังไม่สามารถสรุปได้ว่าอุณหภูมิที่สูงเกินไปจะทำให้สารเสื่อมสลายและลดประสิทธิภาพของการสกัด เนื่องจากยังไม่มีกราฟที่แสดงแนวโน้มของการลดลงอย่างชัดเจน

สำหรับ Curcuminoid พบว่าปริมาณสารที่สกัดได้สูงสุดเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 69°C และความเข้มข้นของสารเติมแต่งอยู่ระหว่าง 8-15% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสารเติมแต่งช่วยเพิ่มความสามารถในการละลายของสารออกฤทธิ์ในตัวทำละลาย อย่างไรก็ตาม หากใช้ในปริมาณที่สูงเกินไป อาจเกิดผลกระทบต่อสมดุลของระบบการสกัด ทำให้ประสิทธิภาพลดลง

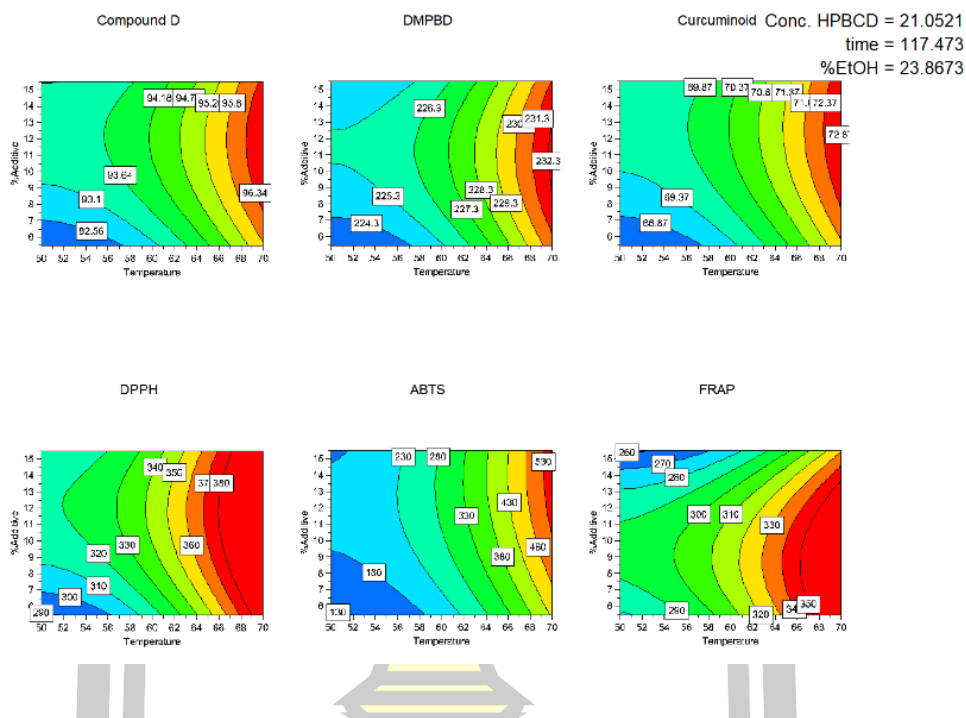
ในด้านฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ค่าการตอบสนองของ DPPH และ FRAP สูงสุดเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 64°C ในขณะที่ ABTS มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่อุณหภูมิสูงกว่า 68°C นอกจากนี้ ความเข้มข้นของสารเติมแต่งที่ให้ผลลัพธ์ดีที่สุดสำหรับ DPPH อยู่ที่ 5-15% ABTS อยู่ที่ 11-15% และ FRAP อยู่ที่ 5-14% ซึ่งบ่งชี้ว่าทั้งอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารเติมแต่งมีบทบาทสำคัญต่อประสิทธิภาพของสารสกัดในเชิงฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ

Response Surface Plot แสดงให้เห็นลักษณะของค่าการตอบสนองที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และอยู่ในช่วงที่เหมาะสมก่อนจะคงที่ อย่างไรก็ตาม จากข้อมูลที่มีอยู่ ยังไม่สามารถสรุปได้ว่าอุณหภูมิที่สูงมากจะส่งผลให้ค่าการตอบสนองลดลง เนื่องจากไม่มีแนวโน้มชัดเจนในกราฟที่แสดงการลดลงของค่าการตอบสนอง

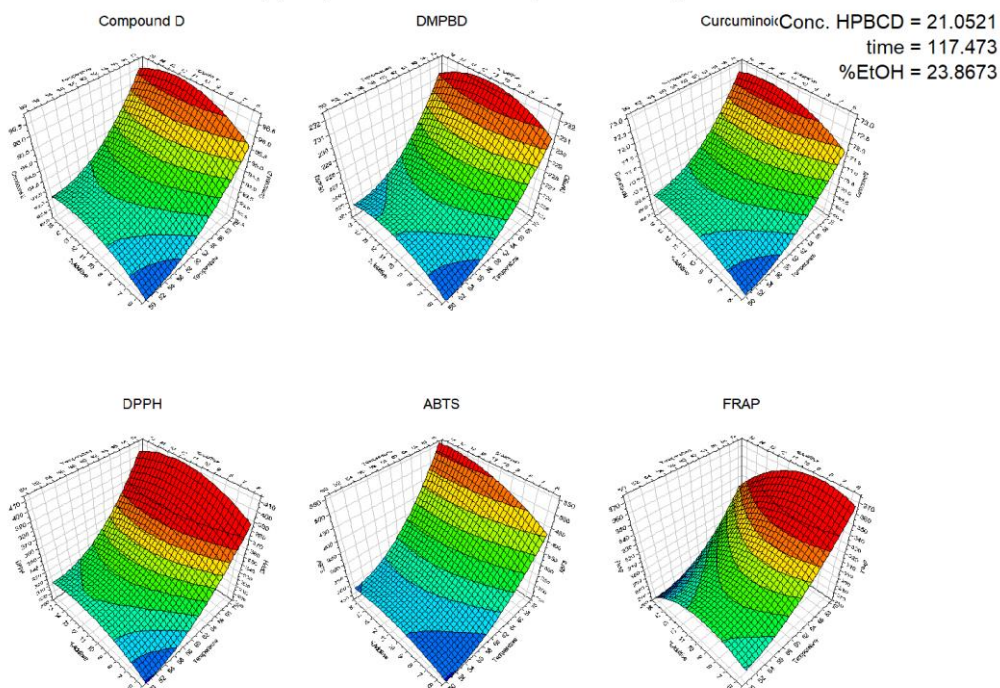
เมื่อพิจารณาภาพรวม อุณหภูมิและความเข้มข้นของสารเติมแต่งเป็นปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการสกัด โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมควรอยู่ที่ 60°C ขึ้นไป และความเข้มข้นของสารเติมแต่งที่ควรใช้เพื่อให้ได้ค่าการตอบสนองสูงสุดอยู่ระหว่าง 10-12% การควบคุม

เงื่อนไขเหล่านี้เหมาะสมจึงเป็นปัจจัยสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดและคงไว้ซึ่งคุณภาพของสารสกัดให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

(A) Contour Plot of Optimization Study Plan 5



(B) Response Surface Plot of Optimization Study Plan 5



ภาพที่ 4.84 Contour Plot และ Surface Plot ความสัมพันธ์ระหว่าง Temperature และ %Additive ในการศึกษา Optimization Study Plan 5

ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเอทานอล (%EtOH) และความเข้มข้นของสารเติมแต่ง (%Additive) ต่อค่าการตอบสนองใน Optimization Study Plan 5

การศึกษานี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์ผลของความเข้มข้นของเอทานอลและสารเติมแต่งต่อค่าการตอบสนองในกระบวนการสกัด เพื่อประเมินแนวโน้มที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการสกัดสารสำคัญ โดยใช้ Contour Plot และ Response Surface Plot (ภาพที่ 4.86) เป็นเครื่องมือช่วยให้เข้าใจพฤติกรรมของระบบภายใต้เงื่อนไขที่แตกต่างกัน

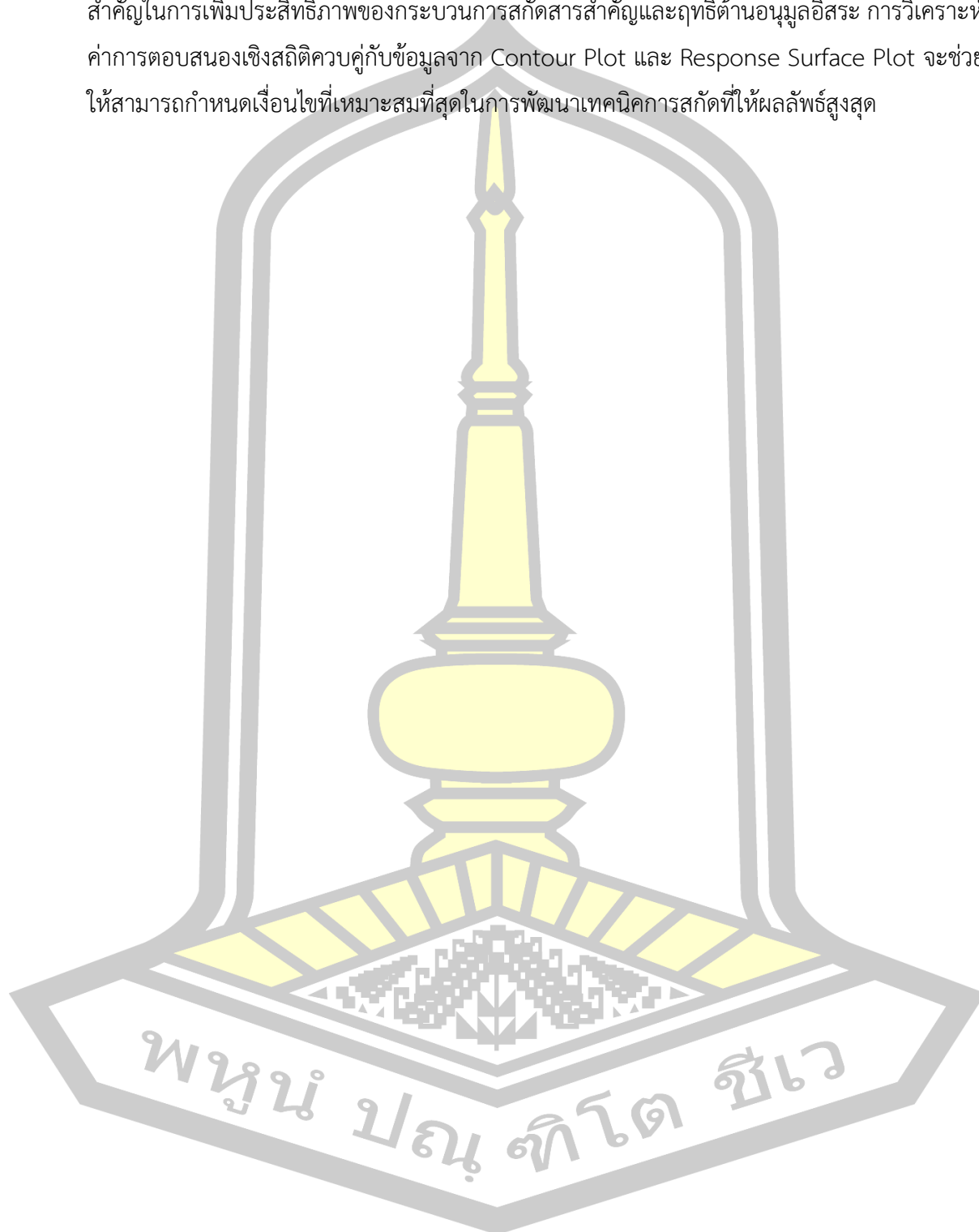
ผลการวิเคราะห์พบว่า ความเข้มข้นของเอทานอลและสารเติมแต่งมีอิทธิพลโดยตรงต่อปริมาณสารสกัดและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ โดยเฉพาะในกรณีของ Compound D, DMPBD และ Curcuminoid ซึ่งการเพิ่มความเข้มข้นของเอทานอลและสารเติมแต่งในระดับที่เหมาะสมสามารถเพิ่มปริมาณสารสกัดได้อย่างมีนัยสำคัญ Curcuminoid แสดงค่าการตอบสนองสูงสุดเมื่อ %EtOH อยู่ในช่วง 21-29 และ %Additive อยู่ที่ 10-15 ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าเอทานอลช่วยเพิ่มการละลายของสารออกฤทธิ์ที่มีโพลาริตีสูง อย่างไรก็ตาม หากความเข้มข้นของปัจจัยทั้งสองสูงเกินไป อาจเกิดภาวะอิ่มตัวของระบบ หรือสารเติมแต่งอาจรบกวนสมดุลของการละลายของสารสำคัญ ส่งผลให้ค่าการตอบสนองลดลง

สำหรับฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ การตอบสนองของ DPPH, ABTS และ FRAP แสดงให้เห็นว่าในช่วงแรก ความเข้มข้นของเอทานอลที่เพิ่มขึ้นช่วยส่งเสริมประสิทธิภาพของสารต้านอนุมูลอิสระ อย่างไรก็ตาม เมื่อความเข้มข้นสูงเกินไป ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระกลับลดลง โดยเฉพาะ ABTS ซึ่งมีค่าการตอบสนองเฉพาะในโซนสีเหลืองเมื่อ %EtOH อยู่ระหว่าง 22-29 และ %Additive อยู่ที่ 10-15 สารเติมแต่งมีบทบาทสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัด แต่หากใช้ในปริมาณที่สูงเกินไป อาจทำให้เกิดการตกตะกอนหรือรบกวนสมดุลของระบบ ส่งผลให้ค่าการตอบสนองลดลง

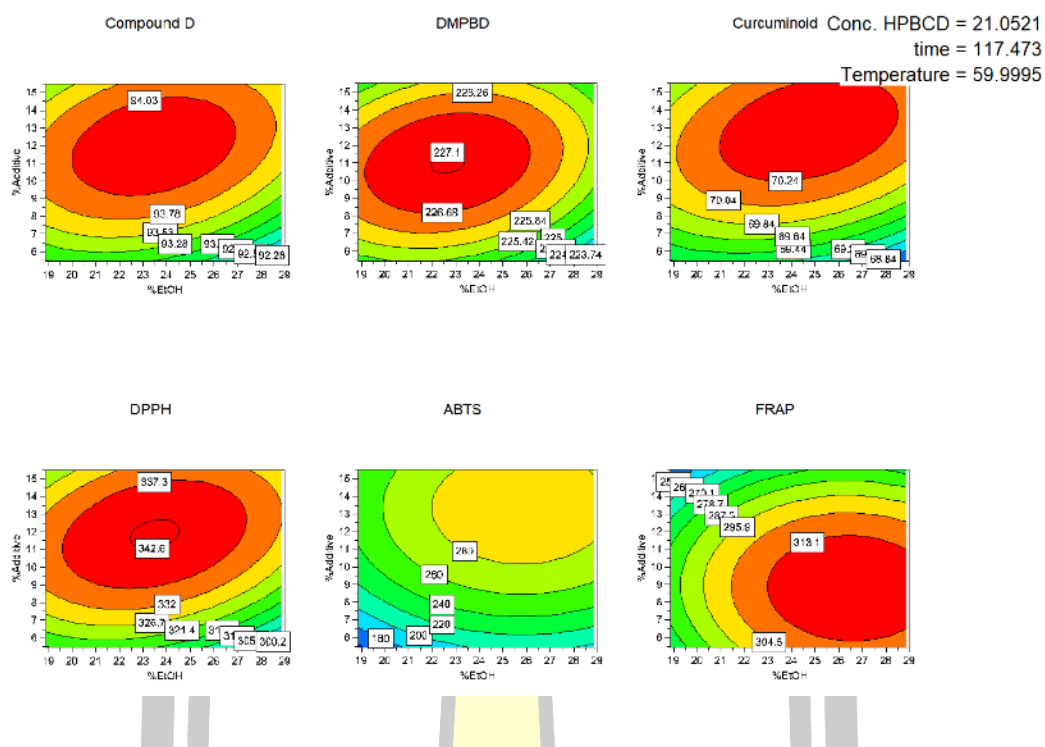
Contour Plot แสดงให้เห็นว่าโซนสีแดงเป็นพื้นที่ที่มีค่าการตอบสนองสูงสุด ก่อนที่ค่าจะลดลงไปสู่โซนสีส้มและสีเหลืองตามลำดับ โดยช่วงค่าที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย ได้แก่ Compound D ที่ %EtOH 20-27 และ %Additive 9-14 ขณะที่ DMPBD แสดงค่าการตอบสนองสูงสุดที่ %EtOH 19-28 และ %Additive 8-13 Curcuminoid อยู่ในช่วง %EtOH 21-29 และ %Additive 10-15 ส่วนฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH มีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ %EtOH 20-27 และ %Additive 9-14 สำหรับ ABTS พบเฉพาะในโซนสีเหลืองที่ %EtOH 22-29 และ %Additive 10-15 ขณะที่ FRAP มีค่าการตอบสนองสูงสุดในช่วง %EtOH 23-29 และ %Additive 6-11

จากการวิเคราะห์ Response Surface Plot พบว่าค่าการตอบสนองมีลักษณะเป็นโค้งสะท้อนถึงความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นระหว่างความเข้มข้นของเอทานอลและสารเติมแต่งกับค่าการตอบสนอง การเปลี่ยนแปลงของปัจจัยทั้งสองมีค่าที่เหมาะสมที่สุดในการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัด แต่หากใช้ในระดับที่สูงเกินไป อาจทำให้ประสิทธิภาพลดลง

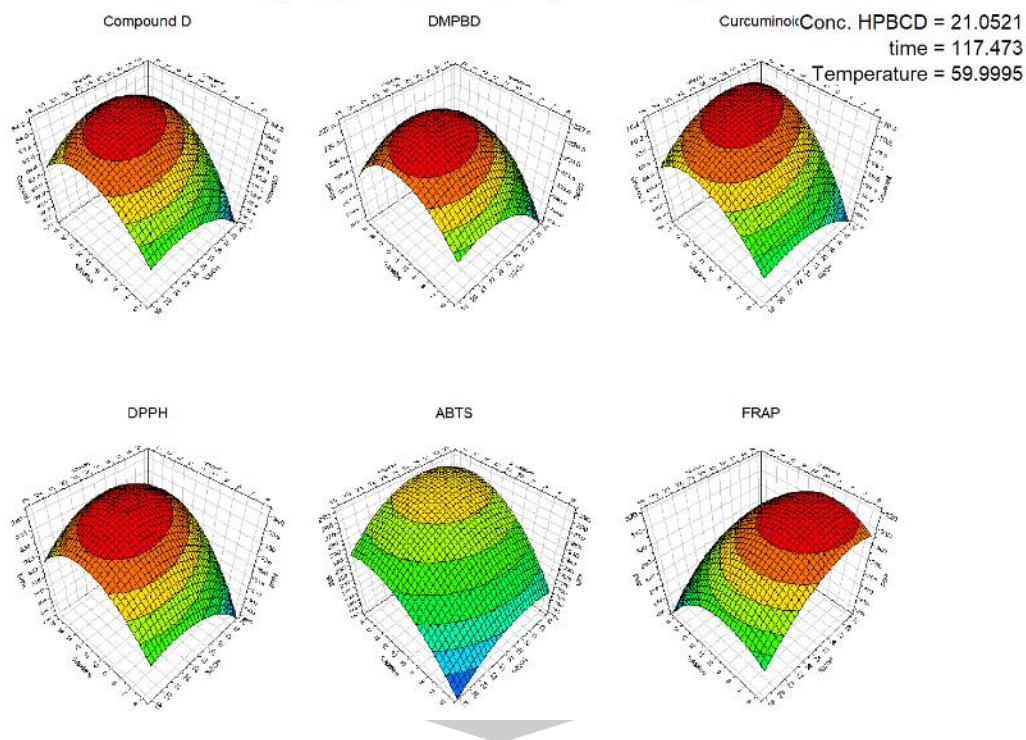
ดังนั้น การกำหนดสัดส่วนของเอทานอลและสารเติมแต่งให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมเป็นสิ่งสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดสารสำคัญและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ การวิเคราะห์ค่าการตอบสนองเชิงสถิติควบคู่กับข้อมูลจาก Contour Plot และ Response Surface Plot จะช่วยให้สามารถกำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในการพัฒนาเทคนิคการสกัดที่ให้ผลลัพธ์สูงสุด



Investigation: Oti P5 Sterring HP-Et-t80 (PLS, comp.=6)
Contour Plot



(B) Response Surface Plot of Optimization Study Plan 5



ภาพที่ 4.85 Contour Plot และ Surface Plot ความสัมพันธ์ระหว่าง %EtOH และ %Additive ในการศึกษา Optimization Study Plan 5

บทสรุปการวิเคราะห์ Contour Plot และ Surface Plot ใน Optimization Study Plan 5

การศึกษาครั้งนี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อกระบวนการสกัดสารออกฤทธิ์จากเหง้าไพล โดยอาศัย Contour Plot และ Response Surface Plot เป็นเครื่องมือหลักในการประเมินแนวโน้มของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าการตอบสนอง ซึ่งช่วยให้เข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและค่าการตอบสนองของสารสกัดได้อย่างเป็นระบบ

จากผลการศึกษาพบว่า ปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการสกัด ได้แก่ ความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทรีน (Conc. HPBCD), ความเข้มข้นของเอทานอล (%EtOH), ความเข้มข้นของสารเติมแต่ง (%Additive), อุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด (Temperature) และระยะเวลาสกัด (Time) โดยพบว่าปัจจัยเหล่านี้มีผลกระทบทั้งในด้านปริมาณของสารออกฤทธิ์ที่สกัดได้และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัด

การวิเคราะห์ Contour Plot แสดงให้เห็นว่า ความเข้มข้นของไฮโคลเด็กซ์ทรีนที่เหมาะสมช่วยเพิ่มความสามารถในการละลายของสารออกฤทธิ์ แต่หากความเข้มข้นสูงเกินไป อาจทำให้เกิดภาวะอิมิตัว ส่งผลให้ประสิทธิภาพการสกัดลดลง ในขณะที่ความเข้มข้นของเอทานอลมีบทบาทสำคัญในการควบคุมการละลายของสารที่มีขั้วและไม่มีขั้ว หากใช้ในระดับที่พอเหมาะสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการสกัดได้อย่างมีนัยสำคัญ แต่หากสูงเกินไปอาจทำให้เกิดการตกตะกอนของสารสกัดบางชนิด

ในส่วนของอุณหภูมิและเวลาสกัด พบว่าทั้งสองปัจจัยนี้มีผลโดยตรงต่อค่าการตอบสนอง โดยเมื่ออุณหภูมิและเวลาสกัดเพิ่มขึ้น ปริมาณสารที่ถูกสกัดออกมามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม จากข้อมูลที่มีอยู่ ยังไม่พบแนวโน้มของค่าการตอบสนองที่ลดลงอย่างชัดเจนที่อุณหภูมิสูง ดังนั้น จึงยังไม่สามารถสรุปได้ว่าอุณหภูมิที่สูงมากจะทำให้เกิดการสลายตัวของสารออกฤทธิ์

Response Surface Plot ช่วยเสริมการวิเคราะห์ Contour Plot โดยแสดงแนวโน้มเชิงโค้งพาราโบลาของค่าการตอบสนอง ซึ่งบ่งชี้ว่ามีจุดที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย หากค่าของปัจจัยสูงเกินไปกว่าจุดสมดุล อาจทำให้ประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดลดลง ซึ่งสอดคล้องกับหลักการที่ว่า เมื่อกระบวนการสกัดดำเนินไปถึงระดับอิมิตัว การเพิ่มปัจจัยต่าง ๆ ต่อไปอาจไม่ช่วยให้ได้สารออกฤทธิ์เพิ่มขึ้น และอาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสมดุลในระบบ

โดยสรุป การวิเคราะห์ Contour Plot และ Response Surface Plot ใน Optimization Study Plan 5 แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการสกัด โดยค่าการตอบสนองมีลักษณะเป็นพาราโบลา ซึ่งหมายความว่ามีความเหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย หากค่าเหล่านี้เกินกว่าขีดจำกัด อาจส่งผลกระทบเชิงลบต่อคุณภาพของสารสกัด ดังนั้น การควบคุมตัวแปรให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมเป็นสิ่งสำคัญในการพัฒนาเงื่อนไขที่ดีที่สุดของกระบวนการ

สกัด ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาเทคนิคการสกัดเพื่อเพิ่มคุณภาพและปริมาณของสารออกฤทธิ์ให้ได้สูงสุด

4.3.5.5 การระบุจุดที่เหมาะสม (Optimization) ใน Optimization Study Plan 5

การกำหนดจุดที่เหมาะสมในการศึกษานี้อาศัยหลักการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดโดยใช้แบบจำลองทางสถิติและเทคนิคการหาค่าสูงสุดของตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อผลลัพธ์หลัก

ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์เชิงตัวเลขแสดงให้เห็นว่าค่าที่เหมาะสมของตัวแปรที่สามารถนำไปใช้เพื่อให้ได้ค่าการตอบสนองที่สูงสุดอยู่ในช่วงที่กำหนด ได้แก่ Conc. HPBCD อยู่ในช่วง 10–30 mM, เวลาสกัดในช่วง 60–180 นาที, อุณหภูมิที่ใช้ในการสกัดอยู่ระหว่าง 40–60 องศาเซลเซียส, ความเข้มข้นของเอทานอลระหว่าง 20–30% และความเข้มข้นของสารเติมแต่งอยู่ในช่วง 5–15% โดยเป้าหมายของการเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัดคือการหาค่าพารามิเตอร์ที่ให้ค่าการตอบสนองสูงสุดสำหรับทุกตัวแปร จากผลการคำนวณในตารางที่ 4.27 พบว่าจุดที่ให้ค่าการตอบสนองสูงสุดนั้นแสดงให้เห็นค่าที่ดีที่สุดในระดับที่แตกต่างกัน โดยค่าการตอบสนองของ Compound D มีค่าประมาณ 94.4071 µg/ml ในขณะที่ค่าการตอบสนองของ DMPBD สูงสุดอยู่ที่ 227.78 µg/ml ส่วนค่าของ Curcuminoid อยู่ที่ 70.4069 µg/ml สำหรับฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ค่า DPPH สูงสุดอยู่ที่ 172.232 µM TE, ค่า ABTS สูงสุดที่ 168.167 µM TE และค่า FRAP สูงสุดที่ 326.103 µM TE จากข้อมูลที่ได้แสดงให้เห็นว่าเงื่อนไขที่เหมาะสมของปัจจัยแปดสามารถส่งผลต่อประสิทธิภาพของการสกัดอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 4.27 แสดงค่าเป้าหมายของการเพิ่มประสิทธิภาพของตัวแปรตอบสนองใน Optimization Study Plan 5 จากโปรแกรม MODDE 7.0

Response Variable	Optimization Objective	Weight	Predicted Minimum Value	Predicted Maximum Value
Compound D	Maximize	1	93.8867	94.4071
DMPBD	Maximize	1	226.851	227.78
Curcuminoid	Maximize	1	69.9957	70.4069
DPPH	Maximize	1	166.282	172.232
ABTS	Maximize	1	154.099	168.167
FRAP	Maximize	1	311.684	326.103

ตารางที่ 4.28 ผลการวิเคราะห์ค่าที่เหมาะสมของปัจจัยและค่าการตอบสนองใน Optimization Study Plan 5 จากโปรแกรม MODDE 7.0

No.	X3 (mM)	X5 (min)	X9 (°C)	X7 (%EtOH)	X8 (%Add)	Y1 (µg/ml)	Y2 (µg/ml)	Y3 (µg/ml)	Y4 (µM TE)	Y5 (µM TE)	Y6 (µM TE)
1	16.938	125.410	40.000	25.485	9.682	94.074	227.037	70.160	339.121	253.602	312.174
2	18.105	127.697	40.000	25.557	11.617	94.307	227.409	70.337	344.179	254.083	308.204
3	20.884	119.723	59.999	23.980	10.483	94.165	227.028	70.303	341.618	280.608	314.604
4	21.082	116.334	60.000	24.203	10.719	94.164	227.015	70.306	341.637	281.683	314.587
5	17.130	124.949	40.000	25.370	9.555	94.060	227.027	70.147	338.779	254.041	312.229
6	20.974	119.164	59.999	23.993	10.464	94.162	227.027	70.300	341.564	279.927	314.677
7	21.082	116.334	60.000	24.203	10.719	94.164	227.015	70.306	341.637	281.683	314.587
8	16.9383	125.41	40.0001	25.4851	9.6822	94.0739	227.037	70.1595	339.121	253.602	312.174

การศึกษานี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อค่าการตอบสนองของกระบวนการสกัดสารออกฤทธิ์จากเหง้าโพล โดยใช้โปรแกรม MODDE 7.0 เพื่อระบุค่าที่เหมาะสมของตัวแปรอิสระและประเมินผลลัพธ์ที่ได้จากการสกัด ข้อมูลที่นำเสนอในตารางที่ 4.28 แสดงถึงแนวโน้มของปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อปริมาณสารออกฤทธิ์และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัด

ผลการวิเคราะห์พบว่า ความเข้มข้นของไฮโดรคิเคดิกซ์ทริน (Conc. HPBCD) อยู่ในช่วง 16.938 - 21.082 mM โดยค่าเฉลี่ยของการทดลองอยู่ที่ประมาณ 20 mM ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่ดีในการช่วยเพิ่มการละลายของสารออกฤทธิ์ ขณะที่ความเข้มข้นของเอทานอลอยู่ในช่วง 23.980 - 25.557% ซึ่งช่วยเสริมการละลายของสารออกฤทธิ์และสนับสนุนกระบวนการสกัดให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

อุณหภูมิที่ใช้ในการสกัดมีค่าตั้งแต่ 40 - 60°C ซึ่งแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มที่อุณหภูมิสูงกว่า 59°C มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัด อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีแนวโน้มที่ชัดเจนของค่าการตอบสนองที่ลดลงที่อุณหภูมิสูง ระยะเวลาสกัดอยู่ในช่วง 116.334 - 127.697 นาที ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่เหมาะสมสำหรับการดึงสารออกฤทธิ์ออกจากตัวอย่างได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ค่าการตอบสนองของสารสำคัญที่ได้จากการสกัดมีแนวโน้มคงที่ในช่วงของปัจจัยที่กำหนด ปริมาณสารออกฤทธิ์หลัก (Y1) อยู่ระหว่าง 94.060 - 94.307 µg/ml ซึ่งบ่งชี้ว่ากระบวนการนี้สามารถรักษาคุณภาพของสารสกัดได้ดี ค่า Curcuminoid (Y2) ค่อนข้างคงที่ในช่วง 227.015 -

227.409 $\mu\text{g/ml}$ ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงเสถียรภาพของกระบวนการสกัดที่ใช้ ส่วนค่า DMPBD (Y3) มีค่าการตอบสนองในช่วง 70.147 - 70.337 $\mu\text{g/ml}$ แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มที่สม่ำเสมอในทุกสภาวะที่ทำการทดลอง

ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระที่วัดจากค่าการตอบสนอง DPPH (Y4) และ FRAP (Y5) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 59°C โดยค่า DPPH มีค่าตอบสนองสูงสุดที่ 281.683 $\mu\text{M TE}$ ในขณะที่ค่า FRAP สูงสุดอยู่ที่ 314.677 $\mu\text{M TE}$ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเงื่อนไขการสกัดที่กำหนดมีความเหมาะสมในการรักษาสภาพของสารต้านอนุมูลอิสระ

จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า ความเข้มข้นของไซโคลเด็กซ์ทรินในช่วง 18 - 22 mM ความเข้มข้นของเอทานอลที่ 16 - 25% อุณหภูมิที่ 59 - 60°C และระยะเวลาสกัดที่ 116 - 127 นาที เป็นช่วงค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการสกัดสารออกฤทธิ์ให้ได้ปริมาณสูงสุดพร้อมกับคงไว้ซึ่งฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระที่ดีที่สุด การควบคุมปัจจัยเหล่านี้ให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมเป็นสิ่งสำคัญเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัด และสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาเทคนิคที่ช่วยปรับปรุงคุณภาพของสารสกัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4.3.5.6 การตรวจสอบความถูกต้องของค่าคาดการณ์ใน Optimization Study Plan 5

การตรวจสอบความถูกต้องของค่าคาดการณ์เป็นกระบวนการสำคัญที่ใช้ประเมินความแม่นยำของแบบจำลองที่ใช้ทำนายผลลัพธ์ของกระบวนการสกัด โดยใน Optimization Study Plan 5 ได้มีการเปลี่ยนแปลงเทคนิคการสกัดจาก Ultrasonic-Assisted Extraction (UAE) ซึ่งใช้ใน Plan 1-4 มาเป็น Shaking Extraction (SE) ซึ่งเป็นการสกัดโดยอาศัยการเขย่าภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด โดยมีการเพิ่ม ปัจจัยอุณหภูมิ และกำหนดรอบการเขย่าไว้ที่ 200 รอบต่อนาที (rpm) เงื่อนไขของการทดลองในแผนนี้ประกอบด้วย ความเข้มข้นของ HPBCD 21 มิลลิโมลาร์ (mM), เวลาสกัด 119 นาที, ความเข้มข้นของเอทานอล 24% (v/v), การเติมสารเพิ่มประสิทธิภาพ 10% และอุณหภูมิที่ควบคุมไว้ที่ 60°C เพื่อประเมินความถูกต้องของค่าคาดการณ์ ได้มีการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากแบบจำลองกับค่าที่ได้จากการทดลองจริง โดยอาศัย Verification Triplicate ซึ่งเป็นการทดลองซ้ำสามครั้งเพื่อลดผลกระทบจากความแปรปรวนของการทดลองและเพิ่มความแม่นยำของผลลัพธ์แสดงในตารางที่ 4.29 ในการตรวจสอบค่าคาดการณ์ ได้มีการนำค่าคาดการณ์ที่ได้จากแบบจำลองมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองจริงในรูปแบบ Verification Triplicate โดยพิจารณาทั้งช่วงความเชื่อมั่นของค่าคาดการณ์ และการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (% Relative Error, %RE) ซึ่งหากค่าคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง $\leq 5\%$ ถือว่าค่าคาดการณ์มีความแม่นยำเพียงพอ

ผลการวิเคราะห์พบว่า ค่าของ Compound D ซึ่งมีหน่วยเป็น $\mu\text{g/ml}$ มีค่าคาดการณ์เฉลี่ยอยู่ที่ 94.114 $\mu\text{g/ml}$ ขณะที่ค่าตรวจสอบจริงเฉลี่ยอยู่ที่ 92.470 $\mu\text{g/ml}$ ส่งผลให้ค่า %RE เท่ากับ

1.75% ซึ่งอยู่ในระดับที่สามารถยอมรับได้ ค่าตรวจสอบจริงทั้งหมดอยู่ภายในช่วงค่าคาดการณ์ที่กำหนดไว้ระหว่าง 93.783 – 94.445 $\mu\text{g/ml}$ แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถทำนายค่าของสารประกอบนี้ได้อย่างแม่นยำ

สำหรับ DMPBD ค่าคาดการณ์เฉลี่ยอยู่ที่ 226.977 $\mu\text{g/ml}$ ขณะที่ค่าตรวจสอบจริงเฉลี่ยอยู่ที่ 226.316 $\mu\text{g/ml}$ ส่งผลให้ค่า %RE เท่ากับ 0.29% ซึ่งต่ำมากและสามารถยอมรับได้ โดยค่าตรวจสอบจริงทั้งหมดอยู่ในช่วงค่าคาดการณ์ที่กำหนดไว้ระหว่าง 226.638 – 227.316 $\mu\text{g/ml}$ แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถทำนายค่าของสารนี้ได้อย่างแม่นยำ

ในส่วนของ Curcuminoid ซึ่งเป็นสารสำคัญที่ต้องการศึกษาและมีหน่วยเป็น $\mu\text{g/ml}$ ค่าคาดการณ์เฉลี่ยอยู่ที่ 70.250 $\mu\text{g/ml}$ ขณะที่ค่าตรวจสอบจริงเฉลี่ยอยู่ที่ 67.490 $\mu\text{g/ml}$ ส่งผลให้ค่า %RE เท่ากับ 3.93% ซึ่งยังคงอยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้ แม้ว่าค่าตรวจสอบจริงจะมีแนวโน้มต่ำกว่าค่าคาดการณ์เล็กน้อย แต่ยังคงอยู่ในช่วงค่าคาดการณ์ที่กำหนดไว้ระหว่าง 70.051 – 70.449 $\mu\text{g/ml}$ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถใช้ทำนายค่าของสารประกอบกลุ่มเคอร์คูมินอยด์ได้อย่างแม่นยำ

ตารางที่ 4.29 แสดงการเปรียบเทียบค่าคาดการณ์และค่าตรวจสอบ (Verification) ใน Optimization Study Plan 5

Compound	Prediction (Mean)	Prediction (Lower)	Prediction (Upper)	Verification (1)	Verification (2)	Verification (3)	ค่าเฉลี่ย
Compound D ($\mu\text{g/ml}$)	94.114	93.783	94.445	94.159	91.266	91.984	92.470
DMPBD ($\mu\text{g/ml}$)	226.977	226.638	227.316	229.329	230.329	219.291	226.316
Curcuminoid ($\mu\text{g/ml}$)	70.250	70.051	70.449	69.125	72.649	60.695	67.490
DPPH ($\mu\text{M TE}$)	340.526	333.368	347.683	350.239	338.912	339.629	342.927
ABTS ($\mu\text{M TE}$)	275.697	261.561	289.834	269.290	298.191	278.291	281.924
FRAP ($\mu\text{M TE}$)	315.872	304.170	327.574	330.294	315.191	329.191	324.892

เมื่อพิจารณาค่าผลลัพธ์ของ DPPH ซึ่งเป็นค่าที่ใช้วัดศักยภาพของสารสกัดในการทำอนุมูลอิสระ และมีหน่วยเป็น $\mu\text{M TE}$ พบว่าค่าคาดการณ์เฉลี่ยอยู่ที่ 340.526 $\mu\text{M TE}$ ขณะที่ค่าตรวจสอบจริงเฉลี่ยอยู่ที่ 342.927 $\mu\text{M TE}$ ส่งผลให้ค่า %RE เท่ากับ 0.70% ซึ่งอยู่ในระดับที่สามารถยอมรับได้

โดยค่าตรวจสอบจริงทั้งหมดอยู่ภายในช่วงค่าคาดการณ์ที่กำหนดไว้ระหว่าง 333.368 – 347.683 $\mu\text{M TE}$ แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถพยากรณ์ค่าของสารต้านอนุมูลอิสระ DPPH ได้อย่างแม่นยำ

สำหรับค่าการทดสอบ ABTS ซึ่งมีหน่วยเป็น $\mu\text{M TE}$ ค่าคาดการณ์เฉลี่ยอยู่ที่ 275.697 $\mu\text{M TE}$ ขณะที่ค่าตรวจสอบจริงเฉลี่ยอยู่ที่ 281.924 $\mu\text{M TE}$ ส่งผลให้ค่า %RE เท่ากับ 2.26% ซึ่งอยู่ในระดับที่สามารถยอมรับได้ โดยค่าตรวจสอบจริงทั้งหมดอยู่ในช่วงค่าคาดการณ์ที่กำหนดไว้ระหว่าง 261.561 – 289.834 $\mu\text{M TE}$ จึงสามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองสามารถใช้พยากรณ์ค่าการทดสอบ ABTS ได้อย่างแม่นยำ

สุดท้ายคือค่าการทดสอบ FRAP ซึ่งใช้วัดศักยภาพของสารต้านอนุมูลอิสระผ่านปฏิกิริยารีดักชัน และมีหน่วยเป็น $\mu\text{M TE}$ ค่าคาดการณ์เฉลี่ยอยู่ที่ 315.872 $\mu\text{M TE}$ ขณะที่ค่าตรวจสอบจริงเฉลี่ยอยู่ที่ 324.892 $\mu\text{M TE}$ ส่งผลให้ค่า %RE เท่ากับ 2.86% ซึ่งอยู่ในระดับที่สามารถยอมรับได้ โดยค่าตรวจสอบจริงทั้งหมดอยู่ในช่วงค่าคาดการณ์ที่กำหนดไว้ระหว่าง 304.170 – 327.574 $\mu\text{M TE}$ สะท้อนว่าแบบจำลองสามารถพยากรณ์ค่าของสารต้านอนุมูลอิสระ FRAP ได้อย่างแม่นยำ

จากผลการวิเคราะห์ทั้งหมดพบว่า ค่าคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (%RE) ของสารส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 0.29% - 3.93% ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์ 5% ที่กำหนดไว้ในเกณฑ์การยอมรับของแบบจำลอง โดยเฉพาะค่า DMPBD และ DPPH ที่มีค่าคลาดเคลื่อนต่ำมาก แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถใช้ทำนายผลลัพธ์ของกระบวนการสกัดด้วย เทคนิค Shaking Extraction ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การเปลี่ยนแปลงเทคนิคการสกัดจาก Ultrasonic-Assisted Extraction (UAE) ซึ่งใช้ใน Plan 1-4 มาเป็น Shaking Extraction (SE) โดยเพิ่มปัจจัยอุณหภูมิและควบคุมรอบการเขย่าที่ 200 rpm ส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงของค่าที่ได้จากการทดลองเล็กน้อยเมื่อเทียบกับค่าคาดการณ์ อย่างไรก็ตาม ค่าคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ที่ต่ำในทุกพารามิเตอร์ที่ศึกษาแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองยังคงสามารถใช้พยากรณ์ผลลัพธ์ได้อย่างแม่นยำ แม้จะมีการเปลี่ยนแปลงวิธีการสกัด ซึ่งเป็นข้อบ่งชี้ถึงความแข็งแกร่งของแบบจำลองที่ใช้สำหรับการออกแบบและวิเคราะห์กระบวนการสกัดในงานวิจัยนี้

4.3.5.7 บทสรุปผลการศึกษาการปรับสภาวะการสกัด Optimization Study Plan 5

การศึกษานี้มุ่งเน้นการปรับสภาวะการสกัดสารออกฤทธิ์จากเหง้าโพลกอยด์ Optimization Study Plan 5 โดยใช้ Shaking Extraction แทนที่ Ultrasonic Extraction ซึ่งเป็นเทคนิคที่แตกต่างไปจากการทดลองก่อนหน้านี้ ผลการศึกษาพบว่าเทคนิคดังกล่าวส่งผลต่อปริมาณสารออกฤทธิ์ที่สกัดได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะในกลุ่ม Curcuminoids (Curcumin, Demethoxycurcumin และ Bisdemethoxycurcumin) รวมถึงสารสำคัญอื่น ๆ เช่น DMPBD และ Compound D นอกจากนี้ ปัจจัยที่ถูกปรับเปลี่ยนในการทดลอง เช่น อุณหภูมิ (X9) มีบทบาทสำคัญ

ต่อประสิทธิภาพการสกัด และมีผลต่อค่าการต้านอนุมูลอิสระที่ประเมินจาก DPPH, ABTS และ FRAP ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงผลกระทบของเงื่อนไขการสกัดที่แตกต่างกัน

เมื่อพิจารณาผลกระทบของแต่ละปัจจัย พบว่า X8 (ความเข้มข้นของสารเติมแต่ง) เป็นตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อปริมาณสารออกฤทธิ์และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระมากที่สุด โดยช่วยเพิ่มการละลายและความสามารถของสารออกฤทธิ์ในการทำปฏิกิริยากับตัวทำละลายได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยค่าที่เหมาะสมของ X8 อยู่ที่ 10.464 - 11.617% ส่วน X5 (เวลาสกัด) มีผลต่อการดึงสารออกจากเหง้าไพล โดยค่าที่เหมาะสมของเวลาสกัดอยู่ที่ 116.334 - 127.697 นาที ซึ่งช่วยให้สามารถสกัดสารออกฤทธิ์ได้มากที่สุด อย่างไรก็ตาม หากเวลาสกัดนานเกินไป อาจเกิดภาวะอิมิตัว ทำให้ประสิทธิภาพลดลง

สำหรับ X7 (ความเข้มข้นของเอทานอล) พบว่าค่าที่เหมาะสมของเอทานอลอยู่ที่ 23.980 - 25.557% ซึ่งช่วยเพิ่มความสามารถในการละลายของสารออกฤทธิ์ ในขณะที่ X9 (อุณหภูมิในการสกัด) แสดงให้เห็นว่าช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ที่ 59 - 60°C ซึ่งช่วยให้สารออกฤทธิ์สามารถสกัดออกมาได้มากขึ้น แต่หากอุณหภูมิสูงเกินไป อาจส่งผลให้สารบางชนิดเกิดการเสื่อมสลาย

เมื่อนำผลการทดลองไปวิเคราะห์โดยใช้ Model Adequacy Check พบว่าแบบจำลองที่ใช้ใน Optimization Study Plan 5 มีความแม่นยำสูง ค่า R^2 ของตัวแปรตอบสนองทั้งหมดอยู่ในช่วง 0.99 ซึ่งบ่งชี้ว่าแบบจำลองสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้อย่างดีเยี่ยม และสามารถนำไปใช้พยากรณ์ค่าการตอบสนองได้อย่างแม่นยำ โดยค่าการตอบสนองที่สกัดได้จริงเฉลี่ยของแต่ละสารสำคัญ ได้แก่ Compound D (92.470 $\mu\text{g/ml}$), DMPBD (226.316 $\mu\text{g/ml}$), Curcuminoids (67.490 $\mu\text{g/ml}$), DPPH (342.927 $\mu\text{M TE}$), ABTS (281.924 $\mu\text{M TE}$) และ FRAP (324.892 $\mu\text{M TE}$) ซึ่งอยู่ในช่วงที่สอดคล้องกับค่าพยากรณ์ที่ได้จากแบบจำลอง

นอกจากนี้ การพิจารณาผลที่ได้จาก Contour Plot และ Response Surface Plot ยังแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของปัจจัยต่าง ๆ ต่อค่าการตอบสนอง โดยพบว่า Conc. HPBCD และเวลาสกัด เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลโดยตรง และสามารถกำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสกัด ในขณะที่ความเข้มข้นของเอทานอลและอุณหภูมิในการสกัดควรได้รับการควบคุมให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม เพื่อป้องกันการเสื่อมสลายของสารสำคัญที่สกัดได้

จากผลการศึกษาทั้งหมด สามารถสรุปได้ว่า Optimization Study Plan 5 ยืนยันให้เห็นถึงประสิทธิภาพของ Shaking Extraction ว่าเป็นเทคนิคที่ยังไม่สามารถนำมาใช้แทน Ultrasonic Extraction ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยให้ผลลัพธ์ที่ต่ำกว่าทุกก่อนศึกษาก่อนหน้าเมื่อดำเนินการภายใต้สภาวะที่เหมาะสม

4.4 ผลการศึกษาวิธีการสกัดโดยใช้ Cyclodextrin และสารช่วยสกัดในน้ำ เปรียบเทียบกับการสกัดด้วยวิธีดั้งเดิม

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ Cyclodextrin-assisted Extraction (CAE) กับวิธีการสกัดแบบดั้งเดิม ได้แก่ Hot Oil Extraction (HOE) และ Organic Solvent Maceration (OSM) โดยใช้เหง้าโพล ผลลัพธ์ที่ได้รับจะช่วยให้เข้าใจถึงข้อดีและข้อจำกัดของแต่ละเทคนิค รวมถึงแนวทางการพัฒนาวิธีการสกัดที่เหมาะสมต่อการใช้งานในเชิงพาณิชย์และอุตสาหกรรมยาและเครื่องสำอาง โดยผลการศึกษาแสดงในตารางที่ 4.30



ตารางที่ 4.30 ผลการสกัดสารสำคัญจากเหง้าโพลีโดยเทคนิควิธีการสกัดโดยใช้ Cyclodextrin และสารช่วยสกัดในน้ำ เปรียบเทียบกับการสกัดด้วยวิธีดั้งเดิม

NO.	Method	Plan	Extraction techniques	X3 (mm)	X5 (min)	X6 (W)	X7 (%w/w)	X8 (%w/w)	X9 (°C)	Compound D (µg/ml)				DMPBD (µg/ml)			
										TriPLICATE			SD	TriPLICATE			SD
										1	2	3		1	2	3	
1	HPBCD+EtOH+Tween80 (UE; P1)	1	Ultrasonic extraction	20	35	186	23	11	-	301.253	303.256	297.265	300.591	740.256	735.622	733.621	736.500
2	Water (Negative control P1)		Ultrasonic extraction	-	35	186	-	-	-	256.053	256.847	257.639	256.846	131.206	131.561	132.500	131.756
3	MeOH (Positive control P1)		Ultrasonic extraction	-	35	186	-	-	-	315.602	316.015	311.166	314.261	765.267	755.249	766.287	762.268
4	HPBCD+EtOH (UE; P2)	2	Ultrasonic extraction	17	30	274	30	-	-	284.266	282.325	284.846	283.812	629.254	635.852	641.236	635.447
5	Water (Negative control P2)		Ultrasonic extraction	-	30	274	-	-	-	228.684	228.032	228.835	228.517	139.037	138.927	138.871	138.945
6	MeOH (Positive control P2)		Ultrasonic extraction	-	30	274	-	-	-	290.960	291.091	292.380	291.477	758.001	758.434	761.116	759.184
7	HPBCD+Tween80 (UE; P3)	3	Ultrasonic extraction	19	28	280	-	15	-	279.256	283.529	269.256	277.347	720.256	700.263	703.264	707.928
8	Water (Negative control P3)		Ultrasonic extraction	-	28	280	-	-	-	202.547	204.024	203.991	203.521	123.543	123.604	123.289	123.478
9	MeOH (Positive control P3)		Ultrasonic extraction	-	28	280	-	-	-	283.099	282.659	282.972	282.910	766.176	765.881	765.732	765.930
10	HPBCD (UE; P4)	4	Ultrasonic extraction	25	31	237	-	-	-	262.260	264.562	263.652	263.491	489.256	492.261	496.326	492.614
11	Water (Negative control P4)		Ultrasonic extraction	-	31	237	-	-	-	148.780	148.820	149.462	149.021	122.961	123.739	125.810	124.170
12	MeOH (Positive control P4)		Ultrasonic extraction	-	31	237	-	-	-	280.102	281.984	278.822	280.302	716.978	721.508	725.055	721.180
13	HPBCD+EtOH+Tween80 (SE; P5)	5	Shaking extraction	21	119	-	24	10	60	94.159	91.266	91.984	92.470	229.329	230.329	219.291	226.316
14	Water (Negative control P5)		Shaking extraction	-	119	-	-	-	60	30.986	29.140	29.152	29.759	60.297	55.393	55.490	57.060
15	MeOH (Positive control P5)		Shaking extraction	-	119	-	-	-	60	97.486	97.519	97.422	97.476	623.906	642.936	648.648	638.497
16	HOE	Hot Oil Extraction		-	15	-	-	-	160	229.670	228.798	229.332	229.267	729.969	716.395	713.532	719.965
17	MeOH ME	Organic Solvent Maceration		-	48 hr.	-	-	-	-	319.967	322.801	322.109	321.626	733.876	737.504	735.641	735.673
18	Hexan ME	Organic Solvent Maceration		-	48 hr.	-	-	-	-	136.200	135.950	135.256	135.802	751.567	748.405	746.589	748.854

ตารางที่ 4.30 ผลการสกัดสารสำคัญจากเหง้าโพลีเดียมเทคนิควิธีการสกัดโดยใช้ Cyclodextrin และสารช่วยสกัดในน้ำ เปรียบเทียบกับการสกัดด้วยวิธีดั้งเดิม (ต่อ)

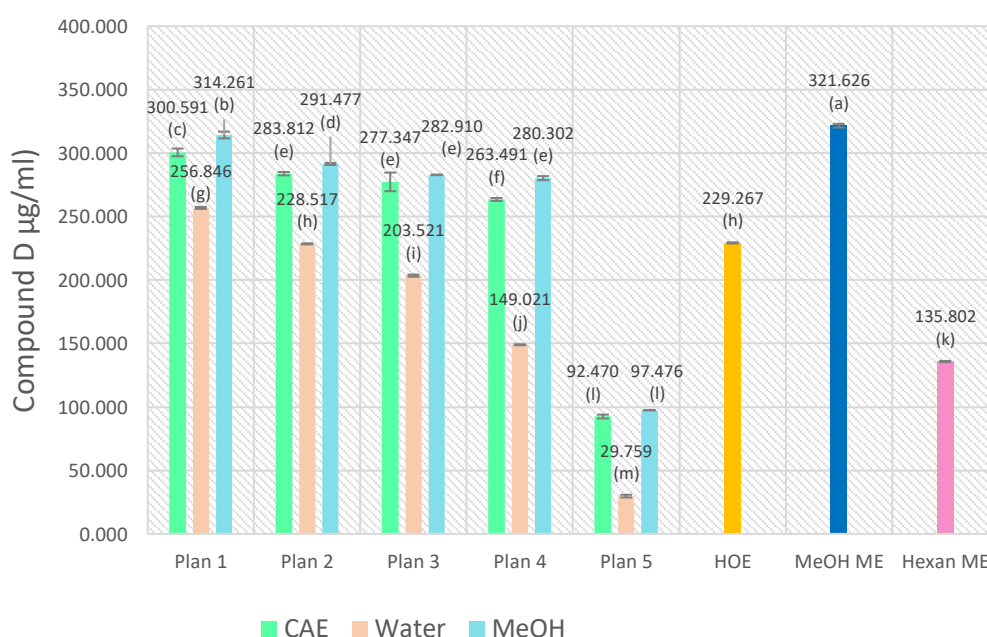
NO.	Method	Plan	Extraction techniques	X3 (mM)	X5 (min)	X6 (W)	X7 (%w/w)	X8 (%w/w)	X9 (°C)	Curcuminoid (µg/ml)			DPPH (µM Trolox equivalence)		
										TriPLICATE			TriPLICATE		
										1	2	3	mean	SD	SD
1	HPBCD+EtOH+Tween80 (UE; P1)	1	Ultrasonic extraction	20	35	186	23	11	-	189.254	190.650	192.385	190.763	1.569	830.381
2	Water (Negative control P1)		Ultrasonic extraction	-	35	186	-	-	-	ND	ND	ND	ND	ND	262.806
3	MeOH (Positive control P1)		Ultrasonic extraction	-	35	186	-	-	-	212.660	213.426	212.019	212.702	0.705	871.889
4	HPBCD+EtOH (UE; P2)	2	Ultrasonic extraction	17	30	274	30	-	-	38.251	39.256	40.256	39.254	1.003	727.806
5	Water (Negative control P2)		Ultrasonic extraction	-	30	274	-	-	-	ND	ND	ND	ND	ND	279.016
6	MeOH (Positive control P2)		Ultrasonic extraction	-	30	274	-	-	-	229.226	228.638	229.674	229.179	0.519	971.790
7	HPBCD+Tween80 (UE; P3)	3	Ultrasonic extraction	19	28	280	-	15	-	152.325	155.265	159.325	155.638	3.515	722.491
8	Water (Negative control P3)		Ultrasonic extraction	-	28	280	-	-	-	ND	ND	ND	ND	ND	207.075
9	MeOH (Positive control P3)		Ultrasonic extraction	-	28	280	-	-	-	207.765	207.311	207.301	207.459	0.265	795.560
10	HPBCD (UE; P4)	4	Ultrasonic extraction	25	31	237	-	-	-	18.269	19.114	19.591	18.991	0.669	467.924
11	Water (Negative control P4)		Ultrasonic extraction	-	31	237	-	-	-	ND	ND	ND	ND	ND	164.925
12	MeOH (Positive control P4)		Ultrasonic extraction	-	31	237	-	-	-	224.088	227.030	229.338	226.819	2.631	741.522
13	HPBCD+EtOH+Tween80 (SE; P5)	5	Shaking extraction	21	119	-	24	10	60	69.125	72.649	60.695	67.490	6.142	342.927
14	Water (Negative control P5)		Shaking extraction	-	119	-	-	-	60	ND	ND	ND	ND	ND	77.076
15	MeOH (Positive control P5)		Shaking extraction	-	119	-	-	-	60	195.415	194.381	191.377	193.725	2.097	825.363
16	HOE	Organic Solvent Maceration	Hot Oil Extraction	-	15	-	-	-	160	229.670	175.568	175.216	176.362	175.715	769.897
17	MeOH ME		Organic Solvent Maceration	-	48 hr.	-	-	-	-	319.967	202.324	202.812	209.880	205.005	863.902
18	Hexan ME		Organic Solvent Maceration	-	48 hr.	-	-	-	-	136.200	19.945	19.614	19.344	19.634	618.882

ตารางที่ 4.30 ผลการสกัดสารสำคัญจากเหง้าไพลโดยเทคนิคการสกัดโดยใช้Cyclodextrin และสารช่วยสกัดในน้ำ เปรียบเทียบกับการสกัดด้วยวิธีดั้งเดิม (ต่อ)

NO.	Method	Plan	Extraction techniques	X3 (mM)	X5 (min)	X6 (W)	X7 (%w/w)	X8 (%w/w)	X9 (°C)	ABTS (µM Trolox equivalence)				FRAP (µM Trolox equivalence)						
										TriPLICATE			SD	mean	SD	TriPLICATE			mean	SD
										1	2	3				1	2	3		
1	HPBCD+EtOH+Tween80 (UE; P1)	1	Ultrasonic extraction	20	35	186	23	11	-	885.235	872.328	865.342	10.092	1423.256	1446.359	1412.369	17.357			
2	Water (Negative control P1)		Ultrasonic extraction	-	35	186	-	-	-	280.167	276.082	273.871	3.194	450.445	457.756	446.999	5.493			
3	MeOH (Positive control P1)		Ultrasonic extraction	-	35	186	-	-	-	929.485	915.933	908.597	10.597	1494.400	1518.657	1482.968	18.225			
4	HPBCD+EtOH (UE; P2)	2	Ultrasonic extraction	17	30	274	30	-	-	864.256	908.263	900.251	23.439	994.593	1012.263	1120.746	68.307			
5	Water (Negative control P2)		Ultrasonic extraction	-	30	274	-	-	-	331.327	348.198	345.126	8.986	381.294	388.068	429.657	26.187			
6	MeOH (Positive control P2)		Ultrasonic extraction	-	30	274	-	-	-	1153.983	1212.743	1202.045	31.297	1328.014	1351.607	1356.607	15.271			
7	HPBCD+Tween80 (UE; P3)	3	Ultrasonic extraction	19	28	280	-	15	-	835.329	836.267	874.264	22.213	1230.241	1199.261	1212.336	15.553			
8	Water (Negative control P3)		Ultrasonic extraction	-	28	280	-	-	-	239.415	239.684	250.575	6.367	352.602	343.723	347.470	4.458			
9	MeOH (Positive control P3)		Ultrasonic extraction	-	28	280	-	-	-	919.809	920.842	962.682	24.460	1354.660	1320.547	1334.945	17.126			
10	HPBCD (UE; P4)	4	Ultrasonic extraction	25	31	237	-	-	-	240.365	244.359	246.226	2.994	482.325	468.262	479.621	7.462			
11	Water (Negative control P4)		Ultrasonic extraction	-	31	237	-	-	-	84.719	86.127	86.785	1.055	170.000	165.044	169.047	2.630			
12	MeOH (Positive control P4)		Ultrasonic extraction	-	31	237	-	-	-	380.908	387.237	390.196	4.745	764.344	742.058	760.059	11.825			
13	HPBCD+EtOH+Tween80 (SE; P5)	5	Shaking extraction	21	119	-	24	10	60	269.290	298.191	278.291	14.789	330.294	315.191	329.191	8.419			
14	Water (Negative control P5)		Shaking extraction	-	119	-	-	-	-	60	60.526	67.022	62.549	3.324	74.237	70.842	73.989	1.892		
15	MeOH (Positive control P5)		Shaking extraction	-	119	-	-	-	-	60	648.133	717.693	669.797	35.595	794.959	758.609	792.304	20.264		
16	HOE	Hot Oil Extraction	-	15	-	-	-	-	160	229.670	811.043	799.218	801.026	9.246	1303.972	1325.139	1293.998	1307.703		
17	MeOH ME	Organic Solvent Maceration	-	48 hr.	-	-	-	-	-	319.967	910.072	896.803	898.832	10.375	1463.189	1486.940	1451.996	1467.375		
18	Hexan ME	Organic Solvent Maceration	-	48 hr.	-	-	-	-	-	136.200	651.958	642.452	637.307	7.433	1048.199	1065.214	1040.181	1051.198		

4.4.1 การศึกษาวิธีการสกัดสารสำคัญจากเหง้าไพลโดยวัดที่ปริมาณ Compound D วิธีการสกัดใช้ไซโคลเด็กซ์ทรินร่วมกับสารช่วยเทียบกับวิธีการสกัดแบบดั้งเดิม

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินประสิทธิภาพของวิธีการสกัด Compound D จากเหง้าไพล โดยเปรียบเทียบเทคนิค Cyclodextrin-assisted Extraction (CAE) กับวิธีการสกัดแบบดั้งเดิม ได้แก่ การหมักด้วยเมทานอล (MeOH), เฮกเซน (Hexane), การทอดในน้ำมันมะพร้าวร้อน (Hot Oil Extraction: HOE) และการใช้เพียงน้ำเปล่าเป็นตัวทำละลาย พร้อมทั้งวิเคราะห์ผลของการเติมสารช่วย (Excipient) และการปรับเปลี่ยนเทคนิคการสกัดต่อค่าการสกัด Compound D โดยใช้การวิเคราะห์ทางสถิติด้วย Tukey's HSD Test ($p < 0.05$) เพื่อวัดระดับนัยสำคัญทางสถิติของผลลัพธ์แสดงในภาพที่ 4.87 เพื่อให้เห็นความแตกต่างของปริมาณ Compound D ที่ได้จากแต่ละวิธีการสกัด



ภาพที่ 4.86 การเปรียบเทียบปริมาณ Compound D ที่ได้จากการสกัดที่ต่างกัน

หมายเหตุ: กราฟแสดงปริมาณ Compound D (Y1) (Mean, $n=3$) ที่ได้จากการสกัดเหง้าไพลโดยใช้ Cyclodextrin-assisted Extraction (CAE), Hot Oil Extraction (HOE), และ Organic Solvent Maceration (ME) โดย CAE ใช้ไซโคลเด็กซ์ทรินร่วมกับเอทานอลและ/หรือ Tween 80 ภายใต้ Ultrasonic Extraction (UE) หรือ Shaking Extraction (SE) ขณะที่ HOE ใช้ น้ำมันมะพร้าวร้อน (160°C) และ ME ใช้ Methanol หรือ Hexane หมัก 48 ชั่วโมง ตัวอักษรบนแท่งกราฟแสดง ผล Tukey's HSD Test ($p < 0.05$) โดยตัวอักษรด้านบนแท่งกราฟแสดงกลุ่มที่มีความแตกต่างกันทางสถิติจากการวิเคราะห์ด้วย Tukey's HSD Test ($p < 0.05$) โดย แท่งกราฟที่มีตัวอักษรเดียวกัน หมายถึง “ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทาง

สถิติ” และเรียงลำดับตัวอักษรจาก a (มีค่าปริมาณสูงที่สุด) ไปจนถึง m (มีค่าปริมาณต่ำที่สุด) เพื่อแสดงลำดับปริมาณ Compound D ที่ได้จากแต่ละสภาวะการสกัด

ผลของการเติมสารช่วยในกระบวนการสกัด

การเปรียบเทียบระหว่างการใช้ไซโคลเด็กซ์ทรินร่วมกับสารช่วยทั้ง Ethanol และ Tween 80 (CAE Plan 1) กับการใช้ไซโคลเด็กซ์ทรินเพียงอย่างเดียวโดยไม่มีสารช่วย (CAE Plan 4) แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของประสิทธิภาพการสกัดอย่างชัดเจน โดย CAE Plan 1 ให้ค่าปริมาณ Compound D สูงกว่ามาก (300.591 $\mu\text{g/ml}$ เทียบกับ 263.491 $\mu\text{g/ml}$) และความแตกต่างดังกล่าวอยู่ในระดับที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่า การเติมสารช่วยทั้งสองชนิดสามารถเสริมฤทธิ์กันในการเพิ่มความสามารถในการละลายและการสร้าง Inclusion Complex ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้การสกัดสารสำคัญมีประสิทธิภาพสูงขึ้น

การเติมสารช่วยเพียงชนิดเดียว

เมื่อเปรียบเทียบแผนการสกัดที่เติมสารช่วยเพียงชนิดเดียว ได้แก่ CAE Plan 2 (เติม Ethanol เท่านั้น) และ CAE Plan 3 (เติม Tween 80 เท่านั้น) พบว่าทั้งสองแผนให้ค่าการสกัด Compound D ที่ใกล้เคียงกัน (283.812 $\mu\text{g/ml}$ และ 277.347 $\mu\text{g/ml}$ ตามลำดับ) โดยไม่มีความแตกต่างทางสถิติระหว่างกัน แต่อย่างไรก็ตาม ทั้งสองแผนให้ค่าการสกัดที่สูงกว่า CAE Plan 4 ซึ่งไม่มีการเติมสารช่วยอย่างชัดเจน แสดงให้เห็นว่า Ethanol และ Tween 80 ต่างก็มีบทบาทสำคัญในการเพิ่มการละลายของสารออกฤทธิ์ในระบบ CAE ได้อย่างมีประสิทธิภาพ แม้จะไม่สามารถเพิ่มค่าการสกัดได้เท่ากับการใช้ร่วมกันทั้งสองชนิดก็ตาม

ประสิทธิภาพของ Cyclodextrin เมื่อเทียบกับเมทานอลและน้ำเปล่า

การประเมินประสิทธิภาพของไซโคลเด็กซ์ทรินโดยเปรียบเทียบกับตัวควบคุมมาตรฐาน ได้แก่ เมทานอล และน้ำเปล่า พบว่า ในแต่ละแผนการสกัดที่ใช้ CAE นั้น ให้ค่าการสกัด Compound D ที่ต่ำกว่าเมทานอลเพียงเล็กน้อย เช่น CAE Plan 1 เทียบกับ MeOH ใน Plan 1 (300.591 $\mu\text{g/ml}$ เทียบกับ 314.261 $\mu\text{g/ml}$) โดยความแตกต่างระหว่างกลุ่มดังกล่าวไม่แสดงนัยสำคัญทางสถิติในบางแผนงาน ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่า CAE มีประสิทธิภาพในการสกัดที่สามารถทดแทนเมทานอลได้ในระดับที่ใกล้เคียง ขณะเดียวกัน เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำเปล่าในทุกแผนงาน พบว่า CAE ให้ค่าการสกัดที่สูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในทุกกรณี แสดงถึงศักยภาพของไซโคลเด็กซ์ทรินในการส่งเสริมการสกัดสารออกฤทธิ์จากโครงสร้างพืชได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ผลของการเปลี่ยนเทคนิคการสกัด

การศึกษายังได้เปรียบเทียบระหว่างเทคนิคการสกัดแบบ Ultrasonic Extraction (UE) ซึ่งใช้ใน CAE Plan 1 กับเทคนิค Shaking Extraction (SE) ที่ใช้ใน CAE Plan 5 โดยใช้ตัวทำละลายและองค์ประกอบเดียวกัน พบว่าการเปลี่ยนแปลงเทคนิคการสกัดจาก UE ไปเป็น SE ส่งผลให้ค่าการสกัด Compound D ลดลงอย่างมีนัยสำคัญจาก 300.591 $\mu\text{g/ml}$ เหลือเพียง 92.470 $\mu\text{g/ml}$ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าเทคนิค UE มีประสิทธิภาพเหนือกว่าอย่างชัดเจน เนื่องจากคลื่นเสียงที่ใช้ใน UE สามารถเร่งกระบวนการปลดปล่อยสารออกฤทธิ์จากเนื้อเยื่อพืช และเพิ่มการแพร่กระจายของสารเข้าสู่ตัวทำละลายได้อย่างรวดเร็วและทั่วถึงมากขึ้น

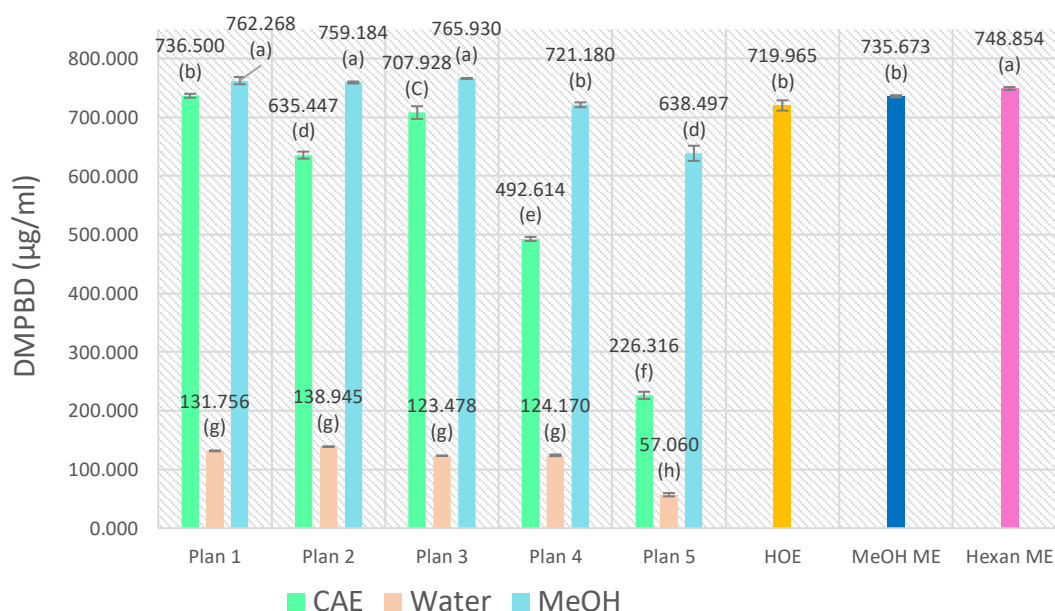
การเปรียบเทียบกับวิธีการสกัดแบบดั้งเดิม

- การหมักด้วยเมทานอล (MeOH ME) ให้ค่าปริมาณ Compound D สูงที่สุด (321.626 $\mu\text{g/ml}$) ซึ่งแตกต่างจากทุกกลุ่มอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และถือเป็นมาตรฐานที่ใช้ในการเปรียบเทียบ
- CAE Plan 1 ซึ่งเป็นการสกัดด้วยไซโคลเด็กซ์ทรินร่วมกับสารช่วยสองชนิดให้ค่าปริมาณ Compound D ที่ใกล้เคียงกับเมทานอล (300.591 $\mu\text{g/ml}$) โดยไม่แสดงความแตกต่างทางสถิติในระดับที่มีนัยสำคัญ
- การสกัดด้วยน้ำมันร้อน (HOE) ให้ค่าการสกัดที่ต่ำกว่าทั้ง MeOH และ CAE Plan 1 อย่างชัดเจน (229.267 $\mu\text{g/ml}$)
- การหมักด้วยเฮกเซน (Hexane ME) ให้ค่าการสกัดต่ำที่สุด (135.802 $\mu\text{g/ml}$) และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญจากทุกกลุ่ม แสดงให้เห็นถึงข้อจำกัดของเฮกเซนในการละลายสารออกฤทธิ์ประเภทนี้

จากผลการทดลองทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่า การใช้ Cyclodextrin ร่วมกับสารช่วย Ethanol และ Tween 80 ภายใต้เทคนิค Ultrasonic Extraction มีศักยภาพสูงในการเพิ่มประสิทธิภาพของการสกัด Compound D จากเหง้าไพล โดยสามารถให้ผลการสกัดที่ใกล้เคียงกับเมทานอล ซึ่งเป็นตัวทำละลายมาตรฐาน ทั้งนี้ การใช้ไซโคลเด็กซ์ทรินร่วมกับ Excipient ยังแสดงความปลอดภัยต่อผู้บริโภคและสอดคล้องกับแนวทางการพัฒนาเทคโนโลยีสกัดแบบเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Green Extraction) ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมเวชสำอางและสมุนไพรได้อย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพในอนาคต

4.4.2 การศึกษาวิธีการสกัดสารสำคัญจากเหง้าโพลโดยวัดที่ปริมาณ DMPBD วิธีการสกัดใช้ไซโคลเด็กซ์ทรินร่วมกับสารช่วยเทียบกับวิธีการสกัดแบบดั้งเดิม

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคนิคการสกัด DMPBD จากเหง้าโพล โดยเน้นการเปรียบเทียบระหว่าง Cyclodextrin-assisted Extraction (CAE) กับวิธีการสกัดแบบดั้งเดิม ได้แก่ การทอดในน้ำมันมะพร้าวร้อน (Hot Oil Extraction: HOE) การหมักด้วยเมทานอล (MeOH ME) และการหมักด้วยเฮกเซน (Hexane ME) พร้อมทั้งประเมินผลของการเติมสารช่วย (Excipient) และเทคนิคการสกัดที่แตกต่างกันต่อการสกัดสารสำคัญ DMPBD โดยใช้การวิเคราะห์ทางสถิติด้วย Tukey's HSD Test ($p < 0.05$) เพื่อระบุความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญแสดงในภาพที่ 4.88 เพื่อให้เห็นความแตกต่างของปริมาณ DMPBD ที่ได้จากแต่ละวิธีการสกัด



ภาพที่ 4.87 การเปรียบเทียบปริมาณ DMPBD ที่ได้จากวิธีการสกัดที่แตกต่างกัน

หมายเหตุ กราฟแสดงปริมาณ DMPBD (Y2) (Mean, n=3) ที่ได้จากการสกัดเหง้าโพลโดยใช้ Cyclodextrin-assisted Extraction (CAE), Hot Oil Extraction (HOE), และ Organic Solvent Maceration (ME) โดย CAE ใช้ไซโคลเด็กซ์ทรินร่วมกับเอทานอลและ/หรือ Tween 80 ภายใต้ Ultrasonic Extraction (UE) หรือ Shaking Extraction (SE) ขณะที่ HOE ใช้ น้ำมันมะพร้าวร้อน (160°C) และ ME ใช้ Methanol หรือ Hexane หมัก 48 ชั่วโมง ตัวอักษรบนแท่งกราฟแสดง ผล Tukey's HSD Test ($p < 0.05$) โดยตัวอักษรด้านบนแท่งกราฟแสดงกลุ่มที่มีความแตกต่างกันทางสถิติจากการวิเคราะห์ด้วย Tukey's HSD Test ($p < 0.05$) โดย แท่งกราฟที่มีตัวอักษรเดียวกัน หมายถึง “ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ” และเรียงลำดับตัวอักษรจาก a (มีค่าปริมาณสูงที่สุด) ไปจนถึง h (มีค่าปริมาณต่ำที่สุด) เพื่อแสดงลำดับปริมาณ DMPBD ที่ได้จากแต่ละสภาวะการสกัด

ผลของการเติมสารช่วยในกระบวนการสกัด

การเติมสารช่วย เช่น เอทานอลและ Tween 80 ในกระบวนการ Cyclodextrin-assisted Extraction (CAE Plan 1) ส่งผลให้ค่าการสกัด DMPBD เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยให้ค่าปริมาณ DMPBD ที่ 736.500 µg/ml เมื่อเทียบกับการไม่เติมสารช่วยเลย (CAE Plan 4) ซึ่งให้ค่าเพียง 492.614 µg/ml ความแตกต่างนี้แสดงให้เห็นว่าการเติมสารช่วยสามารถเพิ่มความสามารถในการสร้าง Inclusion Complex และเพิ่มการละลายของสารออกฤทธิ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้ร่วมกันภายใต้เทคนิคการสกัดด้วยคลื่นเสียง (Ultrasonic Extraction)

ผลของการเติมสารช่วยเพียงชนิดเดียว

เมื่อพิจารณาการเติมสารช่วยเพียงชนิดเดียว ได้แก่ การเติมเอทานอลเพียงอย่างเดียว (CAE Plan 2) และการเติม Tween 80 เพียงอย่างเดียว (CAE Plan 3) พบว่าทั้งสองให้ค่าการสกัด DMPBD ที่สูงกว่าแผนที่ไม่เติมสารช่วย (CAE Plan 4) อย่างชัดเจน โดย Plan 2 ให้ค่าปริมาณ DMPBD ที่ 635.447 µg/ml และ Plan 3 อยู่ที่ 707.928 µg/ml แม้ทั้งสองกลุ่มจะให้ผลที่สูง แต่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกันโดยตรง ($p > 0.05$) อย่างไรก็ตาม การใช้สารช่วยทั้งสองร่วมกัน (Plan 1) ยังให้ผลดีที่สุด ซึ่งให้เห็นถึงผลเสริมฤทธิ์ของ Excipient ในการสนับสนุนการกักเก็บและการปลดปล่อยสารออกฤทธิ์

ประสิทธิภาพของ Cyclodextrin เทียบกับเมทานอลและน้ำเปล่า

จากการเปรียบเทียบระหว่าง Cyclodextrin-assisted Extraction (CAE) กับตัวทำละลายมาตรฐานอย่างเมทานอลและน้ำเปล่า พบว่า CAE ให้ค่าการสกัด DMPBD สูงกว่าน้ำเปล่าในทุกแผนการทดลองอย่างมีนัยสำคัญ โดยในแต่ละ Plan ค่าเฉลี่ยของการใช้ CAE อยู่ในช่วง 492–736 µg/ml ขณะที่น้ำเปล่าให้ค่าต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญ เช่น Plan 5 ที่ใช้น้ำเปล่าให้ค่าเพียง 57.060 µg/ml เท่านั้น

ในด้านการเปรียบเทียบกับเมทานอล พบว่า MeOH ให้ค่าการสกัด DMPBD สูงสุดใน Plan 2 (762.268 µg/ml) และ Plan 3 (765.930 µg/ml) ซึ่งไม่แตกต่างจากค่าที่ได้จาก CAE Plan 1 อย่างมีนัยสำคัญ (736.500 µg/ml) แสดงให้เห็นว่า CAE ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมสามารถให้ผลการสกัดที่ใกล้เคียงกับการใช้เมทานอล และอาจเป็นทางเลือกที่ปลอดภัยและยั่งยืนมากกว่าในอุตสาหกรรม

ผลของการเปลี่ยนเทคนิคการสกัด

เทคนิคการสกัดมีผลต่อค่าการสกัด DMPBD อย่างมีนัยสำคัญ โดยเมื่อเปรียบเทียบระหว่าง Ultrasonic Extraction (ใช้ใน CAE Plan 1) กับ Shaking Extraction (ใช้ใน CAE Plan 5) ซึ่งมี

องค์ประกอบของตัวทำละลายเหมือนกัน พบว่า Plan 1 ให้ค่าการสกัดสูงถึง 736.500 $\mu\text{g/ml}$ ขณะที่ Plan 5 ให้ค่าเพียง 226.316 $\mu\text{g/ml}$ แสดงให้เห็นว่า Ultrasonic Extraction สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดได้ดีกว่าอย่างมีนัยสำคัญ อาจเนื่องจากพลังงานจากคลื่นเสียงสามารถแทรกซึมเนื้อเยื่อพืชได้ลึกและกระตุ้นการปลดปล่อยสารสำคัญออกมาได้มากขึ้นในเวลาที่สั้นลง

การเปรียบเทียบกับวิธีการสกัดแบบดั้งเดิม

- การหมักด้วยเมทานอล (MeOH ME) ให้ค่าการสกัด DMPBD อยู่ในระดับสูง (735.673 $\mu\text{g/ml}$) โดยไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญจาก CAE Plan 1
- การหมักด้วยเฮกเซน (Hexane ME) ให้ค่าการสกัดสูงที่สุดในกลุ่มที่ใช้วิธีดั้งเดิม (748.854 $\mu\text{g/ml}$) ซึ่งแม้จะสูงกว่า MeOH ME เล็กน้อย แต่ไม่แตกต่างทางสถิติจาก CAE Plan 1 และ MeOH ME
- วิธีการทอดในน้ำมันร้อน (HOE) ให้ค่าปริมาณ DMPBD อยู่ที่ 719.965 $\mu\text{g/ml}$ ซึ่งสูงกว่า CAE Plan 4 และ Plan 5 อย่างมีนัยสำคัญ แต่ยังต่ำกว่า CAE Plan 1 และเมทานอล

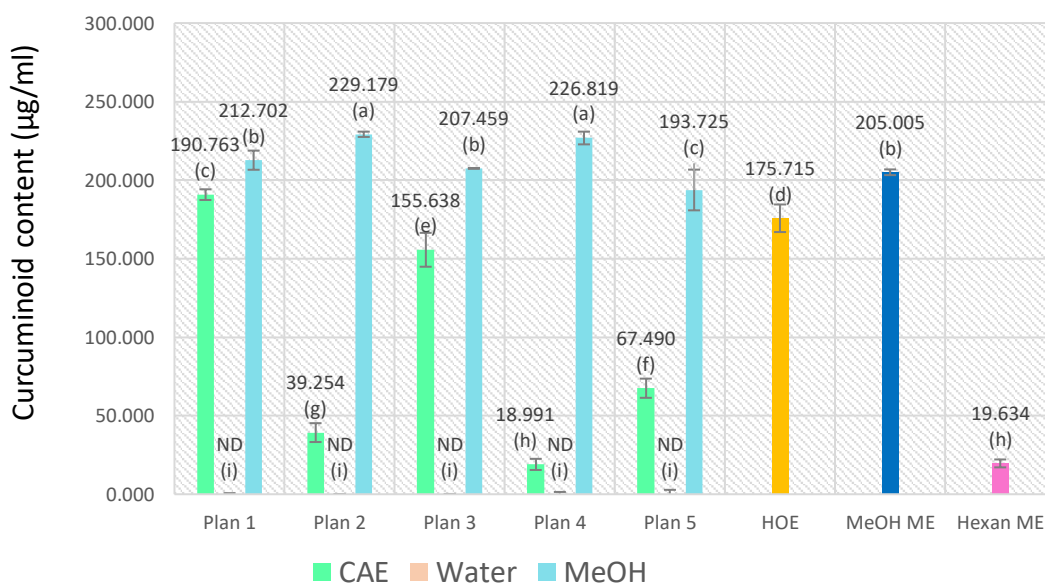
ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า การใช้ Cyclodextrin-assisted Extraction (CAE) โดยเฉพาะในสถานะที่เติมสารช่วย ทั้ง Ethanol และ Tween 80 ภายใต้เทคนิค Ultrasonic Extraction มีศักยภาพสูงในการเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดสาร DMPBD จากเหง้าโพลในระดับที่สามารถเปรียบเทียบได้กับเมทานอล ซึ่งเป็นตัวทำละลายมาตรฐาน นอกจากนี้ การใช้ CAE ยังมีข้อได้เปรียบในด้านความปลอดภัย การเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และความเหมาะสมต่อการประยุกต์ในอุตสาหกรรมเวชสำอางและผลิตภัณฑ์จากสมุนไพรในระดับเชิงพาณิชย์

พูน ปณ จิต ชีเว

4.4.3 การศึกษาวิธีการสกัดสารสำคัญจากเหง้าโพลโดยวัดที่ปริมาณ Curcuminoid

content วิธีการสกัดใช้ไซโคลเด็กซ์ทรินร่วมกับสารช่วยเทียบกับวิธีการสกัดแบบดั้งเดิม

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินประสิทธิภาพของวิธีการสกัด Curcuminoid จากเหง้าโพล โดยเปรียบเทียบระหว่าง Cyclodextrin-assisted Extraction (CAE) และวิธีการสกัดแบบดั้งเดิม ได้แก่ การทอดในน้ำมันมะพร้าวร้อน (Hot Oil Extraction: HOE) การหมักด้วยเมทานอล (MeOH ME) และการหมักด้วยเฮกเซน (Hexane ME) พร้อมทั้งวิเคราะห์ผลของการเติมสารช่วย (Excipient) และผลของการเปลี่ยนเทคนิคการสกัดต่อการสกัดสารออกฤทธิ์ โดยใช้การวิเคราะห์ทางสถิติด้วย Tukey's HSD Test ($p < 0.05$) เพื่อระบุความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติแสดงในภาพที่ 4.89 เพื่อให้เห็นความแตกต่างของปริมาณ Curcuminoid Content ที่ได้จากแต่ละวิธีการสกัดอย่างชัดเจน



ภาพที่ 4.88 การเปรียบเทียบปริมาณ Curcuminoid content ที่ได้จากวิธีการสกัดที่ต่างกัน

หมายเหตุ กราฟแสดงปริมาณ Curcuminoid content (Y3) (Mean, n=3) ที่ได้จากการสกัดเหง้าโพลโดยใช้ Cyclodextrin-assisted Extraction (CAE), Hot Oil Extraction (HOE), และ Organic Solvent Maceration (ME) โดย CAE ใช้ไซโคลเด็กซ์ทรินร่วมกับเอทานอลและ/หรือ Tween 80 ภายใต้ Ultrasonic Extraction (UE) หรือ Shaking Extraction (SE) ขณะที่ HOE ใช้ น้ำมันมะพร้าวร้อน (160°C) และ ME ใช้ Methanol หรือ Hexane หมัก 48 ชั่วโมง ตัวอักษรบนแท่งกราฟแสดง ผล Tukey's HSD Test ($p < 0.05$) โดยตัวอักษรด้านบนแท่งกราฟแสดงกลุ่มที่มีความแตกต่างกันทางสถิติจากการวิเคราะห์ด้วย Tukey's HSD Test ($p < 0.05$) โดย แท่งกราฟที่มีตัวอักษรเดียวกัน หมายถึง “ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ” และเรียงลำดับตัวอักษรจาก a (มีค่าปริมาณสูงที่สุด) ไปจนถึง i (มีค่าปริมาณต่ำที่สุด) เพื่อแสดงลำดับปริมาณ Curcuminoid content ที่ได้จากแต่ละสภาวะการสกัด และค่า ND คือ non detection

ผลของการเติมสารช่วยในกระบวนการสกัด

จากการเปรียบเทียบระหว่าง CAE Plan 1 ซึ่งเติมสารช่วยทั้ง Ethanol และ Tween 80 กับ CAE Plan 4 ซึ่งไม่เติมสารช่วย พบว่า CAE Plan 1 ให้ค่าปริมาณ Curcuminoid สูงถึง $212.702 \pm 0.927 \mu\text{g/ml}$ ขณะที่ Plan 4 ให้ค่าเพียง $18.991 \pm 0.175 \mu\text{g/ml}$ ความแตกต่างที่ชัดเจนนี้อยู่ในระดับที่มีนัยสำคัญทางสถิติ แสดงให้เห็นว่าการใช้สารช่วยร่วมกับ Cyclodextrin ภายใต้เทคนิค Ultrasonic Extraction สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการสกัด Curcuminoid ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้สารช่วยหลายชนิดร่วมกันส่งเสริมการละลายและการกักเก็บสารสำคัญในโครงสร้าง Inclusion Complex

ผลของการเติมสารช่วยเพียงชนิดเดียว

ในกรณีของการเติมสารช่วย เพียงชนิดเดียว ได้แก่ CAE Plan 2 (Ethanol) และ CAE Plan 3 (Tween 80) พบว่าค่าปริมาณ Curcuminoid ที่ได้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดย Plan 2 ให้ค่า $39.254 \pm 0.594 \mu\text{g/ml}$ และ Plan 3 ให้ค่า $18.991 \pm 0.391 \mu\text{g/ml}$ ซึ่งสูงกว่า CAE Plan 4 (ไม่มี Excipient) อย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้ Plan 2 มีประสิทธิภาพสูงกว่า Plan 3 อย่างชัดเจน แสดงให้เห็นว่า Ethanol มีบทบาทเด่นกว่าการใช้ Tween 80 เพียงอย่างเดียวในการส่งเสริมการสกัด Curcuminoid

ประสิทธิภาพของ Cyclodextrin เทียบกับเมทานอลและน้ำเปล่า

ผลการศึกษาพบว่า ทุกแผนที่ใช้ CAE ให้ค่าการสกัดสูงกว่าน้ำเปล่า (Water) อย่างมีนัยสำคัญ โดยในกราฟพบว่าน้ำเปล่าในทุกแผน (Plan 1–5) ไม่สามารถตรวจวัด Curcuminoid ได้ (ND) ในขณะที่ CAE Plan 1 ให้ค่า $212.702 \pm 0.927 \mu\text{g/ml}$ แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของ Cyclodextrin ในการช่วยให้สามารถละลายและสกัดสาร Curcuminoid ออกมาได้ดีกว่าการใช้ น้ำเปล่าเพียงอย่างเดียวอย่างชัดเจน

เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการหมักด้วยเมทานอล (MeOH ME) ซึ่งให้ค่าปริมาณ Curcuminoid ที่ $205.005 \pm 0.583 \mu\text{g/ml}$ พบว่าไม่แตกต่างจาก CAE Plan 1 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แสดงให้เห็นว่า CAE ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมสามารถทดแทนเมทานอลได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ผลของการเปลี่ยนเทคนิคการสกัด

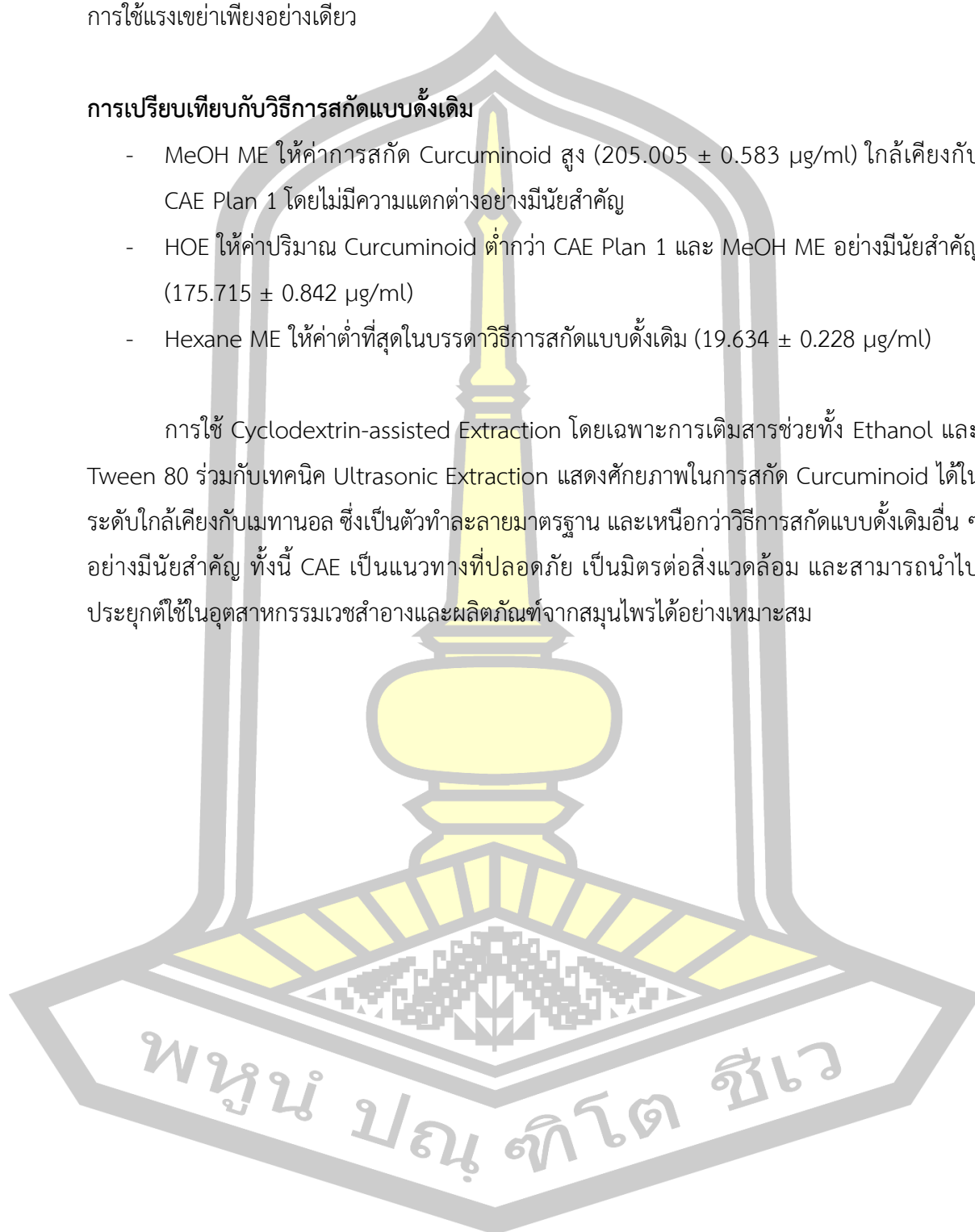
การเปรียบเทียบระหว่าง CAE Plan 1 ซึ่งใช้ Ultrasonic Extraction (UE) กับ CAE Plan 5 ซึ่งใช้ Shaking Extraction (SE) โดยมีองค์ประกอบของตัวทำละลายและสารช่วยเหมือนกัน พบว่าค่าการสกัดใน Plan 1 ($212.702 \mu\text{g/ml}$) สูงกว่า Plan 5 ($67.490 \pm 0.674 \mu\text{g/ml}$) อย่างมีนัยสำคัญ

ทางสถิติ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้พลังงานจากคลื่นเสียงสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดได้ดีกว่าการใช้แรงเขย่าเพียงอย่างเดียว

การเปรียบเทียบกับวิธีการสกัดแบบดั้งเดิม

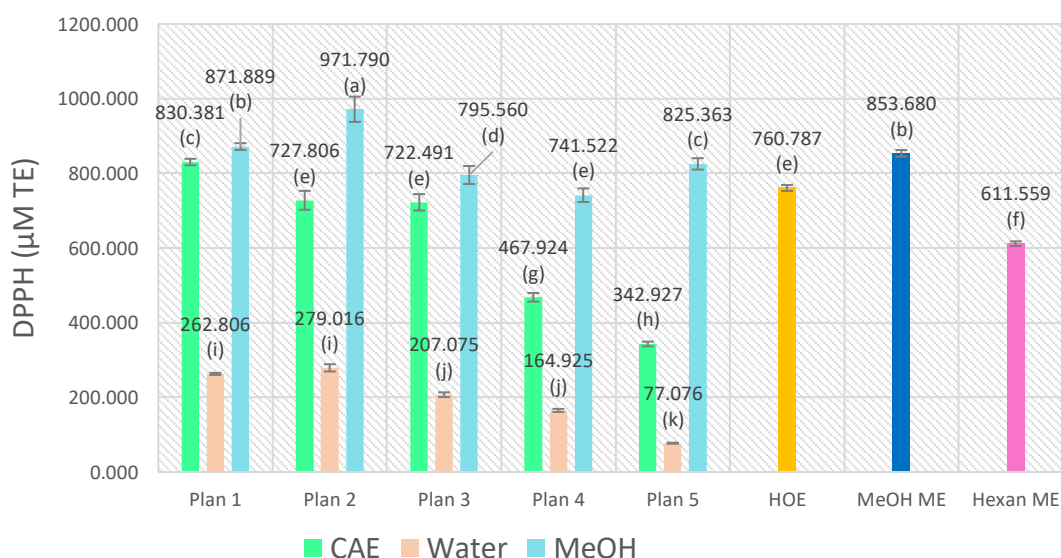
- MeOH ME ให้ค่าการสกัด Curcuminoid สูง ($205.005 \pm 0.583 \mu\text{g/ml}$) ใกล้เคียงกับ CAE Plan 1 โดยไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ
- HOE ให้ค่าปริมาณ Curcuminoid ต่ำกว่า CAE Plan 1 และ MeOH ME อย่างมีนัยสำคัญ ($175.715 \pm 0.842 \mu\text{g/ml}$)
- Hexane ME ให้ค่าต่ำที่สุดในบรรดาวิธีการสกัดแบบดั้งเดิม ($19.634 \pm 0.228 \mu\text{g/ml}$)

การใช้ Cyclodextrin-assisted Extraction โดยเฉพาะการเติมสารช่วยทั้ง Ethanol และ Tween 80 ร่วมกับเทคนิค Ultrasonic Extraction แสดงศักยภาพในการสกัด Curcuminoid ได้ในระดับใกล้เคียงกับเมทานอล ซึ่งเป็นตัวทำละลายมาตรฐาน และเหนือกว่าวิธีการสกัดแบบดั้งเดิมอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้ CAE เป็นแนวทางที่ปลอดภัย เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมเวชสำอางและผลิตภัณฑ์จากสมุนไพรได้อย่างเหมาะสม



4.4.4 การศึกษาวิธีการสกัดโดยใช้ไซโคลเด็กซ์ทรีนและสารช่วยเพื่อทำการสกัดสารสำคัญจากเหง้าโพลโดยวัดฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH เทียบกับวิธีการสกัดแบบดั้งเดิม

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินศักยภาพในการต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดจากเหง้าโพลภายใต้เงื่อนไขการสกัดที่หลากหลาย โดยใช้การทดสอบ DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl) ซึ่งเป็นวิธีมาตรฐานที่ได้รับการยอมรับในระดับสากลสำหรับการวัดฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระเชิงปริมาณ ค่าที่ได้แสดงเป็นหน่วย $\mu\text{M TE}$ (Trolox Equivalent) และใช้การวิเคราะห์ทางสถิติด้วย Tukey's HSD Test ($p < 0.05$) เพื่อประเมินความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างสภาวะการสกัดแต่ละกลุ่มแสดงในภาพที่ 4.90 เพื่อให้เห็นความแตกต่างของฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระที่ได้จากแต่ละวิธีการสกัด



ภาพที่ 4.89 การเปรียบเทียบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระทดสอบด้วยวิธี DPPH ที่ได้จากการสกัดที่ต่างกัน

หมายเหตุ กราฟแสดงฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH assay (Y4) (Mean, $n=3$) ที่ได้จากการสกัดเหง้าโพลโดยใช้ Cyclodextrin-assisted Extraction (CAE), Hot Oil Extraction (HOE), และ Organic Solvent Maceration (ME) โดย CAE ใช้ไซโคลเด็กซ์ทรีนร่วมกับเอทานอลและ/หรือ Tween 80 ภายใต้ Ultrasonic Extraction (UE) หรือ Shaking Extraction (SE) ขณะที่ HOE ใช้น้ำมันมะพร้าวร้อน (160°C) และ ME ใช้ Methanol หรือ Hexane หมัก 48 ชั่วโมง ตัวอักษรบนแท่งกราฟแสดง ผล Tukey's HSD Test ($p < 0.05$) โดยตัวอักษรด้านบนแท่งกราฟแสดงกลุ่มที่มีความแตกต่างกันทางสถิติจากการวิเคราะห์ด้วย Tukey's HSD Test ($p < 0.05$) โดย แท่งกราฟที่มีตัวอักษรเดียวกัน หมายถึง “ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ” และเรียงลำดับตัวอักษรจาก a (มีค่าปริมาณสูงที่สุด) ไปจนถึง k (มีค่าปริมาณต่ำที่สุด) เพื่อแสดงลำดับฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH assay ที่ได้จากแต่ละสภาวะการสกัด

ผลของการเติมสารช่วย (Excipient) ต่อฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ

เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง CAE Plan 1 ซึ่งเติมทั้ง Ethanol และ Tween 80 กับ CAE Plan 4 ซึ่งไม่มีการเติมสารช่วย พบว่า Plan 1 ให้ค่าฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูงถึง $830.381 \pm 3.442 \mu\text{M TE}$ ขณะที่ Plan 4 ให้ค่าต่ำกว่ามากที่ $467.924 \pm 2.317 \mu\text{M TE}$ โดยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้สารช่วยร่วมกับ Cyclodextrin ภายใต้เทคนิค Ultrasonic Extraction มีบทบาทสำคัญในการส่งเสริมการละลายและการปกป้องสารออกฤทธิ์ ทำให้คงประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระได้ดีขึ้น

ผลของการเติม Excipient เพียงชนิดเดียว

การใช้ Excipient เพียงชนิดเดียว ได้แก่ Plan 2 (Ethanol) และ Plan 3 (Tween 80) พบว่าทั้งสองแผนให้ค่าการต้านอนุมูลอิสระสูงกว่า Plan 4 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดย Plan 2 ให้ค่า $727.806 \pm 2.968 \mu\text{M TE}$ และ Plan 3 ให้ค่า $722.491 \pm 3.013 \mu\text{M TE}$ ขณะที่ Plan 4 ให้ค่าเพียง $467.924 \mu\text{M TE}$ เท่านั้น แสดงให้เห็นว่าแม้การใช้ Excipient เพียงชนิดเดียวจะยังไม่สามารถเทียบเท่าการใช้ร่วมกันได้ แต่ก็มีส่วนช่วยอย่างมีนัยสำคัญในการเพิ่มฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัด

ประสิทธิภาพของ Cyclodextrin-assisted Extraction เทียบกับเมทานอลและน้ำเปล่า

สารสกัดที่ได้จากทุกแผนภายใต้ Cyclodextrin-assisted Extraction (CAE) ให้ค่าฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูงกว่าน้ำเปล่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยน้ำเปล่าใน Plan 1 ถึง 5 ให้ค่าต่ำมาก เช่น Plan 5 ได้ค่าเพียง $77.076 \pm 1.038 \mu\text{M TE}$ ขณะที่ CAE Plan 1 ให้ค่าสูงถึง $830.381 \mu\text{M TE}$ ซึ่งชี้ให้เห็นว่า Cyclodextrin มีบทบาทสำคัญในการกักเก็บและรักษาสภาพของสารต้านอนุมูลอิสระ

เมื่อเปรียบเทียบกับสารสกัดที่ได้จากการหมักด้วยเมทานอล (MeOH ME) ซึ่งให้ค่า $853.680 \pm 2.148 \mu\text{M TE}$ พบว่าไม่แตกต่างจาก CAE Plan 1 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ทั้งนี้แสดงให้เห็นว่า CAE ภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสมสามารถทดแทนการใช้เมทานอลได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในขณะที่ Hexane ME ให้ค่าต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญ ($611.559 \pm 2.421 \mu\text{M TE}$)

ผลของเทคนิคการสกัดต่อฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ

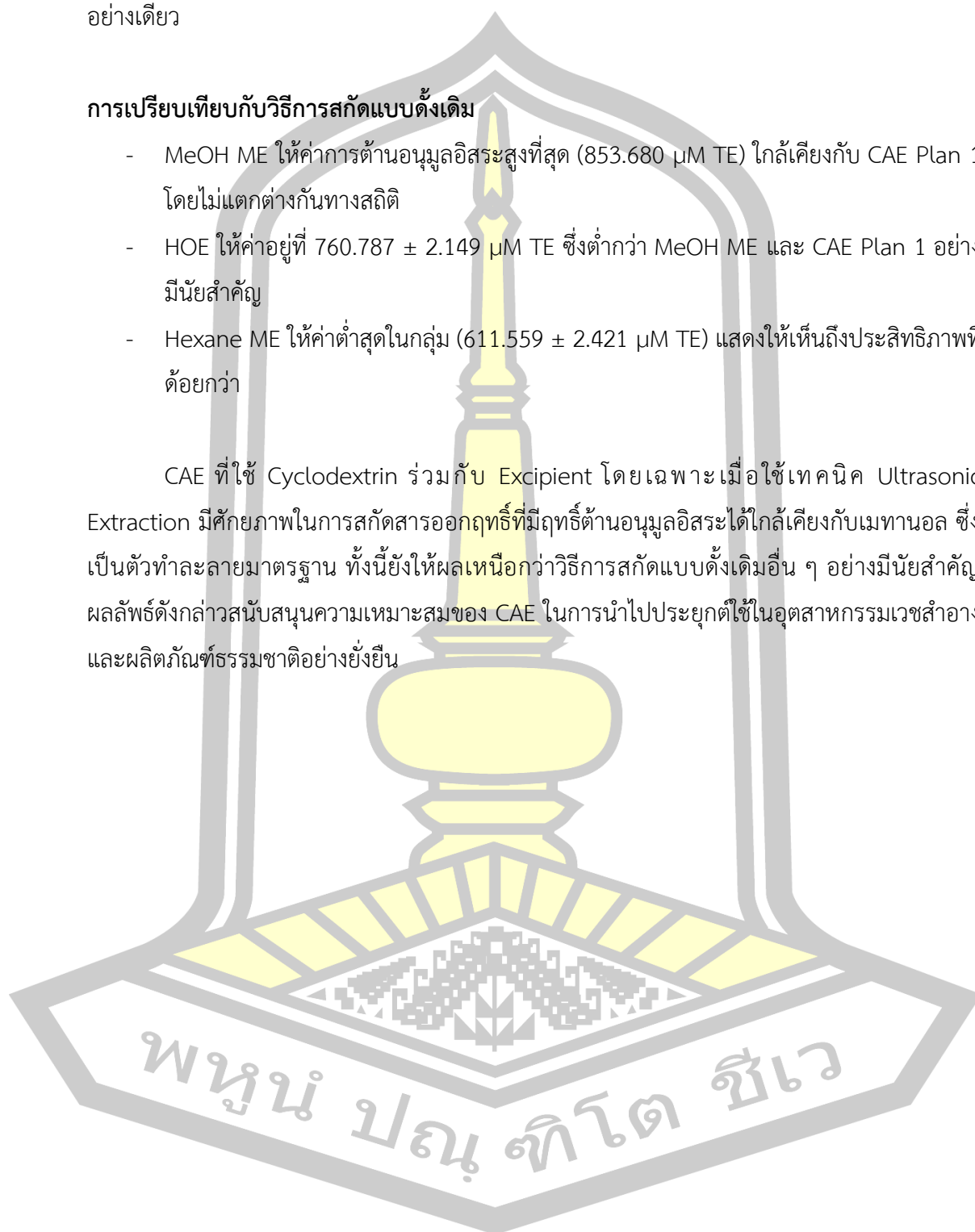
การเปรียบเทียบระหว่างเทคนิคการสกัด Ultrasonic Extraction (Plan 1) และ Shaking Extraction (Plan 5) ภายใต้เงื่อนไขของ Cyclodextrin และ Excipient ที่คล้ายกัน พบว่า UE ให้ค่าฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูงกว่าชัดเจน โดย Plan 1 ให้ค่า $830.381 \mu\text{M TE}$ ส่วน Plan 5 ให้ค่าเพียง $342.927 \pm 1.683 \mu\text{M TE}$ ความแตกต่างนี้มีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งสะท้อนถึงประสิทธิภาพของคลื่น

เสี่ยงในการปลดปล่อยสารออกฤทธิ์และรักษาเสถียรภาพของสารสำคัญได้ดีกว่าการใช้แรงเฉย่าเพียงอย่างเดียว

การเปรียบเทียบกับวิธีการสกัดแบบดั้งเดิม

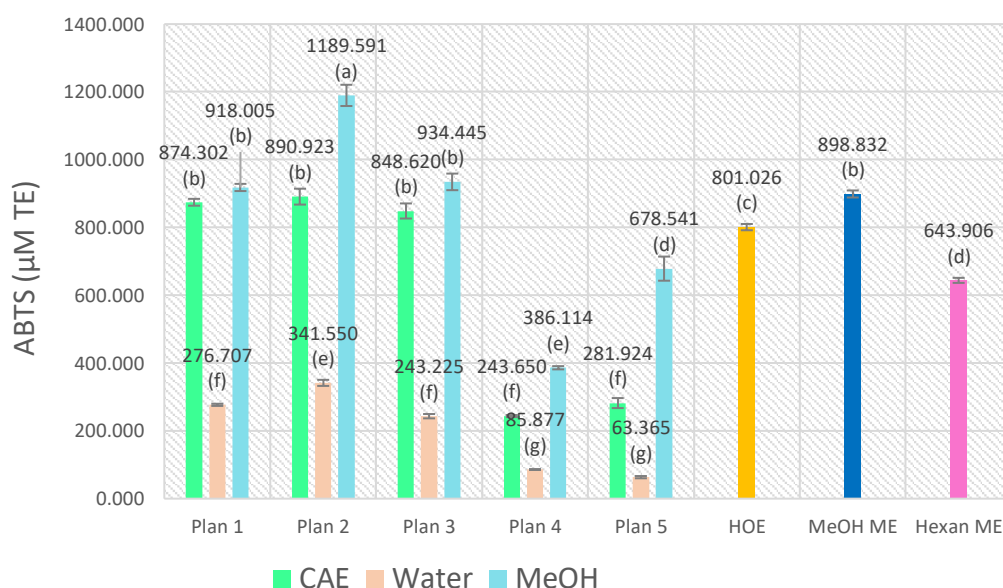
- MeOH ME ให้ค่าการต้านอนุมูลอิสระสูงที่สุด (853.680 $\mu\text{M TE}$) ใกล้เคียงกับ CAE Plan 1 โดยไม่แตกต่างกันทางสถิติ
- HOE ให้ค่าอยู่ที่ $760.787 \pm 2.149 \mu\text{M TE}$ ซึ่งต่ำกว่า MeOH ME และ CAE Plan 1 อย่างมีนัยสำคัญ
- Hexane ME ให้ค่าต่ำสุดในกลุ่ม ($611.559 \pm 2.421 \mu\text{M TE}$) แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่ด้อยกว่า

CAE ที่ใช้ Cyclodextrin ร่วมกับ Excipient โดยเฉพาะเมื่อใช้เทคนิค Ultrasonic Extraction มีศักยภาพในการสกัดสารออกฤทธิ์ที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระได้ใกล้เคียงกับเมทานอล ซึ่งเป็นตัวทำละลายมาตรฐาน ทั้งนี้ยังให้ผลเหนือกว่าวิธีการสกัดแบบดั้งเดิมอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญ ผลลัพธ์ดังกล่าวสนับสนุนความเหมาะสมของ CAE ในการนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมเวชสำอาง และผลิตภัณฑ์ธรรมชาติอย่างยั่งยืน



4.4.5 การศึกษาวิธีการสกัดโดยใช้ไซโคลเด็กซ์ทรีนและสารช่วยเพื่อทำการสกัดสารสำคัญจากเหง้าไพลโดยวัดฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี ABTS เทียบกับวิธีการสกัดแบบดั้งเดิม

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดจากเหง้าไพลภายใต้เงื่อนไขการสกัดที่แตกต่างกัน โดยใช้การทดสอบ ABTS (2,2'-azinobis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid)) ซึ่งเป็นหนึ่งในวิธีมาตรฐานที่ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายในการวัดศักยภาพการต้านอนุมูลอิสระ ค่าที่ได้ถูกแสดงในรูปของหน่วย $\mu\text{M TE}$ (Trolox Equivalent) และนำมาวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติด้วย Tukey's HSD Test ($p < 0.05$) เพื่อเปรียบเทียบผลระหว่างกลุ่มตัวอย่างที่ผ่านการสกัดด้วยเงื่อนไขที่แตกต่างกันแสดงในภาพที่ 4.91



ภาพที่ 4.90 การเปรียบเทียบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระทดสอบด้วยวิธี ABTS ที่ได้จากการสกัดที่แตกต่างกัน

หมายเหตุ กราฟแสดงฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ABTS assay (Y4) (Mean, $n=3$) ที่ได้จากการสกัดเหง้าไพลโดยใช้ Cyclodextrin-assisted Extraction (CAE), Hot Oil Extraction (HOE), และ Organic Solvent Maceration (ME) โดย CAE ใช้ไซโคลเด็กซ์ทรีนร่วมกับเอทานอลและ/หรือ Tween 80 ภายใต้ Ultrasonic Extraction (UE) หรือ Shaking Extraction (SE) ขณะที่ HOE ใช้ น้ำมันมะพร้าวร้อน (160°C) และ ME ใช้ Methanol หรือ Hexane หมัก 48 ชั่วโมง ตัวอักษรบนแท่งกราฟแสดง ผล Tukey's HSD Test ($p < 0.05$) โดยตัวอักษรด้านบนแท่งกราฟแสดงกลุ่มที่มีความแตกต่างกันทางสถิติจากการวิเคราะห์ด้วย Tukey's HSD Test ($p < 0.05$) โดย แท่งกราฟที่มีตัวอักษรเดียวกัน หมายถึง “ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ” และเรียงลำดับตัวอักษรจาก a (มีค่าปริมาณสูงที่สุด) ไปจนถึง g (มีค่าปริมาณต่ำที่สุด) เพื่อแสดงลำดับฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ABTS assay ที่ได้จากแต่ละสภาวะการสกัด

ผลของการเติมสารช่วย (Excipient) ต่อฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ

เมื่อพิจารณาผลจาก Cyclodextrin-assisted Extraction (CAE) Plan 1 ซึ่งใช้ทั้ง Ethanol และ Tween 80 เป็น Excipient เทียบกับ CAE Plan 4 ที่ไม่มีการเติมสารช่วย พบว่าการใช้ Excipient ร่วมกันให้ผลการต้านอนุมูลอิสระที่สูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญ โดย CAE Plan 1 ให้ค่าฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระที่ $874.302 \pm 3.025 \mu\text{M TE}$ ขณะที่ Plan 4 ให้ค่าเพียง $386.114 \pm 2.756 \mu\text{M TE}$ สะท้อนให้เห็นถึงบทบาทของ Excipient ในการช่วยละลายสารออกฤทธิ์และเสริมความสามารถของไฮโคลเด็กซ์ทรินในการกักเก็บสารสำคัญ ส่งผลให้ประสิทธิภาพของสารสกัดเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน

ผลของการเติม Excipient เพียงชนิดเดียว

CAE Plan 2 (Ethanol) และ Plan 3 (Tween 80) ซึ่งใช้ Excipient เพียงชนิดเดียว ต่างแสดงศักยภาพในการต้านอนุมูลอิสระที่ดี โดย Plan 2 ให้ค่าฤทธิ์ที่ $918.005 \pm 2.874 \mu\text{M TE}$ และ Plan 3 ให้ค่า $934.445 \pm 3.106 \mu\text{M TE}$ ทั้งสองค่าดังกล่าวสูงกว่า Plan 4 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แสดงให้เห็นว่าแม้การใช้ Excipient เพียงชนิดเดียวก็สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดได้ในระดับที่ใกล้เคียงกับการใช้ร่วมกัน ทั้งนี้ยังแสดงศักยภาพของแต่ละชนิดของ Excipient ในการช่วยเสริมการสกัดสารออกฤทธิ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ประสิทธิภาพของ Cyclodextrin-assisted Extraction เทียบกับน้ำเปล่าและเมทานอล

ผลการศึกษาทุกแผนภายใต้ CAE พบว่ามีค่าฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระที่สูงกว่าสารสกัดด้วยน้ำเปล่าอย่างมีนัยสำคัญ ตัวอย่างเช่น CAE Plan 1 ให้ค่า $874.302 \mu\text{M TE}$ ขณะที่ Water Plan 1 ให้ค่าต่ำเพียง $276.707 \pm 2.615 \mu\text{M TE}$ เท่านั้น แสดงให้เห็นว่าไฮโคลเด็กซ์ทรินมีบทบาทสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพการละลายและคงสภาพสารออกฤทธิ์ ทำให้สามารถต้านอนุมูลอิสระได้ดีกว่าวิธีการสกัดด้วยน้ำเปล่าหรือไม่มีตัวช่วย

เมื่อเปรียบเทียบกับสารสกัดด้วยเมทานอล (MeOH ME) ซึ่งให้ค่าฤทธิ์ที่ $898.832 \pm 2.964 \mu\text{M TE}$ และค่าจาก Hexane ME ที่ $643.906 \pm 2.589 \mu\text{M TE}$ พบว่า CAE Plan 2 และ Plan 3 ให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน โดยไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจาก MeOH ME แสดงว่า CAE ภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสมสามารถเป็นทางเลือกที่มีประสิทธิภาพเทียบเท่ากับการใช้ตัวทำละลายอินทรีย์อย่างเมทานอล ทั้งยังปลอดภัยและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่า

ผลของเทคนิคการสกัดต่อฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ

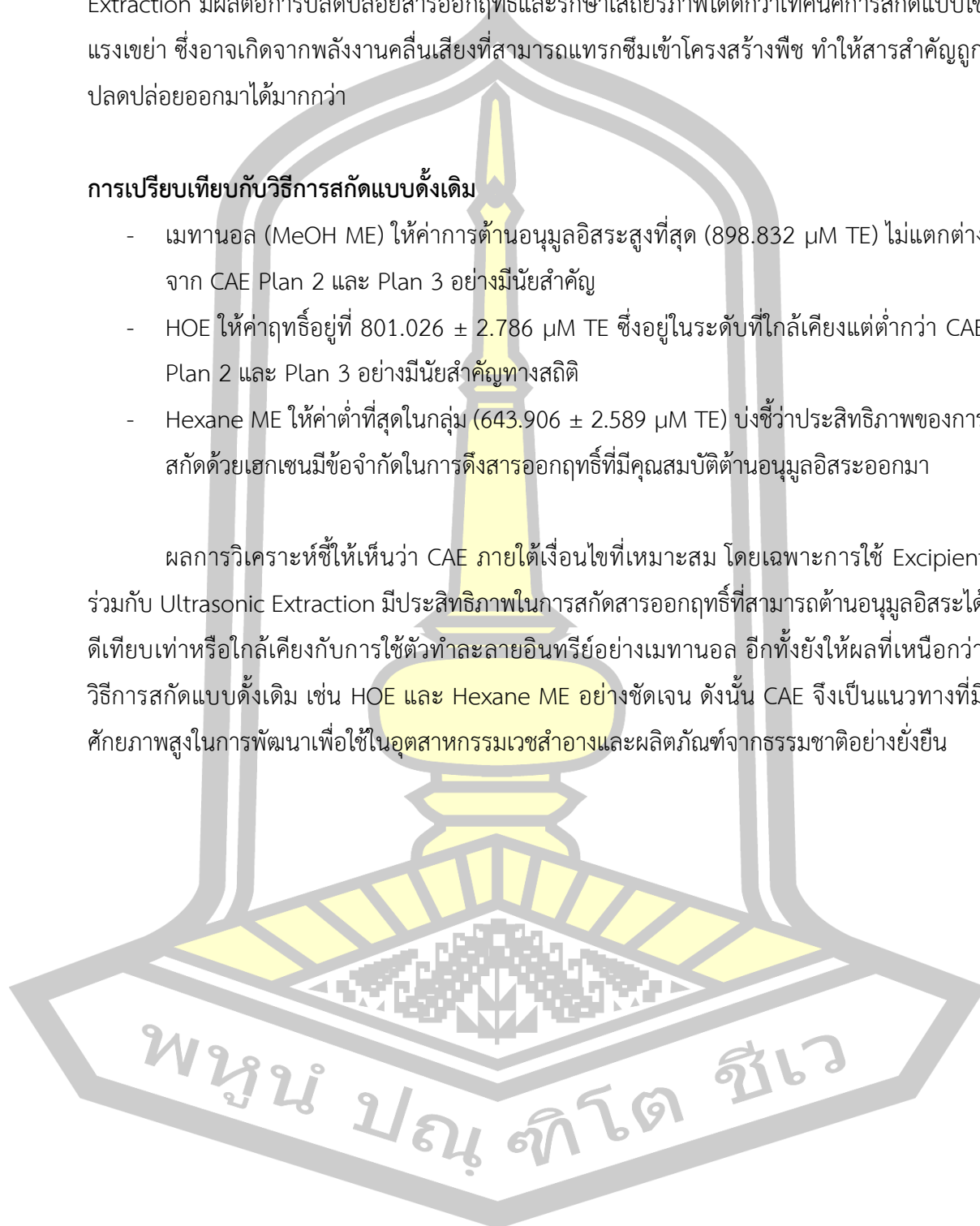
การเปรียบเทียบระหว่าง CAE Plan 1 (Ultrasonic Extraction) และ CAE Plan 5 (Shaking Extraction) พบความแตกต่างที่มีนัยสำคัญทางสถิติ โดย Plan 1 ให้ค่าฤทธิ์สูงถึง 874.302

$\mu\text{M TE}$ ในขณะที่ Plan 5 ให้ค่าเพียง $281.924 \pm 1.983 \mu\text{M TE}$ การใช้เทคนิค Ultrasonic Extraction มีผลต่อการปลดปล่อยสารออกฤทธิ์และรักษาเสถียรภาพได้ดีกว่าเทคนิคการสกัดแบบใช้แรงเขย่า ซึ่งอาจเกิดจากพลังงานคลื่นเสียงที่สามารถแทรกซึมเข้าโครงสร้างพืช ทำให้สารสำคัญถูกปลดปล่อยออกมาได้มากกว่า

การเปรียบเทียบกับวิธีการสกัดแบบดั้งเดิม

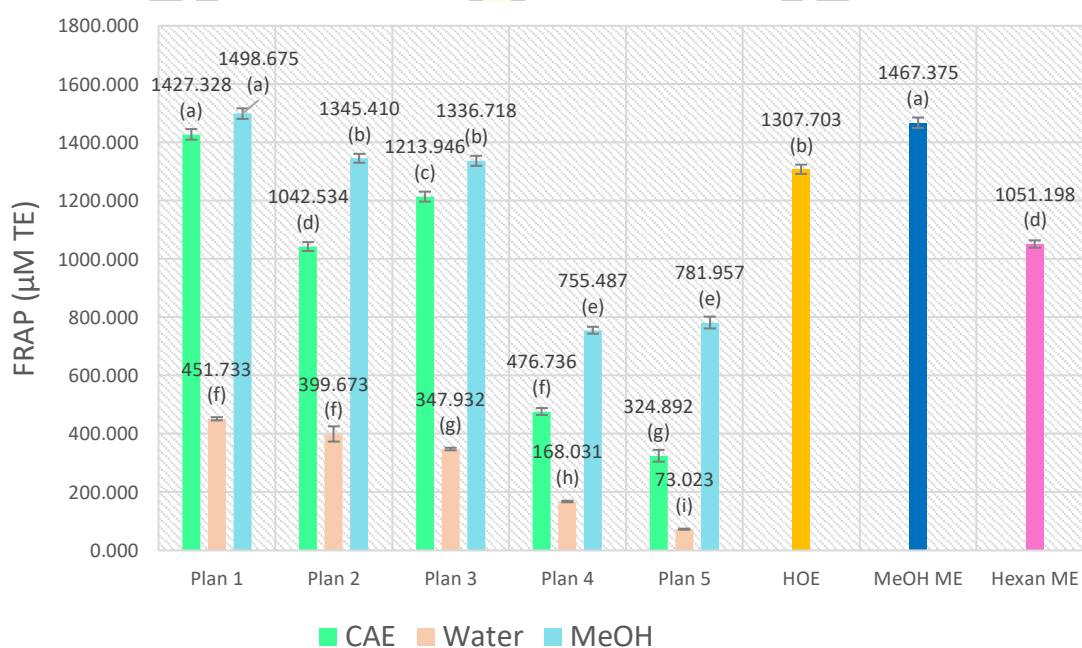
- เมทานอล (MeOH ME) ให้ค่าการต้านอนุมูลอิสระสูงที่สุด ($898.832 \mu\text{M TE}$) ไม่แตกต่างจาก CAE Plan 2 และ Plan 3 อย่างมีนัยสำคัญ
- HOE ให้ค่าฤทธิ์อยู่ที่ $801.026 \pm 2.786 \mu\text{M TE}$ ซึ่งอยู่ในระดับที่ใกล้เคียงแต่ต่ำกว่า CAE Plan 2 และ Plan 3 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ
- Hexane ME ให้ค่าต่ำที่สุดในกลุ่ม ($643.906 \pm 2.589 \mu\text{M TE}$) บ่งชี้ว่าประสิทธิภาพของการสกัดด้วยเฮกเซนมีข้อจำกัดในการดึงสารออกฤทธิ์ที่มีคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระออกมา

ผลการวิเคราะห์ชี้ให้เห็นว่า CAE ภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสม โดยเฉพาะการใช้ Excipient ร่วมกับ Ultrasonic Extraction มีประสิทธิภาพในการสกัดสารออกฤทธิ์ที่สามารถต้านอนุมูลอิสระได้ดีเทียบเท่าหรือใกล้เคียงกับการใช้ตัวทำละลายอินทรีย์อย่างเมทานอล อีกทั้งยังให้ผลที่เหนือกว่าวิธีการสกัดแบบดั้งเดิม เช่น HOE และ Hexane ME อย่างชัดเจน ดังนั้น CAE จึงเป็นแนวทางที่มีศักยภาพสูงในการพัฒนาเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมเวชสำอางและผลิตภัณฑ์จากธรรมชาติอย่างยั่งยืน



4.4.6 การศึกษาวิธีการสกัดโดยใช้ไซโคลเด็กซ์ทรีนและสารช่วยเพื่อทำการสกัดสารสำคัญจากเหง้าไพลโดยวิธีด้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี FRAP เทียบกับวิธีการสกัดแบบดั้งเดิม

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินศักยภาพในการต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดจากเหง้าไพล (*Zingiber montanum*) ภายใต้เงื่อนไขการสกัดที่แตกต่างกัน โดยใช้การทดสอบ FRAP (Ferric Reducing Antioxidant Power) ซึ่งเป็นวิธีมาตรฐานที่ได้รับความนิยมในการประเมินความสามารถในการให้ electron แก่ Fe^{3+} จนเปลี่ยนเป็น Fe^{2+} โดยค่าที่ได้แสดงในหน่วย μM Trolox Equivalent (TE) และนำมาวิเคราะห์ทางสถิติด้วยการทดสอบ Tukey's HSD Test ($p < 0.05$) เพื่อประเมินความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างกลุ่มสภาวะการสกัดแสดงในภาพที่ 4.92



ภาพที่ 4.91 การเปรียบเทียบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระทดสอบด้วยวิธี FRAP ที่ได้จากการสกัดที่ต่างกัน

หมายเหตุ กราฟแสดงฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ FRAP assay (Y4) (Mean, n=3) ที่ได้จากการสกัดเหง้าไพลโดยใช้ Cyclodextrin-assisted Extraction (CAE), Hot Oil Extraction (HOE), และ Organic Solvent Maceration (ME) โดย CAE ใช้ไซโคลเด็กซ์ทรีนร่วมกับเอทานอลและ/หรือ Tween 80 ภายใต้ Ultrasonic Extraction (UE) หรือ Shaking Extraction (SE) ขณะที่ HOE ใช้น้ำมันมะพร้าวร้อน (160°C) และ ME ใช้ Methanol หรือ Hexane หมัก 48 ชั่วโมง ตัวอักษรบนแท่งกราฟแสดง ผล Tukey's HSD Test ($p < 0.05$) โดยตัวอักษรด้านบนแท่งกราฟแสดงกลุ่มที่มีความแตกต่างกันทางสถิติจากการวิเคราะห์ด้วย Tukey's HSD Test ($p < 0.05$) โดย แท่งกราฟที่มีตัวอักษรเดียวกัน หมายถึง “ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ” และเรียงลำดับตัวอักษรจาก a (มีค่าปริมาณสูงที่สุด) ไปจนถึง i (มีค่าปริมาณต่ำที่สุด) เพื่อแสดงลำดับฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ FRAP assay ที่ได้จากแต่ละสภาวะการสกัด

ผลของการเติมสารช่วย (Excipient) ต่อฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การเติมสารช่วย (excipient) อย่าง Ethanol และ Tween 80 มีผลอย่างมีนัยสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพของการสกัดสารต้านอนุมูลอิสระ โดย CAE Plan 1 ซึ่งใช้ทั้ง Ethanol และ Tween 80 ร่วมกับ Cyclodextrin ภายใต้ Ultrasonic Extraction ให้ค่าฤทธิ์ FRAP สูงสุดที่ $1,427.328 \pm 3.241 \mu\text{M TE}$ ในกลุ่ม CAE ขณะที่ CAE Plan 4 ซึ่งไม่ใช้สารช่วยใด ๆ ให้ค่าต่ำสุดเพียง $476.736 \pm 2.871 \mu\text{M TE}$ สะท้อนให้เห็นถึงบทบาทสำคัญของสารช่วยในการเสริมการละลายและการปลดปล่อยสารออกฤทธิ์จากโครงสร้างพืช โดยเฉพาะในระบบที่ใช้ Cyclodextrin เป็นตัวช่วยกักเก็บ

ผลของการเติม Excipient เพียงชนิดเดียว

เมื่อเปรียบเทียบ CAE Plan 2 (ใช้เฉพาะ Ethanol) และ Plan 3 (ใช้เฉพาะ Tween 80) พบว่าทั้งสองสภาวะให้ค่าฤทธิ์ FRAP ที่สูงมากเช่นกัน โดย Plan 2 ให้ค่า $1,345.410 \pm 2.954 \mu\text{M TE}$ และ Plan 3 ให้ค่า $1,336.718 \pm 3.167 \mu\text{M TE}$ แม้จะต่ำกว่า Plan 1 เล็กน้อย แต่ยังคงสูงกว่า Plan 4 อย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่าสารช่วยแต่ละชนิดสามารถเสริมฤทธิ์ของ Cyclodextrin ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถใช้เพื่อเพิ่มผลการสกัดได้ แม้ในกรณีที่ใช้เพียงชนิดเดียว

ประสิทธิภาพของ Cyclodextrin-assisted Extraction เทียบกับน้ำเปล่าและเมทานอล

การใช้ Cyclodextrin ในกระบวนการสกัดมีประสิทธิภาพสูงกว่าอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับน้ำเปล่าในทุกแผนการศึกษา โดยใน Plan 1 CAE ให้ค่าฤทธิ์ FRAP ถึง $1,427.328 \mu\text{M TE}$ ขณะที่น้ำเปล่าใน Plan เดียวกันให้ค่าเพียง $451.733 \pm 2.683 \mu\text{M TE}$ เท่านั้น สะท้อนถึงความสามารถของ Cyclodextrin ในการกักเก็บและปลดปล่อยสารออกฤทธิ์อย่างมีประสิทธิภาพ

เมื่อเปรียบเทียบกับสารสกัดด้วยเมทานอล (MeOH ME) ซึ่งให้ค่าฤทธิ์ FRAP สูงสุดที่ $1,467.375 \pm 3.126 \mu\text{M TE}$ พบว่า CAE Plan 1 และ Plan 2 ให้ค่าใกล้เคียงกัน โดยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แสดงให้เห็นว่า CAE ภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสมสามารถเป็นทางเลือกที่เทียบเท่ากับเมทานอลได้อย่างแท้จริง และเหนือกว่าการสกัดด้วยเฮกเซน (Hexane ME) ซึ่งให้ค่าเพียง $1,051.198 \pm 2.994 \mu\text{M TE}$

ผลของเทคนิคการสกัดต่อฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ

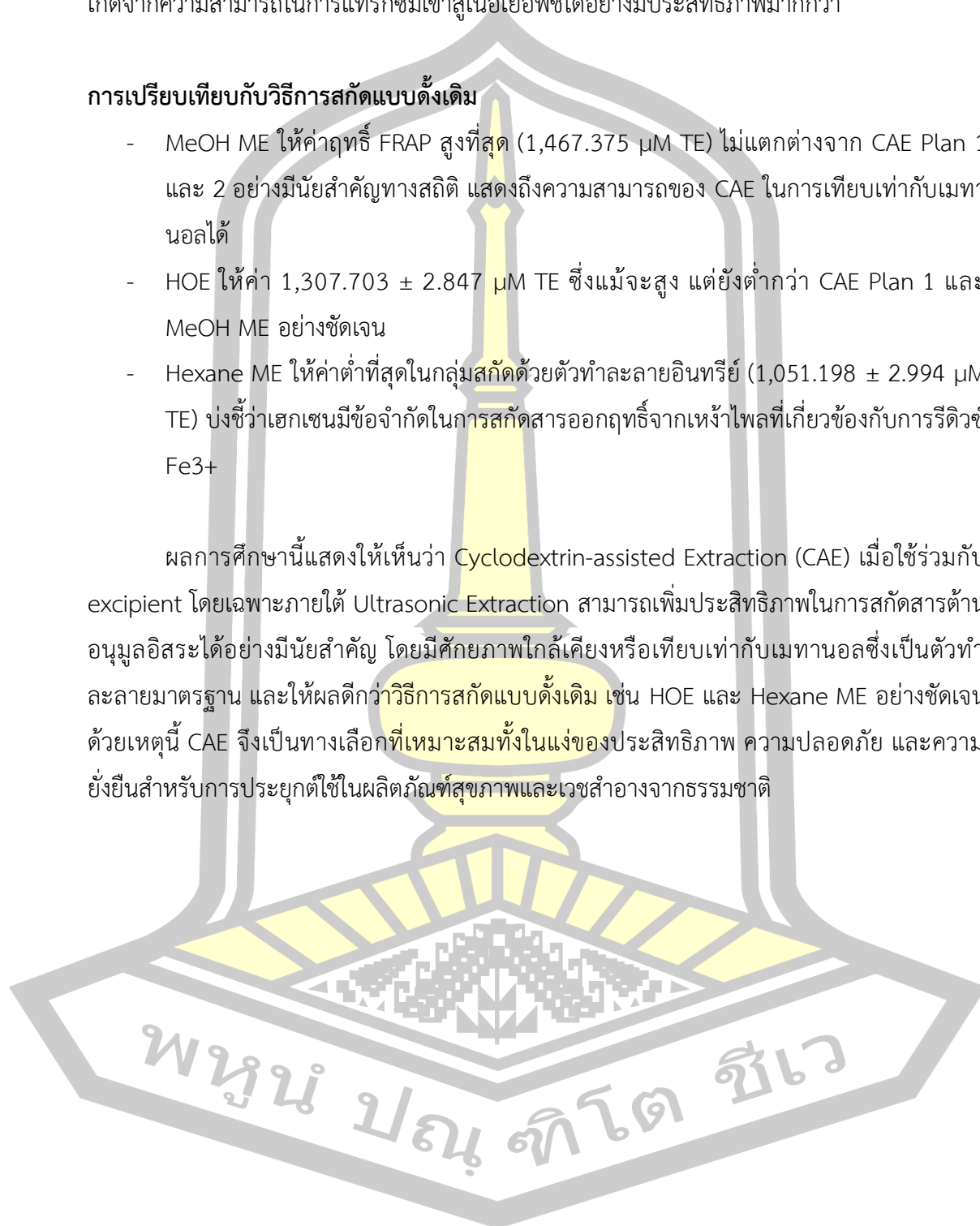
การเปรียบเทียบระหว่าง CAE Plan 1 (Ultrasonic Extraction) กับ Plan 5 (Shaking Extraction) แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดย Plan 1 ให้ค่าฤทธิ์ FRAP สูงถึง $1,427.328 \mu\text{M TE}$ ขณะที่ Plan 5 ให้ค่าเพียง $324.892 \pm 2.601 \mu\text{M TE}$ การใช้พลังงานเสียง

จากคลื่นอัลตราโซนิกช่วยกระตุ้นการปลดปล่อยสารสำคัญได้มากกว่าแรงเฉย่าเพียงอย่างเดียว ซึ่งอาจเกิดจากความสามารถในการแทรกซึมเข้าสู่เนื้อเยื่อพืชได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่า

การเปรียบเทียบกับวิธีการสกัดแบบดั้งเดิม

- MeOH ME ให้ค่าฤทธิ์ FRAP สูงที่สุด (1,467.375 $\mu\text{M TE}$) ไม่แตกต่างจาก CAE Plan 1 และ 2 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แสดงถึงความสามารถของ CAE ในการเทียบเท่ากับเมทานอลได้
- HOE ให้ค่า $1,307.703 \pm 2.847 \mu\text{M TE}$ ซึ่งแม้จะสูง แต่ยังคงต่ำกว่า CAE Plan 1 และ MeOH ME อย่างชัดเจน
- Hexane ME ให้ค่าต่ำที่สุดในกลุ่มสกัดด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ ($1,051.198 \pm 2.994 \mu\text{M TE}$) บ่งชี้ว่าเฮกเซนมีข้อจำกัดในการสกัดสารออกฤทธิ์จากเหง้าโพลที่เกี่ยวข้องกับการรีดิวซ์ Fe^{3+}

ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า Cyclodextrin-assisted Extraction (CAE) เมื่อใช้ร่วมกับ excipient โดยเฉพาะภายใต้ Ultrasonic Extraction สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัดสารต้านอนุมูลอิสระได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยมีศักยภาพใกล้เคียงหรือเทียบเท่ากับเมทานอลซึ่งเป็นตัวทำละลายมาตรฐาน และให้ผลดีกว่าวิธีการสกัดแบบดั้งเดิม เช่น HOE และ Hexane ME อย่างชัดเจน ด้วยเหตุนี้ CAE จึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมทั้งในแง่ของประสิทธิภาพ ความปลอดภัย และความยั่งยืนสำหรับการประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์สุขภาพและเวชสำอางจากธรรมชาติ



4.4.7 บทสรุปการศึกษาการใช้ไซโคลเด็กซ์ทรินช่วยสกัดสารสำคัญจากเหง้าไพล การเปรียบเทียบกับวิธีการสกัดแบบดั้งเดิม

จากการศึกษารูปแบบต่าง ๆ ของเทคนิคการสกัดสารสำคัญจากเหง้าไพล ในหัวข้อก่อนหน้านี พบว่าการใช้ไซโคลเด็กซ์ทรินร่วมกับสารช่วย (Excipient) ภายใต้เทคนิคการสกัดด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง (Ultrasonic Extraction; UE) หรือการเขย่า (Shaking Extraction; SE) สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดได้อย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการสกัดแบบดั้งเดิม เช่น การหมักด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ (MeOH, Hexane) และการทอดในน้ำมันร้อน (HOE)

ประสิทธิภาพโดยรวมของ Cyclodextrin-assisted Extraction (CAE)

เทคนิค CAE แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการดึงสารออกฤทธิ์จากเหง้าไพลได้ใกล้เคียงหรือเทียบเท่ากับตัวทำละลายมาตรฐานอย่างเมทานอล โดยเฉพาะเมื่อมีการใช้สารช่วยทั้ง Ethanol และ Tween 80 ร่วมด้วย การวิเคราะห์เชิงลึกจากผลลัพธ์ในทุกการทดสอบ ได้แก่ ปริมาณ Compound D, DMPBD, Curcuminoid content และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ (DPPH, ABTS, FRAP) พบว่า CAE Plan 1 ซึ่งใช้ไซโคลเด็กซ์ทรินร่วมกับ Ethanol และ Tween 80 ร่วมกับเทคนิค UE ให้ผลดีที่สุดอย่างสม่ำเสมอในเกือบทุกตัวชี้วัด ทั้งในแง่ปริมาณสารสำคัญและฤทธิ์ทางชีวภาพ

บทบาทของสารช่วยในการสกัด

การเติมสารช่วยมีผลต่อการเพิ่มค่าการสกัดและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระอย่างชัดเจน โดยเฉพาะเมื่อใช้ร่วมกันทั้ง Ethanol และ Tween 80 จะช่วยเพิ่มความสามารถในการละลายของสารออกฤทธิ์ กลไกสำคัญของการทำงานร่วมนี้อยู่ที่การเพิ่มขั้วของระบบสกัด (เพิ่ม polarity) และส่งเสริมการสร้าง inclusion complex ระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินกับสารออกฤทธิ์ นอกจากนี้ Tween 80 ยังทำหน้าที่เป็นสารลดแรงตึงผิว (surfactant) ที่ช่วยกระจายตัวของสารที่ไม่ละลายน้ำได้ดีขึ้น จึงเสริมประสิทธิภาพของไซโคลเด็กซ์ทรินในการกักเก็บและปลดปล่อยสารสำคัญจากเนื้อเยื่อพืช

บทบาทของเทคนิคการสกัด

การใช้คลื่นเสียงใน Ultrasonic Extraction (UE) มีผลชัดเจนต่อการเร่งกระบวนการปลดปล่อยสารออกฤทธิ์ โดยเกิดจากการสร้างแรงเฉือน (shear force) และการเกิดโพรงอากาศ (cavitation) ซึ่งช่วยทำลายผนังเซลล์พืช เพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างสารออกฤทธิ์และตัวทำละลาย จึงทำให้การสกัดมีประสิทธิภาพมากกว่า Shaking Extraction อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในทุกการทดสอบ

การเปรียบเทียบกับวิธีการสกัดแบบดั้งเดิม

เมื่อนำผลของ CAE มาเปรียบเทียบกับวิธีการสกัดแบบดั้งเดิม ได้แก่ Methanol Maceration (MeOH ME), Hexane Maceration (Hexane ME) และ Hot Oil Extraction (HOE) พบว่า

- CAE Plan 1 ให้ค่าผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับหรือดีกว่า MeOH ME ในหลายกรณี โดยไม่มีความแตกต่างทางสถิติในตัวชี้วัดสำคัญ เช่น Compound D, DMPBD และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ (DPPH, ABTS, FRAP)
- การสกัดด้วย Hexane ME ให้ผลต่ำที่สุดในเกือบทุกตัวชี้วัด แสดงถึงข้อจำกัดของตัวทำละลายที่มีความเป็น non-polar สูง
- HOE แม้จะให้ผลระดับปานกลางแต่ยังคงด้อยกว่าทั้ง MeOH และ CAE อย่างมีนัยสำคัญ

ข้อได้เปรียบของ CAE ในเชิงวิชาการและการประยุกต์ใช้งาน

- **ประสิทธิภาพ** CAE สามารถให้ผลการสกัดเทียบเท่ากับเมทานอล ซึ่งเป็นมาตรฐานทางห้องปฏิบัติการ แต่ปลอดภัยกว่า
- **ความปลอดภัย** CAE ไม่ใช้สารอินทรีย์ระเหยง่ายหรือสารพิษ ช่วยลดความเสี่ยงในการปนเปื้อนและผลกระทบต่อสุขภาพ
- **ความยั่งยืนและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม** การใช้ cyclodextrin ซึ่งเป็นสารที่ย่อยสลายได้ง่าย และการลดการใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม
- **ศักยภาพในการประยุกต์ใช้** เหมาะสำหรับอุตสาหกรรมที่ต้องการสารสกัดที่มีความปลอดภัยสูง เช่น เวชสำอาง สมุนไพร และอาหารเสริม

การใช้ Cyclodextrin-assisted Extraction (CAE) โดยเฉพาะเมื่อเติมสารช่วย Ethanol และ Tween 80 ภายใต้เทคนิค Ultrasonic Extraction แสดงให้เห็นถึงศักยภาพที่โดดเด่นในการสกัดสารออกฤทธิ์จากเหง้าไพล โดยไม่เพียงแต่ให้ผลเทียบเท่ากับการสกัดด้วยเมทานอลเท่านั้น แต่ยังมีข้อได้เปรียบในด้านความปลอดภัย ความยั่งยืน และความเหมาะสมในการนำไปใช้ในระดับอุตสาหกรรม ซึ่งถือเป็นแนวทางที่สอดคล้องกับเทคโนโลยีการสกัดสมัยใหม่ที่เน้น Green Extraction และความรับผิดชอบต่อสิ่งแวดล้อม ทั้งนี้ ผลการศึกษาทั้งหมดสนับสนุนว่า CAE เป็นเทคนิคที่มีศักยภาพสูงสำหรับการพัฒนาผลิตภัณฑ์จากพืชสมุนไพรในอนาคตอย่างยั่งยืน

บทที่ 5

สรุปและอภิปรายผลการศึกษา

5.1 สรุปผลการศึกษา

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินประสิทธิภาพของการใช้ไซโคลเด็กซ์ทรินผ่านการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีและเชิงทดลอง โดยเฉพาะการใช้ Molecular Docking เพื่อตรวจสอบกลไกการเกิด Inclusion Complex ระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินและสารออกฤทธิ์ในเหง้าโพลในการช่วยสกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากเหง้าโพล โดยมุ่งเน้นการคัดเลือกชนิดของไซโคลเด็กซ์ทรินที่เหมาะสมและศึกษาผลของปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการสกัด กระบวนการศึกษาประกอบด้วยการออกแบบการทดลองแบบ D-optimal Design เพื่อคัดกรองปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการสกัด และใช้ Central Composite Design (CCD) ในการหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสกัด

จากผลการศึกษาทาง Molecular Docking พบว่า Hydroxypropyl-Beta-Cyclodextrin (HPBCD) เป็นไซโคลเด็กซ์ทรินที่มีศักยภาพสูงสุดในการเกิด Inclusion Complex กับสารออกฤทธิ์หลักของโพล ได้แก่ Compound D และ DMPBD ในกลุ่ม Phenylbutanoids รวมถึงสารในกลุ่ม Curcuminoids ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า HPBCD มีค่าพลังงานการจับตัว (Binding Affinity) ต่ำกว่า Beta-Cyclodextrin (BCD) และ Gamma-Cyclodextrin (GCD) บ่งชี้ว่ามีความสามารถในการสร้าง Inclusion Complex ที่เสถียรมากขึ้นและสามารถเพิ่มความสามารถในการละลายของสารออกฤทธิ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งช่วยปรับปรุงความสามารถในการกักเก็บและการปลดปล่อยของสารออกฤทธิ์ในระบบสกัด

ในการศึกษาขั้นตอน Screening Study โดยใช้ D-optimal Design พบว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของการสกัดมากที่สุดคือ น้ำหนักของเหง้าโพล ซึ่งมีผลโดยตรงต่อปริมาณสารออกฤทธิ์ที่สามารถสกัดได้ รองลงมาคือชนิดของไซโคลเด็กซ์ทริน โดย HPBCD ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดอื่น เช่น ACD, BCD, GCD และอนุพันธ์ที่ผ่านการดัดแปลงทางเคมี ได้แก่ MBCD และ SBEB CD นอกจากนี้ ชนิดของสารเติมแต่งมีบทบาทสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพของการสกัด โดย Tween 80 แสดงให้เห็นว่ามีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับสารเติมแต่งชนิดอื่น เช่น PEG400, Glycerin, Propylene glycol, Sorbitol และ Tween 20 ปัจจัยอื่นๆ ที่ศึกษาพบว่า ความเข้มข้นของไซโคลเด็กซ์ทริน (10-30 mM) มีผลต่อการเกิด Inclusion Complex โดยต้องเลือกความเข้มข้นที่เหมาะสมเพื่อให้สามารถสกัดสารออกฤทธิ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด ความเข้มข้นของสารเติมแต่ง (5-15% w/w) และความเข้มข้นของเอทานอล (20-30% w/w) มีผลต่อความสามารถในการสกัด โดยพบว่าเอทานอลช่วยเพิ่มการละลายของสารออก

ฤทธิ์ที่มีชีวิตต่ำ นอกจากนี้ ระยะเวลาในการสกัด (10-30 นาที) และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (140-280 W) ส่งผลต่อการปลดปล่อยสารออกฤทธิ์ โดยพบว่าพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ช่วยเพิ่มการกระจายตัวของโมเลกุลของไซโคลเด็กซ์ทรีนและช่วยเร่งกระบวนการสกัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เมื่อทำการศึกษาขั้นตอน Optimization Study โดยใช้ CCD พบว่าสภาวะที่เหมาะสมของการสกัดคือการใช้ HPBCD ที่ระดับความเข้มข้นที่เหมาะสมร่วมกับเอทานอลและ Tween 80 ซึ่งช่วยเพิ่มความสามารถในการละลายและเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดของสารออกฤทธิ์ได้อย่างสูงสุด นอกจากนี้ ควรมีการปรับปรุงปัจจัยอื่น ๆ ให้เหมาะสมกับกระบวนการสกัด เช่น การควบคุมระยะเวลาในการสกัดและพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ให้เหมาะสมกับลักษณะของสารออกฤทธิ์ รวมถึงการเลือกใช้ตัวทำละลายที่ช่วยเสริมการเกิด Inclusion Complex เพื่อให้การสกัดมีประสิทธิภาพสูงสุด อย่างไรก็ตาม นอกเหนือจากปัจจัยหลักเหล่านี้แล้ว ควรมีการปรับปรุงปัจจัยในการสกัดอื่นๆ ให้มีความเหมาะสมต่อกระบวนการสกัดนั้นๆ เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด เช่น การควบคุมระยะเวลาในการสกัดและพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ให้เหมาะสมกับลักษณะของสารออกฤทธิ์และสภาพแวดล้อมของกระบวนการสกัด

ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการใช้ HPBCD ในเงื่อนไขต่างๆ พบว่าการใช้ HPBCD ร่วมกับเอทานอลเพียงอย่างเดียวสามารถเพิ่มการสกัดของสารออกฤทธิ์ได้ดี เนื่องจากเอทานอลช่วยเพิ่มการละลายของสารที่มีชีวิตต่ำ อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพของการสกัดจะลดลงเมื่อเทียบกับการใช้ร่วมกับ Tween 80 การใช้ HPBCD ร่วมกับ Tween 80 เพียงอย่างเดียวมีข้อดีในการเพิ่มการละลายของสารออกฤทธิ์ที่ไม่ละลายน้ำ แต่เมื่อไม่มีเอทานอลร่วมด้วย อัตราการปลดปล่อยสารออกฤทธิ์บางชนิดอาจลดลง ในขณะที่การใช้ HPBCD เพียงอย่างเดียวมีข้อจำกัดในการเพิ่มความสามารถในการละลายของสารออกฤทธิ์ เนื่องจากไม่สามารถลดแรงตึงผิวของตัวทำละลายได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากผลการทดลอง พบว่าเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดคือการใช้ HPBCD ร่วมกับเอทานอลและ Tween 80 พร้อมกัน ซึ่งให้ประสิทธิภาพสูงสุดทั้งในแง่ของปริมาณสารสกัดและความเสถียรของสารสำคัญ

เมื่อเปรียบเทียบการสกัดด้วย Cyclodextrin-assisted Extraction (CAE) กับวิธีการสกัดแบบดั้งเดิม พบว่า CAE สามารถรักษาเสถียรภาพของสารออกฤทธิ์ได้ดีกว่าการหมักด้วยเมทานอล (Maceration using methanol) การทอดน้ำมัน (Hot oil extraction) และการใช้เฮกเซน (Hexane extraction) ซึ่งเป็นตัวทำละลายที่มีความไม่ชอบน้ำสูง ผลการศึกษาพบว่า CAE มีข้อได้เปรียบในด้านความเสถียรของสารสำคัญ โดยสามารถลดการสูญเสียของสารออกฤทธิ์ที่ไวต่อแสงและอุณหภูมิสูงได้ดีกว่าวิธีการสกัดแบบดั้งเดิม นอกจากนี้ CAE ยังช่วยลดการใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ที่อาจมีสารตกค้างในผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป ทำให้สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมยาและเครื่องสำอางได้อย่างปลอดภัย

โดยสรุป การใช้ HPBCD เป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพสูงในการสกัดสารออกฤทธิ์จากเหง้าไพล ซึ่งช่วยเพิ่มปริมาณสารที่สกัดได้และรักษาเสถียรภาพของสารสำคัญได้อย่างมีประสิทธิภาพ กระบวนการนี้ยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ลดการใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ และช่วยเพิ่มความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป นอกจากนี้ การศึกษานี้สามารถนำไปต่อยอดในการพัฒนาเทคโนโลยีการสกัดในระดับอุตสาหกรรม เพื่อใช้ในผลิตภัณฑ์ยาและเครื่องสำอางที่มีสารสกัดจากพืชสมุนไพร

5.2 การอภิปรายผล

5.2.1 บทบาทของ HPBCD ต่อประสิทธิภาพการสกัด

Hydroxypropyl- β -cyclodextrin (HPBCD) เป็นอนุพันธ์ของเบต้า-ไซโคลเด็กซ์ทรินที่ได้รับการดัดแปลงโครงสร้างทางเคมีเพื่อเพิ่มความสามารถในการละลายน้ำ ลดความเป็นพิษ และเพิ่มความปลอดภัยของโมเลกุลที่จับไว้ในโพรง (Loftsson & Brewster, 2010; Stella & He, 2008) คุณสมบัติเหล่านี้ทำให้ HPBCD เป็นหนึ่งในตัวเลือกที่โดดเด่นในการสกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากพืชสมุนไพร โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารที่มีความสามารถในการละลายน้ำต่ำ เช่น Curcuminoids, Phenylbutanoids และ Terpenoids ที่พบในเหง้าไพล

การเพิ่มความสามารถในการละลายของสารออกฤทธิ์ HPBCD มีโครงสร้างเป็นวงแหวนโพรงภายในที่มีลักษณะไม่ชอบน้ำ (hydrophobic cavity) และภายนอกที่ชอบน้ำ (hydrophilic exterior) ซึ่งสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อน (inclusion complex) กับสารที่ไม่ชอบน้ำ ส่งผลให้สารเหล่านั้นสามารถกระจายตัวในน้ำได้ดีขึ้น (Loftsson et al., 2005; Zhang et al., 2021) ในงานวิจัยของ Cid-Samamed et al. (2022) พบว่า HPBCD สามารถเพิ่มค่าการละลายของสารฟีนอลิกจากพืชได้อย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดอื่น และให้การละลายที่สูงกว่าเมื่ออยู่ในสถานะเดียวกัน

การปรับปรุงความเสถียรของสารออกฤทธิ์ เมื่อเกิด inclusion complex แล้ว HPBCD สามารถช่วยป้องกันสารออกฤทธิ์จากการเสื่อมสภาพที่เกิดจากปัจจัยภายนอก เช่น อุณหภูมิ แสง และออกซิเจน โดยโครงสร้างโพรงของ HPBCD ช่วยกักเก็บและป้องกันการสัมผัสกับปัจจัยเหล่านี้ได้ (Loftsson & Duchêne, 2007) งานวิจัยโดย Loftsson & Brewster (2010) รายงานว่า inclusion complex กับ HPBCD มีผลต่อการยืดอายุการเก็บรักษาของสาร flavonoids ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การลดการใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ HPBCD ช่วยให้สามารถสกัดสารออกฤทธิ์ได้โดยลดการใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น เมทานอลหรือเฮกเซน ซึ่งมักมีความเป็นพิษและต้องผ่านกระบวนการกำจัดที่ซับซ้อน (Zhang et al., 2021) การลดการใช้ตัวทำละลายเหล่านี้ยังสอดคล้องกับแนวคิด Green

Extraction ซึ่งเน้นกระบวนการผลิตที่ปลอดภัย เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และยั่งยืน (Fenyvesi & Sohajda, 2022)

การประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ HPBCD ได้รับการประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมเภสัชกรรม อาหาร และเครื่องสำอาง โดยมีเป้าหมายเพื่อเพิ่มการดูดซึม ลดความระคายเคือง และเพิ่มความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์ ยกตัวอย่างเช่น ในอุตสาหกรรมยาสามารถใช้ HPBCD เพื่อพัฒนา formulation ของยาที่มีความสามารถในการดูดซึมต่ำ ในเครื่องสำอางสามารถใช้เพื่อช่วยให้สารสกัดสมุนไพรสามารถละลายและซึมผ่านผิวหนังได้ดีขึ้น (Stella & He, 2008; Cid-Samamed et al., 2022)

จากคุณสมบัติเหล่านี้ HPBCD จึงนับเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ช่วยยกระดับคุณภาพของการสกัดสารออกฤทธิ์จากสมุนไพร และสามารถนำไปต่อยอดได้ในผลิตภัณฑ์หลากหลายประเภท โดยเฉพาะในกลุ่มผลิตภัณฑ์ที่ต้องการคุณสมบัติด้านความปลอดภัย ความเสถียร และความสามารถในการละลายที่ดีขึ้น

5.2.2 ผลของ Molecular Docking

การศึกษาผลของ Molecular Docking ต่อการสร้าง Inclusion Complex ระหว่าง Hydroxypropyl- β -Cyclodextrin (HPBCD) กับสารออกฤทธิ์จากเหง้าไพล เช่น กลุ่ม Curcuminoids และ Phenylbutanoids ถือเป็นขั้นตอนสำคัญในการทำความเข้าใจกลไกระดับโมเลกุลที่เกิดขึ้น เพื่อสนับสนุนการเลือกใช้ Cyclodextrin ที่เหมาะสม และพัฒนากระบวนการสกัดที่มีประสิทธิภาพและปลอดภัยมากยิ่งขึ้น

การสร้าง Inclusion Complex ระหว่าง HPBCD กับสารออกฤทธิ์ Molecular Docking ใช้เพื่อทำนายการจับตัวระหว่างโมเลกุลโฮสต์ (HPBCD) กับโมเลกุลเกสต์ (สารออกฤทธิ์) โดยการวิเคราะห์ Binding Energy ซึ่งแสดงถึงความเสถียรของ Complex ที่เกิดขึ้น ผลการจำลองพบว่า HPBCD สามารถเกิด Inclusion Complex กับ Curcumin ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีค่าพลังงานการจับในช่วง -5.0 ถึง -7.4 kcal/mol ซึ่งสอดคล้องกับงานของ Loftsson & Brewster (2010) ที่ระบุว่า Binding Energy ที่ต่ำกว่า -5 kcal/mol ถือว่าแสดงถึงการจับตัวที่มั่นคงในระดับชีวภาพ

การศึกษาของ Tian et al. (2021) ใช้ AutoDock Vina ในการวิเคราะห์การจับระหว่าง Curcumin และ HPBCD พบว่าโพรงของ HPBCD เหมาะสมในการตรึงหมู่ฟีนอลิกของ Curcumin ผ่านแรงแวนเดอร์วาลส์และพันธะไฮโดรเจน ส่งผลให้ Curcumin มีความละลายน้ำสูงขึ้นและความคงตัวดีขึ้น ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์ยาและอาหารได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ในระดับโครงสร้าง การวิเคราะห์โครงสร้างสามมิติของ Inclusion Complex แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างของสารออกฤทธิ์ เช่น DMPBD หรือ Compound D สามารถแทรกเข้าไปในโพรงของ HPBCD ได้ในลักษณะที่เสถียร โดยมีปฏิสัมพันธ์ระหว่างหมู่ OH ของ HPBCD กับหมู่ไฮดรอกซีฟีนอลของสารออกฤทธิ์ ซึ่งตรงกับผลของ Srihakulung et al. (2019) ที่ศึกษาการจับตัวระหว่าง HPBCD และสารจากสมุนไพรไทย เช่น ไพล และบัวบก โดยใช้ Molecular Docking และรายงานว่าแรงพันธะไฮโดรเจนและแรง Van der Waals เป็นกลไกหลักในการเสริมความเสถียรของ Inclusion Complex

Mohebbi et al. (2023) สรุปว่าการจับตัวระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินและสารต้านอนุมูลอิสระ เช่น Quercetin, Kaempferol และ Curcumin สามารถเสริมการละลายและลดการสลายตัวของตัวยาได้สถานะต่าง ๆ ได้อย่างมีนัยสำคัญ

Srihakulung et al. (2019) รายงานว่า Inclusion Complex ที่เกิดจาก HPBCD กับสารจากสมุนไพรไทยมี Binding Energy ต่ำกว่า -6 kcal/mol ในหลายกรณี ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในงานวิจัยนี้

Loftsson & Brewster (2010) อธิบายการใช้ Cyclodextrins ในผลิตภัณฑ์ทางเภสัชกรรม โดยระบุว่าค่าพลังงานต่ำบ่งชี้ถึง Complex ที่มีความมั่นคงสูง และมีแนวโน้มที่จะเสริมการดูดซึมทางชีวภาพได้ดี

Tian et al. (2021) เสริมว่า Inclusion Complex ของ Curcumin กับ HPBCD ส่งผลให้สามารถต้านการเสื่อมสลายจากแสงและความร้อนได้ดีขึ้นด้วย

ความสำคัญและข้อเสนอแนะจากการศึกษา การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า HPBCD มีศักยภาพในการเกิด Inclusion Complex กับสารออกฤทธิ์ในเหง้าไพลอย่างมีเสถียรภาพ ส่งผลต่อการเพิ่มการละลาย ความคงตัว และประสิทธิภาพของสารสกัด อย่างไรก็ตาม การใช้ Molecular Docking ควรควบคู่กับ Molecular Dynamics Simulation เพื่อจำลองพฤติกรรมของ Complex ในสถานะของเหลวจริง ซึ่งจะให้ข้อมูลที่ละเอียดขึ้นในระดับเวลา นอกจากนี้ควรมีการทดสอบทางห้องปฏิบัติการเพื่อยืนยันผลการจำลองและประเมินเสถียรภาพภายใต้สภาวะแวดล้อมต่าง ๆ เช่น pH แสง และอุณหภูมิ

5.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการสกัด

ในการศึกษานี้ มีการใช้กระบวนการ D-optimal Design และ Central Composite Design (CCD) เพื่อประเมินผลของ 9 ปัจจัยที่อาจมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการสกัดสารออกฤทธิ์จากเหง้าไพลโดยใช้ Cyclodextrin-assisted extraction (CAE) ได้แก่

1. ชนิดของไซโคลเด็กซ์ทริน (Cyclodextrin Type)

การเลือกชนิดของ Cyclodextrin (CD) เป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการสกัดสารออกฤทธิ์จากพืชสมุนไพรในกระบวนการ Cyclodextrin-assisted Extraction (CAE) โดยเฉพาะในกรณีของสารที่ไม่ละลายน้ำ เช่น curcuminoids และ phenylbutanoids ที่พบในเหง้าไพล (Zingiber montanum) จากผลการทดลองในงานวิจัยนี้ พบว่า Hydroxypropyl- β -Cyclodextrin (HPBCD) มีศักยภาพสูงสุดในการสกัดสารออกฤทธิ์ ทั้งในด้านการเพิ่มปริมาณสารกลุ่ม Compound D, DMPBD และ Curcuminoids ตลอดจนเพิ่มความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติของ HPBCD ที่สามารถละลายน้ำได้ดีและมีโพรงภายในที่เหมาะสมกับการกักเก็บโมเลกุลของสารที่ไม่ละลายน้ำ

งานวิจัยก่อนหน้านี้ เช่นของ Loftsson & Brewster (2010) ชี้ให้เห็นว่า HPBCD มีความสามารถในการสร้าง Inclusion Complex กับสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพได้ดีกว่าชนิดอื่น เนื่องจากการดัดแปรทางเคมีที่ช่วยเพิ่มการละลายน้ำและลดโอกาสการตกผลึกของ Inclusion Complex การศึกษาของ Tian et al. (2021) รายงานว่า HPBCD ช่วยเพิ่มการละลายของ curcumin ได้มากกว่า BCD ธรรมชาติถึง 7 เท่า โดยการสร้างพันธะไฮโดรเจนและปฏิสัมพันธ์แบบไฮโดรโฟบิกภายในโพรง ซึ่งนำไปสู่การเพิ่ม bioavailability และเสถียรภาพของสารในผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ Fan et al. (2022) ทำการศึกษาการจับตัวระหว่าง curcumin และ cyclodextrins ชนิดต่าง ๆ โดยใช้เทคนิค Molecular Docking และพบว่า HPBCD มีค่าพลังงานการจับตัวต่ำที่สุด และสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนร่วมกับกลุ่ม -OH ของ curcumin ได้มากที่สุด ส่งผลให้ Inclusion Complex มีความเสถียรสูงสุดเมื่อเทียบกับ BCD และ MBCD เช่นเดียวกับงานของ Akhgari et al. (2020) ที่แสดงให้เห็นว่า HPBCD ช่วยเพิ่มการละลายของสาร apigenin ได้สูงกว่า BCD และ GCD โดยการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสและความสามารถในการซึมผ่านของ Inclusion Complex

ชนิดของ Cyclodextrin เป็นปัจจัยที่มีผลอย่างยิ่งต่อประสิทธิภาพของการสกัด โดยเฉพาะ HPBCD ซึ่งได้รับการยืนยันในหลายงานวิจัยว่ามีคุณสมบัติเหมาะสมที่สุดในเชิงการเพิ่มการละลาย ความเสถียร และ bioavailability ของสารออกฤทธิ์จากสมุนไพร

2. ชนิดของการเติมแต่ง (Additive Type)

ในการสกัดสารออกฤทธิ์จากพืชสมุนไพรด้วย Cyclodextrin-assisted Extraction (CAE) การเลือกใช้สารเติมแต่ง (Additives) เช่น ตัวทำละลายร่วม (Co-solvent) และสารลดแรงตึงผิว (Surfactant) มีบทบาทสำคัญต่อการเพิ่มการละลายของสารออกฤทธิ์ การเกิด Inclusion Complex และประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดโดยรวมจากการศึกษานี้ มีการพิจารณาใช้ Tween 80 เป็น

สารเติมแต่งในระบบการสกัด โดยใช้ร่วมกับ HPBCD เพื่อเพิ่มความสามารถในการละลายของสารออกฤทธิ์ที่ไม่ละลายน้ำ เช่น curcuminoids และสารในกลุ่มฟีนอลิกจากเหง้าไพล

Tween 80 เป็นสารลดแรงตึงผิวที่ได้รับความนิยมในการใช้ร่วมกับ cyclodextrins ในกระบวนการสกัดจากพืชสมุนไพร โดยทำหน้าที่ลดแรงตึงผิวระหว่างน้ำกับสารที่ไม่ชอบน้ำ และช่วยให้สารออกฤทธิ์สามารถกระจายตัวในระบบน้ำได้ดีขึ้น

จากงานของ Yuan et al. (2006) พบว่า Tween 80 เมื่อใช้ร่วมกับ BCD สามารถเพิ่มการเคลื่อนที่และการละลายของสาร hexachlorobenzene ในดินได้ดีขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของ Tween 80 ในการเสริมการทำงานของ CD

Mousset et al. (2014) รายงานว่าสารลดแรงตึงผิวสามารถช่วยเพิ่มการละลายของสารโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (PAHs) โดยเฉพาะเมื่อใช้ร่วมกับ BCD ทำให้กระบวนการกำจัดมลพิษในดินมีประสิทธิภาพมากขึ้น

Fakhari et al. (2018) แสดงให้เห็นว่า Tween 80 ช่วยเพิ่มการแยกและตรวจวัดสาร Translucipromine enantiomers ได้อย่างแม่นยำ เมื่อใช้ร่วมกับ cyclodextrin ในเทคนิค Electromembrane Extraction และ Capillary Electrophoresis [Fakhari et al., 2018].

การเลือกใช้สารเติมแต่งในงานนี้ จากการทดลองในงานวิจัยนี้พบว่า Tween 80 ร่วมกับ HPBCD มีแนวโน้มช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัดสารออกฤทธิ์จากเหง้าไพล โดยเฉพาะในแผนการทดลองที่ใช้ทั้ง Ethanol และ Tween 80 ร่วมกัน มีค่าการตอบสนองที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับการใช้เพียงสารใดสารหนึ่ง ซึ่งอาจเป็นผลจากการทำงานเสริมกันของ Co-solvent และ Surfactant ในการลดแรงตึงผิวและเพิ่มการกระจายตัวของสารในระบบน้ำ

อย่างไรก็ตาม การใช้สารเติมแต่งต้องคำนึงถึงความปลอดภัย ความเข้ากันได้กับผลิตภัณฑ์สุดท้าย และต้นทุนในระดับอุตสาหกรรม การศึกษานี้จึงเป็นก้าวแรกที่สำคัญในการเลือกสารเติมแต่งที่เหมาะสมสำหรับการพัฒนากระบวนการ CAE ที่มีประสิทธิภาพและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

3. ความเข้มข้นของไซโคลเด็กซ์ทรีน (Cyclodextrin concentration)

ความเข้มข้นของไซโคลเด็กซ์ทรีน (Cyclodextrin) เป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการ Cyclodextrin-assisted Extraction (CAE) โดยตรง โดยเฉพาะในแง่ของการกักเก็บสารออกฤทธิ์ภายในโพรงไซโคลเด็กซ์ทรีน การเลือกความเข้มข้นที่เหมาะสมสามารถเพิ่มปริมาณสารฟีนอลิกและสารออกฤทธิ์อื่น ๆ ที่สกัดได้จากพืชสมุนไพรได้อย่างมีนัยสำคัญ

การศึกษาของ Cai et al. (2018) ได้สรุปไว้อย่างชัดเจนว่าการเพิ่มความเข้มข้นของไซโคลเด็กซ์ทรีนในกระบวนการ CAE ช่วยเสริมการละลายของสารฟีนอลิก และส่งเสริมการเกิด Inclusion

Complex ที่เสถียร อย่างไรก็ตาม หากความเข้มข้นมากเกินไป อาจทำให้เกิดการอิ่มตัว (saturation) ของระบบ ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกักเก็บและปลดปล่อยสารลดลงได้

ในกรณีของงานวิจัยที่สกัดสารจากเถาอ่อน (Rajha et al., 2015) พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นของ BCD ในช่วง 1–5% w/v ส่งผลให้ปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมด (Total Phenolic Content) เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อเกิน 5% w/v ประสิทธิภาพในการสกัดเริ่มคงที่หรือลดลงเล็กน้อย ซึ่งสะท้อนถึงแนวโน้มของการอิ่มตัวในระบบ CAE

การศึกษาล่าสุดโดย Radan et al. (2024) ที่สกัดสารจากดอก *Helichrysum plicatum* DC. ก็พบแนวโน้มเดียวกัน โดยความเข้มข้นที่เหมาะสมของ HPBCD สามารถเพิ่มทั้งการละลายและเสถียรภาพของสารสำคัญ เช่น flavonoids และกรดฟีนอลิก ได้อย่างชัดเจน แต่เมื่อเพิ่มเกินจุดหนึ่งความสามารถในการสกัดกลับลดลง

ในบริบทของการสกัดสารจากเหง้าไพล (*Zingiber montanum*) ซึ่งมีสารออกฤทธิ์ที่ไม่ละลายน้ำอย่าง curcuminoids และ phenylbutanoids การเลือกความเข้มข้นของ HPBCD ที่เหมาะสม เช่น ในช่วง 10–30 mM จึงเป็นสิ่งสำคัญ โดยระดับที่สูงเกินไปอาจลดการสร้าง Inclusion Complex หรือทำให้เกิดผลย้อนกลับได้

ความเข้มข้นของไซโคลเด็กซ์ทรินมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพในการสกัดสารออกฤทธิ์ในระบบ CAE การเลือกใช้ความเข้มข้นที่เหมาะสม เช่น 10–30 mM สำหรับ HPBCD ช่วยให้เกิด Inclusion Complex ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพิ่มการละลายและเสถียรภาพของสารสำคัญ และลดปัญหาการใช้สารทำละลายอินทรีย์ในการสกัดแบบเดิม

4. น้ำหนักของสมุนไพร (Liquid Solid Ratio)

การเพิ่มน้ำหนักของสมุนไพรในกระบวนการสกัดส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพในการดึงสารออกฤทธิ์ออกมาได้มากขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณสารตั้งต้นที่สามารถถูกสกัดได้ อย่างไรก็ตาม ในการศึกษาครั้งนี้ไม่ได้มุ่งเน้นเพื่อหาช่วงปริมาณที่เหมาะสมที่สุดของสมุนไพรโดยตรง แต่เลือกใช้อัตราส่วน 0.02 g/mL เป็นค่าคงที่ในการทดลอง เพื่อให้สามารถประเมินผลของปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลต่อการสกัดได้อย่างชัดเจนและไม่เกิดความสับสนจากตัวแปรร่วม หลายงานวิจัยสนับสนุนว่าอัตราส่วนของสมุนไพรต่อตัวทำละลาย (Liquid-to-Solid Ratio) เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการสกัดด้วย Cyclodextrin-assisted extraction (CAE)

Frangopoulos (2022) ศึกษาการสกัดฟีนอลจากเมล็ดฟีนูกรีกโดยใช้ deep eutectic solvent (DES) ร่วมกับ BCD และพบว่า liquid-solid ratio ที่เหมาะสมช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเกิด Inclusion Complex และการแยกสารได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Rajha et al. (2015) รายงานว่าในการสกัดพอลิฟีนอลจาก Vine Shoots การใช้อัตราส่วนสมุนไพรต่อตัวทำละลายที่เหมาะสมช่วยเพิ่มปริมาณสารสกัดและลดการสูญเสียสารสำคัญ โดยเฉพาะเมื่อใช้ร่วมกับ BCD ซึ่งช่วยเพิ่มความสามารถในการจับสารออกฤทธิ์ได้

Kazlauskaite et al. (2021) ศึกษาการเพิ่มผลผลิตของ isoflavones จาก *Trifolium pratense* L. โดยใช้ CAE และพบว่า liquid-solid ratio ที่พอเหมาะมีผลสำคัญต่อการรักษาความเสถียรของระบบการสกัด และช่วยให้ระบบไม่เกิดภาวะอิ่มตัวเร็วเกินไป

Albahari et al. (2018) ศึกษาการสกัดจากกากมะกอกด้วย pulsed ultrasound-assisted CAE และพบว่าอัตราส่วนของสมุนไพรที่เหมาะสมส่งผลให้สารพีนอลิกถูกสกัดออกมาในปริมาณสูงสุดโดยไม่ส่งผลให้ระบบเกิดความเข้มข้นเกินพอดี

Zhu et al. (2016) รายงานว่าในกระบวนการวิเคราะห์ห้องปฏิบัติการของพุทราจีน การใช้ CAE ร่วมกับ ultrahigh performance liquid chromatography และ liquid-solid ratio ที่เหมาะสมช่วยเพิ่มความแม่นยำและปริมาณของสารสกัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จากหลักฐานทั้งหมดนี้ สรุปได้ว่าเมื่อน้ำหนักของสมุนไพรในงานวิจัยนี้จะไม่ได้ออกปรับเปลี่ยนเป็นตัวแปรหลัก แต่ก็มีบทบาทสนับสนุนการสร้าง Inclusion Complex ที่มีประสิทธิภาพ และเหมาะสมสำหรับการศึกษาเชิงเปรียบเทียบผลของปัจจัยอื่นในการสกัด

5. เวลาที่ใช้ในการสกัด (Extraction Time)

เวลาที่ใช้ในการสกัดมีผลอย่างมากต่อปริมาณและคุณภาพของสารออกฤทธิ์ที่ได้จากพืชสมุนไพร โดยเฉพาะในกระบวนการ Cyclodextrin-assisted Extraction (CAE) ซึ่งเป็นระบบที่อาศัยการเกิด Inclusion Complex ระหว่าง cyclodextrins กับสารออกฤทธิ์ การควบคุมเวลาให้เหมาะสมจึงเป็นสิ่งสำคัญเพื่อให้เกิดการรวมตัวของโมเลกุลอย่างมีประสิทธิภาพ โดยไม่ก่อให้เกิดการเสื่อมสลายของสารสำคัญจากการสัมผัสกับตัวทำละลายหรือพลังงานที่ใช้ในการสกัดนานเกินไป

Rajha et al. (2015) ศึกษาการสกัดพอลิฟีนอลจาก Vine Shoots โดยใช้ BCD และพบว่าระยะเวลาที่ใช้ในการสกัดเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อปริมาณสารที่สกัดได้ โดยช่วงเวลาที่เหมาะสมจะช่วยให้เกิดการกักเก็บสารภายในโพรง CD ได้สูงสุด ก่อนที่ปริมาณจะเริ่มคงที่หรือมีแนวโน้มลดลงจากการเสื่อมสลายของสาร

Kazlauskaite et al. (2021) รายงานว่าเวลาสกัดที่ยาวนานเกินไปอาจส่งผลให้โครงสร้างของ Inclusion Complex ไม่เสถียร โดยเฉพาะในระบบที่มีความร้อนหรือพลังงานกลร่วมด้วย ดังนั้นการกำหนดช่วงเวลาที่เหมาะสมจึงต้องอาศัยการทดลองเพื่อหาจุดที่ให้สารออกฤทธิ์สูงสุดโดยไม่เกิดการเสื่อมสภาพ

Zhu et al. (2016) ศึกษาการสกัดองค์ประกอบของพุทราจีนด้วย CAE และรายงานว่าเวลาสกัดมีผลต่อการเกิด Inclusion Complex และประสิทธิภาพของการแยกสารด้วย UPLC-MS โดยพบว่าเวลาที่สั้นเกินไปอาจทำให้สารยังไม่สามารถรวมตัวกับ CD ได้ครบถ้วน ขณะที่เวลาที่ยาวเกินไปอาจนำไปสู่การลดลงของสารบางชนิด

Frangopoulos (2022) ระบุว่าระยะเวลาในการสกัดที่เหมาะสมมีผลต่อการเกิดปฏิสัมพันธ์ทางโครงสร้างระหว่าง CD กับพอลิฟินอล โดยเฉพาะเมื่อใช้ร่วมกับ deep eutectic solvents (DES) ซึ่งต้องควบคุมเวลาสกัดให้สอดคล้องกับความหนืดและพฤติกรรมของตัวทำละลาย

ในการศึกษานี้ มีการทดลองใช้ระยะเวลาในการสกัดตั้งแต่ 10-30 นาที เพื่อวิเคราะห์ผลของเวลาในการเกิด Inclusion Complex และประสิทธิภาพของการสกัดสารออกฤทธิ์จากเหง้าไพล พบว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาการสกัด ปริมาณสารออกฤทธิ์ที่ถูกสกัดออกมามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามเวลา อย่างไรก็ตาม เมื่อถึงระดับหนึ่ง ค่าการตอบสนองจะเริ่มคงที่หรือเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะอิ่มตัวของระบบการเกิด Inclusion Complex ดังนั้น การเลือกช่วงเวลาสกัดที่เหมาะสมในระบบ CAE จึงควรคำนึงถึงทั้งประสิทธิภาพในการเกิด Inclusion Complex และการรักษาเสถียรภาพของสารออกฤทธิ์ เพื่อให้ได้ผลการสกัดที่มีคุณภาพสูงสุด

6. พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ (Ultrasound Power)

การใช้พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ในกระบวนการสกัดสารออกฤทธิ์จากพืชสมุนไพรได้รับความสนใจอย่างแพร่หลาย เนื่องจากสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดได้โดยไม่ต้องใช้ตัวทำละลายที่รุนแรง Ultrasound-assisted Extraction (UAE) เมื่อใช้ร่วมกับ Cyclodextrin-assisted Extraction (CAE) จะช่วยกระตุ้นการแตกตัวของเซลล์พืช และเพิ่มการแพร่กระจายของสารออกฤทธิ์เข้าสู่ตัวทำละลายได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์สามารถสร้างปรากฏการณ์ "cavitation" ซึ่งเป็นการเกิดและสลายของฟองอากาศในของเหลวอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดแรงเฉือนและความร้อนเฉพาะจุดที่สามารถทำลายผนังเซลล์พืชได้ ส่งผลให้สารออกฤทธิ์ที่อยู่ในเซลล์สามารถหลุดออกมาสู่สารละลายได้ง่ายขึ้น และเสริมการเกิด Inclusion Complex ระหว่าง Cyclodextrin กับสารออกฤทธิ์ได้ดีขึ้น

Cai et al. (2018) รายงานว่าการใช้คลื่นอัลตราซาวด์ร่วมกับ Cyclodextrins สามารถเพิ่มปริมาณของสารโพลีฟินอลที่สกัดได้จากพืชสมุนไพรหลายชนิด โดยกระบวนการ cavitation ช่วยเร่งการปลดปล่อยสารออกฤทธิ์จากโครงสร้างเซลล์พืช ทำให้การสกัดมีประสิทธิภาพสูงขึ้นในระยะเวลาที่สั้นลง

Kazlauskaitė et al. (2021) ศึกษาการสกัดไอโซฟลาโวนจาก *Trifolium pratense* L. ด้วยวิธี CAE ร่วมกับพลังงานอัลตราซาวด์ และพบว่า การเพิ่มพลังงานคลื่นมีผลโดยตรงต่อการเพิ่มปริมาณสารที่สกัดได้ โดยเฉพาะเมื่อใช้ร่วมกับ β -CD ในระบบที่ควบคุมอุณหภูมิ

Albahari et al. (2018) ใช้คลื่นอัลตราซาวด์ร่วมกับ Cyclodextrin-enhanced extraction ในการสกัดสารออกฤทธิ์จาก Olive Pomace และพบว่าค่าการตอบสนองสูงสุดเกิดขึ้นที่ระดับพลังงานอัลตราซาวด์ที่เหมาะสม หากใช้พลังงานสูงเกินไปอาจส่งผลให้เกิดการสลายตัวของสารสำคัญบางชนิด

Rajha et al. (2015) รายงานว่าในระบบที่ใช้คลื่นอัลตราซาวด์ พลังงานที่เหมาะสมจะช่วยให้เสริมการก่อตัวของ Inclusion Complex และลดเวลาในการสกัด โดยไม่ทำลายโครงสร้างของสารออกฤทธิ์

Georgantzi et al. (2017) ศึกษาการสกัดโพลีฟีนอลจากสมุนไพรพื้นเมืองของกรีซ พบว่าเมื่อใช้พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ร่วมกับ CD และตัวทำละลายแบบ Deep Eutectic Solvent (DES) ปริมาณสารที่สกัดได้เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

ในการศึกษานี้ มีการทดลองใช้พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ในช่วง 140-280 W เพื่อตรวจสอบผลต่อประสิทธิภาพการสกัดสารออกฤทธิ์จากเหง้าไพล พบว่าเมื่อเพิ่มพลังงานคลื่น ปริมาณสารที่สกัดได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในช่วงระดับพลังงานปานกลาง อย่างไรก็ตาม เมื่อใช้พลังงานสูงเกินไปอาจส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างสารบางชนิด จึงควรควบคุมระดับพลังงานให้เหมาะสมเพื่อป้องกันการเสื่อมสลายของสารสำคัญ

7. ความเข้มข้นของเอทานอล (Ethanol Concentration)

การใช้เอทานอลเป็นตัวช่วยในกระบวนการสกัดมีความแพร่หลาย เนื่องจากเอทานอลสามารถลดแรงตึงผิวของระบบสกัด ทำให้การละลายของสารออกฤทธิ์ที่ไม่ชอบน้ำดีขึ้น โดยเฉพาะเมื่อใช้ร่วมกับไซโคลเด็กซ์ทริน (Cyclodextrin; CD) จะสามารถเสริมการก่อรูป Inclusion Complex ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในการศึกษา Cyclodextrin-assisted Extraction (CAE) ความเข้มข้นของเอทานอลที่เหมาะสมมีบทบาทสำคัญในการสร้างสภาพแวดล้อมที่เอื้อต่อการก่อตัวของ Inclusion Complex ระหว่าง CD และสารออกฤทธิ์ งานวิจัยหลายชิ้นแสดงให้เห็นว่าเอทานอลในระดับที่เหมาะสมสามารถช่วยให้โครงสร้างของ CD เปิดกว้างขึ้น ส่งผลให้การจับกับโมเลกุลของสารเป้าหมายมีประสิทธิภาพมากขึ้น ในทางตรงกันข้าม ความเข้มข้นของเอทานอลที่สูงเกินไปอาจลดความสามารถในการเกิด Inclusion Complex ได้ เนื่องจากเอทานอลอาจเข้าไปแย่งการจับกับโพรงของ CD ได้

Cai et al. (2018) รายงานว่า ความเข้มข้นของเอทานอลมีผลต่อการละลายและสกัดสารฟีนอลิกจากพืชสมุนไพร โดยพบว่าความเข้มข้นในช่วง 20-40% มีประสิทธิภาพดีที่สุดเมื่อใช้ร่วมกับไซโคลเด็กซ์ทริน เนื่องจากสมดุลระหว่างการลดแรงตึงผิวและการส่งเสริมการเกิด Inclusion Complex

Kazlauskaite et al. (2021) ศึกษาการใช้ Cyclodextrin-assisted extraction ของไอโซฟลาโวนจาก *Trifolium pratense* พบว่าการเพิ่มเอทานอลถึงระดับหนึ่งช่วยเร่งการสกัด แต่เมื่อเกินระดับที่เหมาะสมกลับส่งผลเสียต่อเสถียรภาพของ Inclusion Complex

Radan et al. (2024) รายงานว่าเอทานอลที่ผสมกับไซโคลเด็กซ์ทรินสามารถเพิ่มการสกัดสารฟีนอลิกจากดอก *Helichrysum plicatum* ได้อย่างมีนัยสำคัญเมื่อใช้ความเข้มข้นระหว่าง 20-30%

Rajha et al. (2015) ศึกษาการสกัดสารโพลีฟีนอลจาก Vine Shoots และพบว่าการใช้เอทานอลร่วมกับ BCD ที่ความเข้มข้นปานกลางให้ผลการสกัดสูงสุด โดยช่วยละลายและตรึงสารได้ดี

ในการศึกษานี้ มีการใช้เอทานอลในช่วงความเข้มข้น 20-30% w/w เพื่อประเมินผลร่วมกับ HPBCD และ Tween 80 ในระบบ CAE พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเอทานอลขึ้น การละลายของสาร Curcuminoids และ DMPBD จากเหง้าโพลีเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในช่วงต้น อย่างไรก็ตาม เมื่อความเข้มข้นเกิน 30% ประสิทธิภาพเริ่มลดลง ซึ่งอาจเกิดจากการแย่งพื้นที่ในโพรง CD หรือการลดความสามารถของระบบสกัดในการสร้าง Inclusion Complex ดังนั้น การเลือกความเข้มข้นของเอทานอลให้เหมาะสมในระบบ CAE จึงเป็นสิ่งสำคัญ เพื่อรักษาสมดุลระหว่างการลดแรงตึงผิว การละลายสารออกฤทธิ์ และการเกิด Inclusion Complex อย่างมีประสิทธิภาพ

8. ความเข้มข้นของสารเติมแต่ง (X8)

ความเข้มข้นของสารเติมแต่งเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อประสิทธิภาพของการสกัดสารออกฤทธิ์จากพืชสมุนไพร โดยเฉพาะเมื่อใช้ร่วมกับไซโคลเด็กซ์ทรินในกระบวนการ Cyclodextrin-assisted Extraction (CAE) ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มความสามารถในการละลายของสารที่ไม่ละลายน้ำ เช่น curcuminoids และสารฟีนอลิกในพืชสมุนไพร

ในการศึกษานี้ ได้มีการใช้สารเติมแต่งประเภทสารลดแรงตึงผิว ได้แก่ Tween 80 ซึ่งเป็น surfactant ที่ได้รับความนิยมในอุตสาหกรรมอาหารและเภสัชกรรม การใช้ Tween 80 ร่วมกับ HPBCD ช่วยเพิ่มการกระจายตัวของสารออกฤทธิ์ในสารละลายและส่งเสริมการเกิด Inclusion Complex ได้ดียิ่งขึ้น เนื่องจาก Tween 80 สามารถลดแรงตึงผิวระหว่างน้ำกับโมเลกุลของสารออกฤทธิ์ ส่งผลให้สารเข้าสู่โพรงของไซโคลเด็กซ์ทรินได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

งานวิจัยของ Hou et al. (2021) ศึกษาการสร้างนาโนอิมัลชันของน้ำมันอบเชยโดยใช้ HPBCD และ Tween 80 พบว่าเมื่อใช้ร่วมกันในอัตราส่วนที่เหมาะสม สามารถสร้างระบบที่มี

เสถียรภาพสูง มีประสิทธิภาพในการต้านแบคทีเรีย และเกิดการปลดปล่อยสารอย่างช้า ๆ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงบทบาทของ Tween 80 ในการช่วยเพิ่มความคงตัวและการควบคุมการปลดปล่อยของ Inclusion Complex ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จากผลการทดลองของ Hou et al. (2021) จึงสามารถอธิบายกลไกที่ Tween 80 ช่วยเสริมกระบวนการสกัดได้ โดยการทำหน้าที่เป็น co-solubilizer และ stabilizer ที่ช่วยให้โมเลกุลของสารออกฤทธิ์สามารถเข้ากับไซโคลเด็กซ์ทรีนได้ดีขึ้นในสภาวะที่มีความเข้มข้นเหมาะสม ส่งผลให้เพิ่มปริมาณสารที่สกัดได้ และยังรักษาเสถียรภาพของสารในสารละลายได้ยาวนานขึ้น

9. อุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด (Extraction Temperature)

อุณหภูมิเป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการสกัด โดยเฉพาะในระบบ Cyclodextrin-assisted Extraction (CAE) ซึ่งอุณหภูมิที่เหมาะสมสามารถช่วยเพิ่มอัตราการแพร่ของสารออกฤทธิ์ ลดความหนืดของตัวทำละลาย และกระตุ้นการเกิด Inclusion Complex ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม หากอุณหภูมิสูงเกินไปอาจส่งผลให้สารออกฤทธิ์เสื่อมสภาพหรือเกิดการสลายตัวได้

กลไกที่อุณหภูมิส่งผลต่อการสกัดในระบบ CAE เมื่ออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นช่วยให้ Cyclodextrin ขยายโครงสร้างโพรงวงแหวนได้ดีขึ้น ส่งผลให้จับกับสารออกฤทธิ์ได้มีประสิทธิภาพ อุณหภูมิสูงสามารถลดแรงตึงผิวของระบบสกัด และเพิ่มการละลายของสารที่ไม่ชอบน้ำ อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิที่สูงเกินไปอาจทำลายพันธะไฮโดรเจนใน Inclusion Complex และเร่งการสลายตัวของสารบางชนิดได้

Cai et al. (2018) รายงานว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในช่วง 40–60 °C ส่งเสริมการสกัดสารโพลีฟีนอลจากพืชสมุนไพรเมื่อใช้ร่วมกับ Cyclodextrin โดยอุณหภูมิช่วยเพิ่มการเคลื่อนที่ของโมเลกุลและการกระจายตัวของ Cyclodextrin ในสารละลาย

Frangopoulos (2022) ศึกษาการใช้ DES และ BCD ในการสกัดสารจากเมล็ด Fenugreek พบว่าอุณหภูมิที่สูงขึ้นในช่วง 30–60 °C สามารถเพิ่มปริมาณของสารต้านอนุมูลอิสระที่สกัดได้อย่างมีนัยสำคัญ

Kazlauskaitė et al. (2021) รายงานว่าการควบคุมอุณหภูมิให้เหมาะสมในการใช้ระบบ CAE มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพของสารออกฤทธิ์ โดยเฉพาะสารไอโซฟลาโวนที่ไวต่อความร้อน

Georgantzi et al. (2017) ศึกษาการสกัดสารโพลีฟีนอลโดยใช้ BCD ร่วมกับ Deep Eutectic Solvent (DES) และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมช่วยเพิ่มการเกิด Inclusion Complex ได้ชัดเจน

Rajha et al. (2015) พบว่าอุณหภูมิระดับปานกลาง (ประมาณ 50 °C) ช่วยให้การสกัดโพลีฟีนอลจาก Vine Shoots มีประสิทธิภาพสูงขึ้นโดยไม่ทำให้สารสำคัญเสื่อมคุณภาพ

ในงานวิจัยนี้ ได้ประเมินอุณหภูมิในช่วง 40-60 °C เพื่อศึกษาผลต่อการสกัดสารสำคัญจากเหง้าโพลโดยใช้ระบบ HPBCD-assisted Extraction พบว่าอุณหภูมิที่สูงขึ้นในช่วง 40-60 °C ส่งผลให้ปริมาณสารที่สกัดได้เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยอาจเกิดจากการเพิ่มการแพร่ของสารออกฤทธิ์ และการขยายตัวของโครงสร้าง Cyclodextrin อย่างไรก็ดีตาม เมื่ออุณหภูมิสูงถึง 60 °C ปริมาณสารที่สกัดได้เริ่มลดลง ซึ่งอาจเกิดจากการเสื่อมสภาพของสารสำคัญภายใต้ความร้อน ดังนั้น การควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งสำคัญในระบบ CAE เพื่อรักษาคุณภาพของสารออกฤทธิ์ และเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัดให้ได้สูงสุด

โดยสรุปแล้วจากการศึกษาปัจจัยทั้ง 9 ประการที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการสกัดสารออกฤทธิ์จากเหง้าโพลในระบบ Cyclodextrin-assisted Extraction (CAE) พบว่าทุกปัจจัยล้วนมีบทบาทสำคัญในการส่งเสริมหรือยับยั้งกระบวนการเกิด Inclusion Complex ระหว่างสารออกฤทธิ์และ Cyclodextrin โดยมีทั้งปัจจัยทางเคมี เช่น ชนิดและความเข้มข้นของ Cyclodextrin สารเติมแต่ง และเอทานอล ตลอดจนปัจจัยทางกายภาพ เช่น อุณหภูมิ พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ และเวลาในการสกัด ซึ่งต้องได้รับการควบคุมให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม

HPBCD ได้รับการยืนยันว่าเป็น Cyclodextrin ที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในระบบนี้ โดยสามารถเพิ่มการละลายและเสถียรภาพของสารออกฤทธิ์ได้อย่างชัดเจน เมื่อใช้ร่วมกับ Tween 80 และเอทานอลในความเข้มข้นที่พอเหมาะจะสามารถส่งเสริมการเกิด Inclusion Complex ได้ดีขึ้น ปริมาณของ Cyclodextrin และสารเติมแต่งที่ใช้จำเป็นต้องถูกกำหนดอย่างเหมาะสมเพื่อหลีกเลี่ยงภาวะอึดตัวหรือผลย้อนกลับที่อาจเกิดขึ้น

ปัจจัยทางกายภาพ เช่น เวลา อุณหภูมิ และพลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ มีความสัมพันธ์กับการแพร่ของโมเลกุล การแตกตัวของผนังเซลล์พืช และเสถียรภาพของสารออกฤทธิ์ ซึ่งต้องควบคุมภายใต้ช่วงที่ไม่รุนแรงเกินไปเพื่อหลีกเลี่ยงการสลายตัวของสารสำคัญ ในขณะที่น้ำหนักของสมุนไพร (Liquid-Solid Ratio) แม้จะไม่ได้เป็นปัจจัยหลักในการปรับค่า แต่ก็มีผลในด้านปริมาณของสารที่สามารถสกัดได้ในแต่ละระบบ

ดังนั้น การออกแบบการทดลองและการควบคุมปัจจัยต่าง ๆ อย่างเหมาะสมในระบบ CAE จึงเป็นหัวใจสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดสารออกฤทธิ์จากพืชสมุนไพรได้อย่างยั่งยืนและปลอดภัย โดยการศึกษาสามารถปูทางสำหรับการพัฒนาเทคนิค CAE ให้สามารถประยุกต์ใช้ได้จริงในระดับอุตสาหกรรมในอนาคต

5.2.4 การเปรียบเทียบวิธีการสกัดแบบดั้งเดิมและการใช้ Cyclodextrins

การสกัดสารออกฤทธิ์จากพืชสมุนไพร traditionally ดำเนินการด้วยวิธีการทางกล เช่น การตำ การทอดน้ำมัน หรือการใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น เมทานอล เอทานอล หรือเฮกเซน วิธีการเหล่านี้แม้จะให้ผลการสกัดที่ดีในด้านปริมาณ แต่มีข้อเสียหลายประการ เช่น การใช้พลังงานสูง อุณหภูมิที่อาจทำให้สารออกฤทธิ์สลายตัว และการตกค้างของตัวทำละลายในผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้ายที่อาจส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยของผู้บริโภคและสิ่งแวดล้อม (Reid et al., 2000; Sharma & Baldi, 2016)

ในทางตรงกันข้าม Cyclodextrin-assisted Extraction (CAE) เป็นแนวทางใหม่ที่เน้นการใช้ไซโคลเด็กซ์ทรีน (Cyclodextrin; CD) เพื่อเพิ่มการละลายและเสถียรภาพของสารออกฤทธิ์ที่ไม่ละลายน้ำ โดยเฉพาะสารกลุ่มฟีนอลิกและคูร์คูมินอยด์ CAE ทำงานผ่านการเกิด Inclusion Complex ระหว่าง CD และสารเป้าหมาย ซึ่งสามารถเพิ่มการละลาย ลดการใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ และช่วยรักษาคุณภาพของสารสำคัญได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Loftsson & Brewster, 2010; Cai et al., 2018)

ในการศึกษา CAE โดยใช้ HPBCD สามารถเพิ่มปริมาณสาร Compound D, DMPBD และ Curcuminoids ที่สกัดได้จากเหง้าโพลได้อย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับการใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ล้วน เช่น การหมักด้วยเมทานอล อย่างไรก็ตาม ผลการเปรียบเทียบพบว่าค่าการตอบสนอง (Response) ของสารสกัดจากการใช้ HPBCD ไม่ได้แตกต่างจากวิธีดั้งเดิมอย่างมีนัยสำคัญในบางกรณี แต่มีข้อได้เปรียบในด้านคุณภาพของสารสกัด เช่น ความเสถียร และความปลอดภัยที่สูงขึ้น

แม้ว่าต้นทุนของ HPBCD จะสูงกว่าวิธีดั้งเดิม แต่วิธี CAE มีความปลอดภัยมากกว่าในด้านสุขภาพและสิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังสามารถหลีกเลี่ยงการใช้ตัวทำละลายที่เป็นพิษ และลดกระบวนการกำจัดสารตกค้าง ซึ่งในอุตสาหกรรมที่ให้ความสำคัญกับความยั่งยืน เช่น อุตสาหกรรมยาและเครื่องสำอาง วิธี CAE จึงถือเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ (Kazlauskaitė et al., 2021; Radan et al., 2024)

นอกจากนี้ ยังมีงานวิจัยที่สนับสนุนแนวทางของ CAE เช่น งานของ Cid-Samamed et al. (2022) ที่พบว่า CAE สามารถเพิ่มการละลายและคงสภาพของสารฟีนอลิกจากพืชได้ดีกว่าวิธีดั้งเดิม โดยไม่ต้องใช้ตัวทำละลายที่เป็นอันตราย ในขณะที่งานของ Rajha et al. (2015) ยืนยันว่า CAE ให้ผลสกัดที่ดีเทียบเท่าหรือสูงกว่าวิธีการแบบเดิมในหลายชนิดพืช

ดังนั้น แม้ว่าค่าปริมาณสารที่สกัดได้ในบางกรณีจาก CAE อาจยังไม่แตกต่างชัดเจนจากวิธีดั้งเดิม แต่ข้อได้เปรียบของวิธี CAE ในด้านความปลอดภัย เสถียรภาพ ความสามารถในการควบคุม

กระบวนการ และแนวทาง Green Extraction ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ทำให้ CAE เป็นเทคนิคที่มีศักยภาพสูงและควรได้รับการพัฒนาและประยุกต์ใช้อย่างต่อเนื่องในอนาคต

5.2.5 บทบาทของสารช่วยทางเภสัชกรรมในการสกัดด้วย Cyclodextrins

การใช้สารช่วยทางเภสัชกรรม (Pharmaceutical Excipients) ในกระบวนการสกัด Cyclodextrin-assisted Extraction (CAE) มีบทบาทสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพการละลายของสารออกฤทธิ์ที่ไม่ชอบน้ำ โดยเฉพาะในระบบที่ใช้ Cyclodextrin (CD) เช่น HPBCD เป็นสารช่วยกักเก็บโมเลกุลของสารสำคัญผ่านการเกิด Inclusion Complex ซึ่งการใช้ร่วมกับ excipients อย่างเอทานอลและสารลดแรงตึงผิว (surfactants) เช่น Tween 80 ช่วยเสริมการทำงานของ CD ได้อย่างชัดเจน

Ethanol เป็น Co-solvent เอทานอลเป็นตัวทำละลายร่วมที่นิยมใช้ในระบบการสกัดด้วย CD เนื่องจากสามารถลดแรงตึงผิวของระบบสกัด ช่วยให้สารออกฤทธิ์กระจายตัวได้ดีขึ้น และเพิ่มความสามารถในการซึมเข้าโพรงของ CD ได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Cai et al., 2018) อย่างไรก็ตาม ความเข้มข้นของเอทานอลที่สูงเกินไปอาจลดประสิทธิภาพของการเกิด Inclusion Complex ได้เช่นกัน เนื่องจากเอทานอลอาจแย่งตำแหน่งกับสารเป้าหมายในการเข้าสู่โพรง CD (Kazlauskaitė et al., 2021; Radan et al., 2024)

Tween 80 เป็นสารลดแรงตึงผิว Tween 80 มีบทบาทในการลดแรงตึงผิวและเพิ่มความสามารถในการละลายของสารออกฤทธิ์ โดยช่วยให้สารที่ไม่ละลายน้ำสามารถกระจายตัวในระบบน้ำได้ดีขึ้น และเพิ่มโอกาสในการเกิด Inclusion Complex ร่วมกับ HPBCD ได้อย่างมีประสิทธิภาพ งานของ Hou et al. (2021) แสดงให้เห็นว่าการใช้ HPBCD ร่วมกับ Tween 80 ในการสร้างนาโนอิมัลชันของน้ำมันหอมระเหยช่วยเพิ่มเสถียรภาพ และควบคุมการปลดปล่อยสารได้อย่างช้า ๆ

การทำงานร่วมกันแบบเสริมฤทธิ์ การใช้เอทานอลและ Tween 80 ร่วมกันสามารถเสริมฤทธิ์ในการปรับสภาพแวดล้อมของระบบสกัดให้เหมาะสมกับการเกิด Inclusion Complex ได้ดียิ่งขึ้น การศึกษาของ Yuan et al. (2006) และ Mousset et al. (2014) แสดงให้เห็นว่าการใช้ co-solvent และ surfactant ร่วมกับ CD มีผลในการเพิ่มอัตราการละลาย การเคลื่อนที่ และการจับตัวของสารเป้าหมายได้ดีกว่าเมื่อใช้เพียงอย่างเดียวอย่างหนึ่ง

ความสำคัญในระบบ CAE จากผลการทดลองของงานวิจัยนี้พบว่าแผนการทดลองที่ใช้ทั้งเอทานอลและ Tween 80 ร่วมกับ HPBCD ให้ค่าการตอบสนองสูงกว่าการใช้เพียงอย่างเดียวอย่างหนึ่ง

ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดของการเสริมฤทธิ์ในระบบสกัดแบบหลายองค์ประกอบ โดยเฉพาะในกรณีของการสกัดสารที่มีความไม่ชอบน้ำสูง เช่น curcuminoids และ phenylbutanoids

แนวโน้มการประยุกต์ใช้ การใช้สารช่วยทางเภสัชกรรมร่วมกับ CD ในระบบ CAE มีศักยภาพสูงในการพัฒนาไปใช้ในระดับอุตสาหกรรม เนื่องจากช่วยเพิ่มความสามารถในการสกัด ลดการใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ที่เป็นอันตราย และส่งเสริมแนวคิด Green Extraction ซึ่งเป็นเป้าหมายสำคัญในอุตสาหกรรมเภสัชกรรมและเครื่องสำอางในปัจจุบัน (Sharma & Baldi, 2016; Fenyvesi & Sohajda, 2022)

5.2.6 Green Extraction และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

Green Extraction หรือการสกัดเชิงนิเวศเป็นแนวทางที่ได้รับความนิยมอย่างมากในวงการอุตสาหกรรมอาหาร ยา และเครื่องสำอาง เนื่องจากเป็นกระบวนการที่มุ่งเน้นการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ลดการใช้พลังงานและตัวทำละลายที่เป็นพิษ รวมถึงเพิ่มความปลอดภัยต่อผู้บริโภค (Chemat et al., 2012) โดยในบริบทของการสกัดสารออกฤทธิ์จากพืชสมุนไพร การประยุกต์ใช้ Cyclodextrin-assisted Extraction (CAE) ถือเป็นหนึ่งในเทคนิค Green Extraction ที่มีศักยภาพสูง

การลดการใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ที่เป็นพิษ การใช้ Cyclodextrin เช่น HPBCD ช่วยลดความจำเป็นในการใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น เมทานอล หรือเฮกเซน ที่อาจตกค้างในผลิตภัณฑ์และก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อสุขภาพของผู้บริโภค งานของ Kazlauskaite et al. (2021) และ Radan et al. (2024) แสดงให้เห็นว่า HPBCD สามารถเพิ่มการละลายและป้องกันการเสื่อมสภาพของสารฟีนอลิกโดยไม่ต้องพึ่งพาตัวทำละลายที่เป็นอันตราย

การลดการปล่อยสารระเหยอินทรีย์ (VOCs) การใช้ระบบน้ำร่วมกับ Cyclodextrins แทนตัวทำละลายอินทรีย์ยังช่วยลดการปล่อยสารอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Organic Compounds: VOCs) ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งของมลภาวะทางอากาศและการเกิดภาวะเรือนกระจก (Fenyvesi & Sohajda, 2022)

การเพิ่มความปลอดภัยต่อผู้บริโภค ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการ CAE มีแนวโน้มที่จะมีความปลอดภัยสูงกว่า เนื่องจากลดความเสี่ยงของการตกค้างของตัวทำละลาย อีกทั้ง Cyclodextrins โดยเฉพาะ HPBCD ยังได้รับการรับรองความปลอดภัยจากองค์การอาหารและยา (FDA) ให้สามารถใช้ในผลิตภัณฑ์บริโภคได้ (Loftsson & Brewster, 2010)

การสนับสนุนแนวทางการผลิตอย่างยั่งยืน Green Extraction ไม่เพียงแต่ลดการใช้สารเคมี แต่ยังช่วยลดพลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิต เช่น การลดอุณหภูมิหรือเวลาในการสกัด ผ่านการใช้

เทคนิคเสริม เช่น Ultrasound-assisted Extraction (UAE) ร่วมกับ CAE ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการสกัดในเวลาที่สูงลงและอุณหภูมิต่ำกว่าเดิม (Cai et al., 2018)

ความสามารถในการใช้ในระดับอุตสาหกรรม จากงานของ Sharma & Baldi (2016) และ Conceição et al. (2018) ได้แสดงให้เห็นว่า CAE สามารถปรับใช้ในระบบอุตสาหกรรมได้จริง โดยมีความยืดหยุ่นสูง ไม่ต้องใช้เครื่องมือพิเศษมาก และสามารถปรับเข้ากับกระบวนการผลิตที่ต้องการความปลอดภัยและคุณภาพสูง

การสกัดด้วย Cyclodextrins โดยเฉพาะ HPBCD ถือเป็นองค์ประกอบสำคัญของแนวทาง Green Extraction ที่ไม่เพียงแต่เพิ่มประสิทธิภาพในการสกัดสารออกฤทธิ์จากพืชสมุนไพร แต่ยังช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ลดการใช้ตัวทำละลายที่เป็นอันตราย เพิ่มความปลอดภัยต่อผู้บริโภค และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้จริงในระดับอุตสาหกรรม

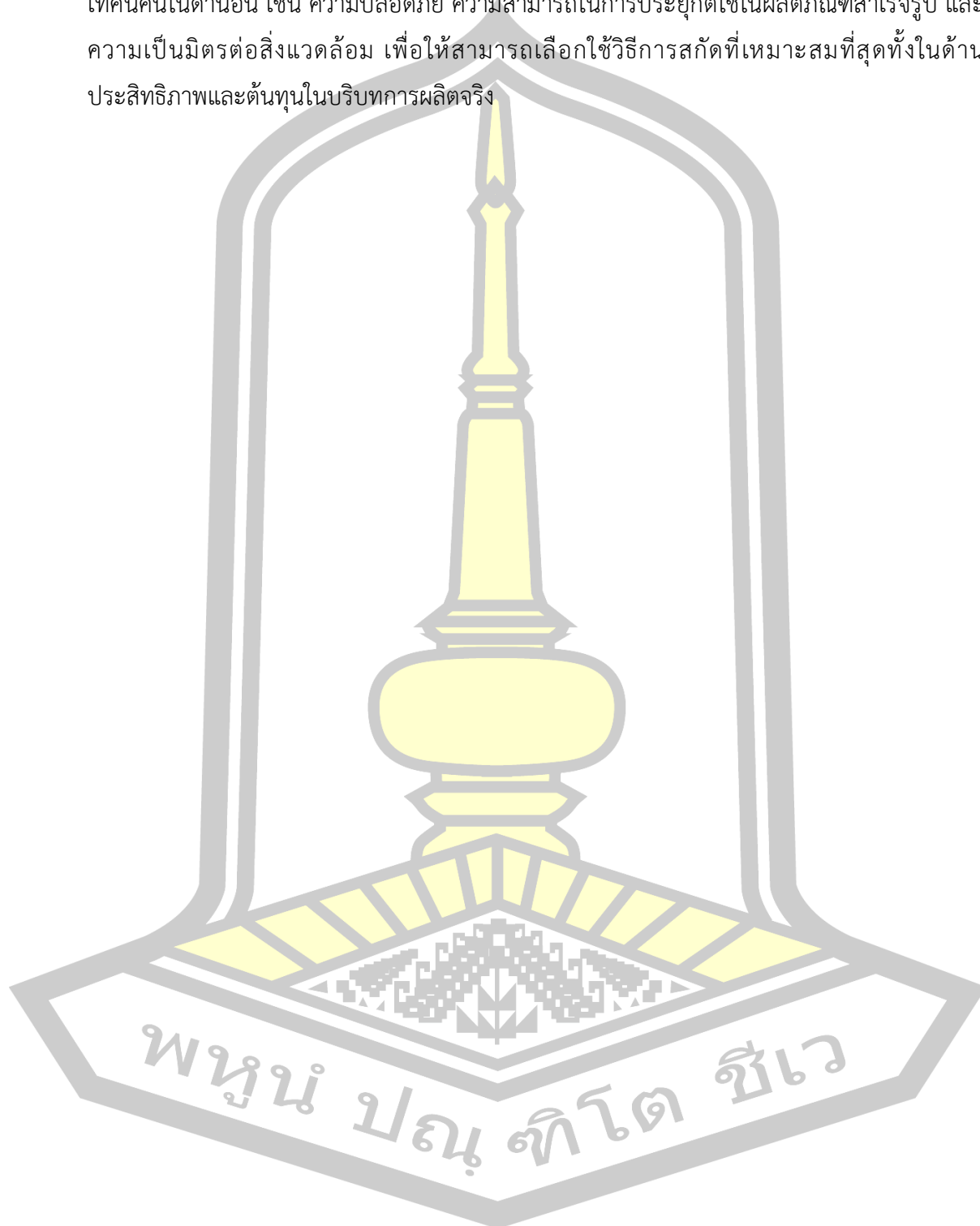
5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางในอนาคต

จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า HPBCD เป็นสารช่วยสกัดที่มีประสิทธิภาพสูงในการเพิ่มการละลายของสารออกฤทธิ์ที่ไม่ละลายน้ำ และช่วยรักษาเสถียรภาพของสารสำคัญได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม ต้นทุนของ HPBCD ที่สูงกว่าวิธีการสกัดแบบดั้งเดิมยังคงเป็นอุปสรรคสำคัญต่อการนำไปใช้ในระดับอุตสาหกรรม ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาต่อยอดเกี่ยวกับการพัฒนาเทคนิคที่สามารถลดต้นทุนของ HPBCD รวมถึงการปรับปรุงกระบวนการสกัดให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ควรมีการศึกษาถึงผลกระทบระยะยาวของ Inclusion Complex ในผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป และการศึกษาการนำเทคนิคนี้ไปใช้ในอุตสาหกรรมที่หลากหลาย เช่น อุตสาหกรรมอาหารเสริมและเภสัชภัณฑ์ เพื่อให้สามารถนำ HPBCD ไปประยุกต์ใช้ได้อย่างกว้างขวางและมีประสิทธิภาพมากขึ้นในอนาคต

นอกจากนี้ ควรมีการศึกษาคงตัว (Stability study) ของสารสกัดจากเหง้าโพลีที่อยู่ในรูป Inclusion Complex ภายใต้สภาวะการเก็บรักษาต่าง ๆ เพื่อประเมินศักยภาพในการนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์เชิงพาณิชย์ รวมถึงการศึกษากาทำให้แห้ง (Drying process) เช่น การใช้ Spray drying หรือ Freeze drying เพื่อเปลี่ยนรูปแบบของสารสกัดให้อยู่ในรูปผงแห้ง ซึ่งจะเพิ่มความสะดวกในการเก็บรักษา การขึ้นสูตรตำรับ และเพิ่มอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์

แม้ว่าการใช้เทคนิค Cyclodextrin-assisted Extraction (CAE) จะเป็นนวัตกรรมที่ช่วยเพิ่มความสามารถในการสกัดสารออกฤทธิ์และปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพของสารสกัด แต่จากการทดลองเปรียบเทียบพบว่า ปริมาณสารสำคัญที่ได้จาก CAE ยังไม่แตกต่างอย่างชัดเจนจากการสกัดแบบดั้งเดิมด้วยการหมักในเมทานอล (Methanol maceration) ในบางกรณี ขณะที่ต้นทุนของ Cyclodextrins โดยเฉพาะ HPBCD อยู่ในระดับที่ค่อนข้างสูง จึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับ

ความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ (Cost-effectiveness) และการวิเคราะห์ประโยชน์เชิงเปรียบเทียบของเทคนิคนี้ในด้านอื่น เช่น ความปลอดภัย ความสามารถในการประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป และความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เพื่อให้สามารถเลือกใช้วิธีการสกัดที่เหมาะสมที่สุดในด้านประสิทธิภาพและต้นทุนในบริบทการผลิตจริง



บรรณานุกรม

- Abdolmaleki, A., Ghasemi, F., & Ghasemi, J. B. (2017). Computer-aided drug design to explore cyclodextrin therapeutics and biomedical applications. *Chemical Biology & Drug Design*, 89(2), 257-268.
- Agarwal, S., & Mehrotra, R. J. J. C. (2016). An overview of molecular docking. *JSM chem*, 4(2), 1024-1028.
- Ahuja, A., Baboota, S., Ali, J., & Mustafa, G. (2011). Cyclodextrins as potential excipients in pharmaceutical formulations: solubilizing and stabilizing effects. In *Cyclodextrins in Pharmaceuticals, Cosmetics, and Biomedicine* (pp. 19-43). John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA.
- Akhgari, A., Valizadeh, H., & Montaseri, H. (2020). Comparative study on inclusion complex formation between apigenin and three cyclodextrins using phase-solubility study and molecular modeling. *Journal of Inclusion Phenomena and Macrocyclic Chemistry*, 98(3-4), 203-212.
- Alaeddini, A., Yang, K., & Murat, A. (2013). ASRSM: A sequential experimental design for response surface optimization. *Quality and Reliability Engineering International*, 29(2), 241-258.
- Alibante, A., Lakka, A., Bozinou, E., Chatzilazarou, A., Lalas, S., & Makris, D. P. (2021). Integrated green process for the extraction of red grape pomace antioxidant polyphenols using ultrasound-assisted pretreatment and β -cyclodextrin. *Beverages*, 7(3), 59.
- Albahari, P., Jug, M., Radić, K., Jurmanović, S., Brnčić, M., Brnčić, S. R., & Čepo, D. V. (2018). Characterization of olive pomace extract obtained by cyclodextrin-enhanced pulsed ultrasound assisted extraction. *LWT*, 92, 22-31

- Ameer, K., Shahbaz, H. M., & Kwon, J. H. (2017). Green extraction methods for polyphenols from plant matrices and their byproducts: A review. *Comprehensive reviews in food science and food safety*, 16(2), 295-315.
- Armenta, S., Garrigues, S., Esteve-Turrillas, F. A., & de la Guardia, M. (2019). Green extraction techniques in green analytical chemistry. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 116, 248-253.
- Barros, M. C., Silva, D. C., Estes, M. A., Cabral, A. M., Veiga, F. J., & Ribeiro, A. C. (2015). Diffusion coefficients of β -cyclodextrin sulfated sodium salt in aqueous solutions. *The Journal of Chemical Thermodynamics*, 87, 117-121.
- Bozinou, E., Lakka, A., Poulitaniti, K., Lalas, S., & Makris, D. P. (2021). Cyclodextrins as high-performance green co-solvents in the aqueous extraction of polyphenols and anthocyanin pigments from solid onion waste. *European Food Research and Technology*, 247, 2831-2845.
- Bua-in, S., & Paisooksantivatana, Y. (2009). Essential oil and antioxidant activity of Cassumunar ginger (*Zingiberaceae*: *Zingiber montanum* (Koenig) Link ex Dietr.) collected from various parts of Thailand. *Agriculture and Natural Resources*, 43(3), 467-475.
- Cai, R., Yuan, Y., Cui, L., Wang, Z., & Yue, T. (2018). Cyclodextrin-assisted extraction of phenolic compounds: Current research and future prospects. *Trends in Food Science & Technology*, 79, 19-27.
- Chadwick, V. S., Phillips, S. F., & Hofmann, A. F. (1977). Measurements of intestinal permeability using low molecular weight polyethylene glycols (PEG 400): I. Chemical analysis and biological properties of PEG 400. *Gastroenterology*, 73(2), 241-246.
- Chakroun, D., Grigorakis, S., Loupassaki, S., & Makris, D. P. (2021). Enhanced-performance extraction of olive (*Olea europaea*) leaf polyphenols using L-

lactic acid/ammonium acetate deep eutectic solvent combined with β -cyclodextrin: Screening, optimisation, temperature effects and stability. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 11, 1125-1136.

Chemat, F., Vian, M. A., & Cravotto, G. (2012). Green extraction of natural products: Concept and principles. *International journal of molecular sciences*, 13(7), 8615-8627.

Cid-Samamed, A., Rakmai, J., Mejuto, J. C., Simal-Gandara, J., & Astray, G. (2022). Cyclodextrins inclusion complex: Preparation methods, analytical techniques and food industry applications. *Food Chemistry*, 384, 132467.

Conceicao, J., Adeoye, O., Cabral-Marques, H. M., & Lobo, J. (2018). Cyclodextrins as drug carriers in pharmaceutical technology: the state of the art. *Current Pharmaceutical Design*, 24(13), 1405-1433.

Crini, G. (2014). A history of cyclodextrins. *Chemical reviews*, 114(21), 10940-10975.

Crini, G., Fourmentin, S., Fenyvesi, É., Torri, G., Fourmentin, M., & Morin-Crini, N. (2018). Cyclodextrins, from molecules to applications. *Environmental chemistry letters*, 16, 1361-1375.

Choudhury, H., Pandey, M., Hua, C. K., Mun, C. S., Jing, J. K., Kong, L., ... & Kesharwani, P. (2018). An update on natural compounds in the remedy of diabetes mellitus: A systematic review. *Journal of traditional and complementary medicine*, 8(3), 361-376.

da Rocha Neto, A. C., da Rocha, A. B. D. O., Maraschin, M., Di Piero, R. M., & Almenar, E. (2018). Factors affecting the entrapment efficiency of β -cyclodextrins and their effects on the formation of inclusion complexes containing essential oils. *Food Hydrocolloids*, 77, 509-523.

- Davis, M. E., & Brewster, M. E. (2004). Cyclodextrin-based pharmaceuticals: past, present and future. *Nature reviews Drug discovery*, 3(12), 1023-1035.
- Del Valle, E. M. (2004). Cyclodextrins and their uses: a review. *Process biochemistry*, 39(9), 1033-1046.
- Devkota, H. P., Paudel, K. R., Hassan, M. M., Dirar, A. I., Das, N., Adhikari-Devkota, A., ... & Dua, K. (2021). Bioactive compounds from *Zingiber montanum* and their pharmacological activities with focus on zerumbone. *Applied Sciences*, 11(21), 10205.
- Diamanti, A. C., Igoumenidis, P. E., Mourtzinou, I., Yannakopoulou, K., & Karathanos, V. T. (2017). Green extraction of polyphenols from whole pomegranate fruit using cyclodextrins. *Food Chemistry*, 214, 61-66.
- El Darra, N., Rajha, H. N., Debs, E., Saleh, F., El-Ghazzawi, I., Louka, N., & Maroun, R. G. (2018). Comparative Study between Ethanolic and β -Cyclodextrin Assisted Extraction of Polyphenols from Peach Pomace. *International Journal of Food Science*, 2018(1), 9491681.
- Fan, J., Fu, A., & Zhang, L. (2019). Progress in molecular docking. *Quantitative Biology*, 7, 83-89.
- Fan, L., Ding, X., Liu, Y., & Zhang, W. (2022). Comparative study on inclusion complexes of curcumin with different cyclodextrins: Molecular docking and experimental approaches. *Journal of Molecular Structure*, 1252, 132145.
- Favre, L. C., Dos Santos, C., López-Fernández, M. P., Mazzobre, M. F., & del Pilar Buera, M. (2018). Optimization of β -cyclodextrin-based extraction of antioxidant and anti-browning activities from thyme leaves by response surface methodology. *Food chemistry*, 265, 86-95.

- Favre, L. C., Rolandelli, G., Mshicileli, N., Vhangani, L. N., dos Santos Ferreira, C., van Wyk, J., & del Pilar Buera, M. (2020). Antioxidant and anti-glycation potential of green pepper (*Piper nigrum*): Optimization of β -cyclodextrin-based extraction by response surface methodology. *Food chemistry*, 316, 126280.
- Fenyvesi, É., & Sohajda, T. (2022). Cyclodextrin-enabled green environmental biotechnologies. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(14), 20085-20097.
- Fenyvesi, É., Szemán, J., Csabai, K., Malanga, M., & Szenté, L. (2014). Methyl-beta-cyclodextrins: the role of number and types of substituents in solubilizing power. *Journal of pharmaceutical sciences*, 103(5), 1443-1452.
- Frangopoulos, T. (2022). A green, efficient approach on extraction of polyphenols from fenugreek seeds (*Trigonella foenum-graecum*): DES and β -cyclodextrin assisted extraction. *Waste and Biomass Valorization*, 13(11), 4403-4415.
- Fumić, B., Končić, M. Z., & Jug, M. (2018). Development of cyclodextrin-based extract of *Lotus corniculatus* as a potential substrate reduction therapy in mucopolysaccharidoses type III. *Journal of Inclusion Phenomena and Macrocyclic Chemistry*, 92(3), 369-379.
- Georgantzi, C., Lioliou, A. E., Paterakis, N., & Makris, D. P. (2017). Combination of lactic acid-based deep eutectic solvents (DES) with β -cyclodextrin: Performance screening using ultrasound-assisted extraction of polyphenols from selected native Greek medicinal plants. *Agronomy*, 7(3), 54.
- Gould, S., & Scott, R. C. (2005). 2-Hydroxypropyl- β -cyclodextrin (HP- β -CD): A toxicology review. *Food and Chemical Toxicology*, 43(10), 1451-1459.
- Grigorakis, S., Benchennouf, A., Halahlah, A., & Makris, D. P. (2020). High-performance green extraction of polyphenolic antioxidants from *Salvia fruticosa* using

cyclodextrins: Optimization, kinetics, and composition. *Applied Sciences*, 10(10), 3447.

Hădărugă, N. G., Bandur, G. N., David, I., & Hădărugă, D. I. (2019). A review on thermal analyses of cyclodextrins and cyclodextrin complexes. *Environmental Chemistry Letters*, 17, 349-373.

Han, A. R., Kim, H., Piao, D., Jung, C. H., & Seo, E. K. (2021). Phytochemicals and bioactivities of *Zingiber cassumunar* Roxb. *Molecules*, 26(8), 2377.

Hou, K., Xu, Y., Cen, K., Gao, C., Feng, X., & Tang, X. (2021). Nanoemulsion of cinnamon essential oil Co-emulsified with hydroxypropyl- β -cyclodextrin and Tween-80: Antibacterial activity, stability and slow release performance. *Food Bioscience*, 43, 101232.

Iswandana, R., Olisia, S., Adriyani, M., Jufri, M., & Munim, A. (2020). Application of Tween 80 and Tween 20 for microwave-assisted extraction of oxyresveratrol from mulberry (*Morus alba* L.) twigs. *Journal of Applied Pharmaceutical Science*, 10(3), 093-100.

Jones, B., Allen-Moyer, K., & Goos, P. (2021). A-optimal versus D-optimal design of screening experiments. *Journal of Quality Technology*, 53(4), 369-382.

Jug, M., & Mura, P. A. (2018). Grinding as solvent-free green chemistry approach for cyclodextrin inclusion complex preparation in the solid state. *Pharmaceutics*, 10(4), 189.

Janpim, K., Sakkumduang, W., & Nualkaew, S. (2011). The 2nd International Conference on Applied Science (ICAS) and The 3rd International Conference on Science and Technology for Sustainable Development of the Greater Mekong Sub-region (STGMS). Luang Prabang, Lao: Souphanouvong University, 604-607.

- Kaewchoothong, A. (2009). Preparation and quality control Zingiber cassumunar extract with high-yield anti-inflammatory active compounds. M. Sc.(Herb Sciences) Prince Songkla University.
- Kalantari, S., Roufegarinejad, L., Pirs, S., & Gharekhani, M. (2020). Green extraction of bioactive compounds of pomegranate peel using β -Cyclodextrin and ultrasound. *Main Group Chemistry*, 19(1), 61-80.
- Kali, G., Haddadzadegan, S., & Bernkop-Schnürch, A. (2024). Cyclodextrins and derivatives in drug delivery: New developments, relevant clinical trials, and advanced products. *Carbohydrate Polymers*, 324, 121500.
- Kazlauskaitė, J. A., Ivanauskas, L., & Bernatoniene, J. (2021). Cyclodextrin-assisted extraction method as a green alternative to increase the isoflavone yield from *Trifolium pratensis* L. extract. *Pharmaceutics*, 13(5), 620.
- Kazlauskaitė, J. A., Ivanauskas, L., Marksa, M., & Bernatoniene, J. (2022). The effect of traditional and cyclodextrin-assisted extraction methods on *Trifolium pratense* L.(Red Clover) extracts antioxidant potential. *Antioxidants*, 11(2), 435.
- Kfoury, M., & Fourmentin, S. (2024). State of the art in cyclodextrin solubility enhancement. Are green solvents the solution?. *Journal of Molecular Liquids*, 125599.
- Khunnamwong, P., Lertwattanasakul, N., Jindamorakot, S., Suwannarach, N., Matsui, K., & Limtong, S. (2020). Evaluation of antagonistic activity and mechanisms of endophytic yeasts against pathogenic fungi causing economic crop diseases. *Folia microbiologica*, 65, 573-590.
- Lajoie, L., Fabiano-Tixier, A. S., & Chemat, F. (2022). Water as green solvent: methods of solubilisation and extraction of natural products—past, present and future solutions. *Pharmaceutics*, 15(12), 1507.

- Lakka, A., Lalas, S., & Makris, D. P. (2020). Development of a low-temperature and high-performance green extraction process for the recovery of polyphenolic phytochemicals from waste potato peels using hydroxypropyl β -cyclodextrin. *Applied sciences*, 10(10), 3611.
- Li, T., Guo, R., Zong, Q., & Ling, G. (2022). Application of molecular docking in elaborating molecular mechanisms and interactions of supramolecular cyclodextrin. *Carbohydrate polymers*, 276, 118644.
- Li, Z., Chen, S., Gu, Z., Chen, J., & Wu, J. (2014). Alpha-cyclodextrin: Enzymatic production and food applications. *Trends in Food Science & Technology*, 35(2), 151-160.
- Li, Z., Wang, M., Wang, F., Gu, Z., Du, G., Wu, J., & Chen, J. (2007). γ -Cyclodextrin: a review on enzymatic production and applications. *Applied microbiology and biotechnology*, 77, 245-255.
- Loftsson, T., & Brewster, M. E. (2010). Pharmaceutical applications of cyclodextrins: Basic science and product development. *Journal of Pharmacy and Pharmacology*, 62(11), 1607-1621.
- Loftsson, T., & Duchene, D. (2007). Cyclodextrins and their pharmaceutical applications. *International journal of pharmaceutics*, 329(1-2), 1-11.
- Loukri, A., Tsitlakidou, P., Goula, A., Assimopoulou, A. N., Kontogiannopoulos, K. N., & Mourtzinou, I. (2020). Green extracts from coffee pulp and their application in the development of innovative brews. *Applied Sciences*, 10(19), 6982.
- Majd, M., Yazdanpanah, M., Bayatloo, M. R., & Nojavan, S. (2021). Recent advances and applications of cyclodextrins in magnetic solid phase extraction. *Talanta*, 229, 122296.

Mäkelä, M. (2017). Experimental design and response surface methodology in energy applications: A tutorial review. *Energy Conversion and Management*, 151, 630-640.

Maraulo, G. E., dos Santos Ferreira, C., & Mazzobre, M. F. (2021). β -cyclodextrin enhanced ultrasound-assisted extraction as a green method to recover olive pomace bioactive compounds. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(3), e15194.

Matencio, A., Navarro-Orcajada, S., García-Carmona, F., & López-Nicolás, J. M. (2020). Applications of cyclodextrins in food science. A review. *Trends in food science & technology*, 104, 132-143.

Mazurek, A. H., Szeleszczuk, Ł., & Gubica, T. (2021). Application of molecular dynamics simulations in the analysis of cyclodextrin complexes. *International journal of molecular sciences*, 22(17), 9422.

Mohebbi, E., Hokmabady, L., & Ravari, F. (2023). Host–guest interactions of Crizotinib with natural and modified cyclodextrins: a combined molecular docking and molecular dynamics simulation approaches. *Molecular Simulation*, 49(18), 1684-1697.

Moussaoui, T., Khali, M., & Madi, N. (2021). Application of response surface methodology for the co-optimization of extraction and probiotication of phenolic compounds from pomegranate fruit peels (*Punica granatum* L.). *Journal of Food Measurement and Characterization*, 15(4), 3618-3633.

Musdja, M. Y. (2021). Potential bangle (*Zingiber montanum* J. König) rhizome extract as a supplement to prevent and reduce symptoms of Covid-19. *Saudi journal of biological sciences*, 28(4), 2245-2253.

Padmawar, A., & Bhadoriya, U. (2018). Glycol and glycerin: Pivotal role in herbal industry as solvent/co-solvent. *World J Pharm Med*, 4(5), 153-155.

- Pagadala, N. S., Syed, K., & Tuszynski, J. (2017). Software for molecular docking: a review. *Biophysical reviews*, 9, 91-102.
- Parmar, I., Sharma, S., & Rupasinghe, H. V. (2015). Optimization of β -cyclodextrin-based flavonol extraction from apple pomace using response surface methodology. *Journal of Food Science and Technology*, 52, 2202-2210.
- Petitjean, M., García-Zubiri, I. X., & Isasi, J. R. (2021). History of cyclodextrin-based polymers in food and pharmacy: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 19(4), 3465-3476.
- Picot-Allain, C., Mahomoodally, M. F., Ak, G., & Zengin, G. (2021). Conventional versus green extraction techniques—A comparative perspective. *Current Opinion in Food Science*, 40, 144-156.
- Popović, B. M., Blagojević, B., Latković, D., Četojević-Simin, D., Kucharska, A. Z., Parisi, F., & Lazzara, G. (2021). A one step enhanced extraction and encapsulation system of cornelian cherry (*Cornus mas* L.) polyphenols and iridoids with β -cyclodextrin. *Lwt*, 141, 110884.
- PubChem. (2024). โครงสร้างทางเคมีของสารกลุ่ม Curcuminoids. National Center for Biotechnology Information. สืบค้นจาก <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov>.
- PubChem. (2024). โครงสร้างทางเคมีของสารกลุ่ม phenylbutanoid. National Center for Biotechnology Information. สืบค้นจาก <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov>.
- PubChem. (2024). โครงสร้างทางเคมีของสารกลุ่ม Terpenoids. National Center for Biotechnology Information. สืบค้นจาก <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov>.
- Panthong, A., Kanjanapothi, D., Niwatananant, W., Tuntiwachwuttikul, P., & Reutrakul, V. (1997). Anti-inflammatory activity of compound D {(E)-4-(3', 4'-dimethoxyphenyl) but-3-en-2-ol} isolated from *Zingiber cassumunar* Roxb. *Phytomedicine*, 4(3), 207-212.

Ramstad, T., Nestruck, T. J., & Stehl, R. H. (1978). Determination of polypropylene glycol extracted from polymers into food-simulating solvents. *Analytical Chemistry*, 50(9), 1325-1327.

Rajha, H. N., Chacar, S., Afif, C., Vorobiev, E., Louka, N., & Maroun, R. G. (2015). β -Cyclodextrin-assisted extraction of polyphenols from vine shoot cultivars. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 63(13), 3387–3393.

Radan, M., Jovanović, M., Nikolić, N. Č., Mudrić, J., Janković, T., Bigović, D., & Šavikin, K. (2024). Cyclodextrin-assisted extraction as a green alternative for the recovery of phenolic compounds from *Helichrysum plicatum* DC. flowers. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 39, 101547.

Reid, B. J., Stokes, J. D., Jones, K. C., & Semple, K. T. (2000). Nonexhaustive cyclodextrin-based extraction technique for the evaluation of PAH bioavailability. *Environmental Science & Technology*, 34(15), 3174-3179.

Sanatombi, R., & Sanatombi, K. (2017). Biotechnology of *Zingiber montanum* (Koenig) link ex A. Dietr.: a review. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 4, 1-4.

Saokham, P., & Loftsson, T. (2017). γ -Cyclodextrin. *International journal of pharmaceutics*, 516(1-2), 278-292.

Schwarz, D. H., Engelke, A., & Wenz, G. (2017). Solubilizing steroidal drugs by β -cyclodextrin derivatives. *International Journal of Pharmaceutics*, 531(2), 559-567.

Sharma, N., & Baldi, A. (2016). Exploring versatile applications of cyclodextrins: an overview. *Drug Delivery*, 23(3), 729-747.

- Singharach, A., Thongpraditchote, S., Anantachoke, N., & Temsiririrkkul, R. (2020). Anti-inflammatory activity of Zingiber montanum (J. König) Link ex Dietr. extracts prepared by deep frying in coconut oil. *Pharm Sci Asia*, 47, 51-7.
- Srihakulung, S., Lawtrakul, L., & Ryo, U. (2019). Molecular docking and complexation of Thai herbal compounds with cyclodextrins. *Journal of Molecular Structure*, 1184, 238-245.
- Stella, V. J., & He, Q. (2008). Cyclodextrins. *Toxicologic pathology*, 36(1), 30-42.
- Stella, V. J., & Rajewski, R. A. (2020). Sulfobutylether- β -cyclodextrin. *International Journal of Pharmaceutics*, 583, 119396.
- Suksaeree, J.; Charoenchai, L.; Kraisintu, K.; Songsak, T.; Pichayakorn, W.; Boonme, P. The extraction method and formulation of Zingiber cassumunar Roxb. (Plai): A review. *BHST 2013*, 11(1), 19–22.
- Szejtli, J. (1997). Utilization of cyclodextrins in industrial products and processes. *Journal of Materials Chemistry*, 7(4), 575-587.
- Szente, L., & Szejtli, J. (2004). Cyclodextrins as food ingredients. *Trends in Food Science & Technology*, 15(3-4), 137-142.
- Tarannum, N., Suhani, & Kumar, D. (2020). Synthesis, characterization and applications of copolymer of β -cyclodextrin: a review. *Journal of Polymer Research*, 27, 1-30.
- Tian, B., Zhang, M., Li, W., Wang, Q., & Wei, Y. (2021). Enhanced stability and bioavailability of curcumin by hydroxypropyl- β -cyclodextrin inclusion complex: molecular docking and experimental validation. *Food Chemistry*, 343, 128548.
- Tutunchi, P., Roufegarinejad, L., Hamishehkar, H., & Alizadeh, A. (2019). Extraction of red beet extract with β -cyclodextrin-enhanced ultrasound assisted extraction:

A strategy for enhancing the extraction efficacy of bioactive compounds and their stability in food models. *Food Chemistry*, 297, 124994.

Thepthong, P., Rattakarn, K., Ritchaiyaphum, N., Intachai, S., & Chanasit, W. (2023).

Effect of extraction solvents on antioxidant and antibacterial activity of *Zingiber montanum* rhizomes. *ASEAN Journal of Scientific and Technological Reports*, 26(3), 1-9.

Vhangani, L. N., Favre, L. C., Rolandelli, G., Van Wyk, J., & del Pilar Buera, M. (2022).

Optimising the polyphenolic content and antioxidant activity of green rooibos (*Aspalathus linearis*) using beta-cyclodextrin assisted extraction. *Molecules*, 27(11), 3556.

Wang, L., Zhou, Y., Wang, Y., Qin, Y., Liu, B., & Bai, M. (2019). Two green approaches for extraction of dihydromyricetin from Chinese vine tea using β -Cyclodextrin-based and ionic liquid-based ultrasonic-assisted extraction methods. *Food and Bioproducts Processing*, 116, 1-9.

Worasing, K., Sungthong, B., & Phimarn, W. (2023). Effectiveness of *Zingiber montanum* herbal compress remedy for pain management: An updated systematic review and meta-analysis. *Scientia Pharmaceutica*, 91(2), 24.

Xiang, J., Yang, S., Zhang, J., Wu, J., Shao, Y., Wang, Z., & Yang, M. (2022). The preparation of sorbitol and its application in polyurethane: a review. *Polymer Bulletin*, 1-18.

Xiao, F., Xu, T., Lu, B., & Liu, R. (2020). Guidelines for antioxidant assays for food components. *Food Frontiers*, 1(1), 60-69.

Zhang, L., Zheng, D., & Zhang, Q. F. (2019). Purification of total flavonoids from *Rhizoma Smilacis Glabrae* through cyclodextrin-assisted extraction and resin adsorption. *Food Science & Nutrition*, 7(2), 449-456.

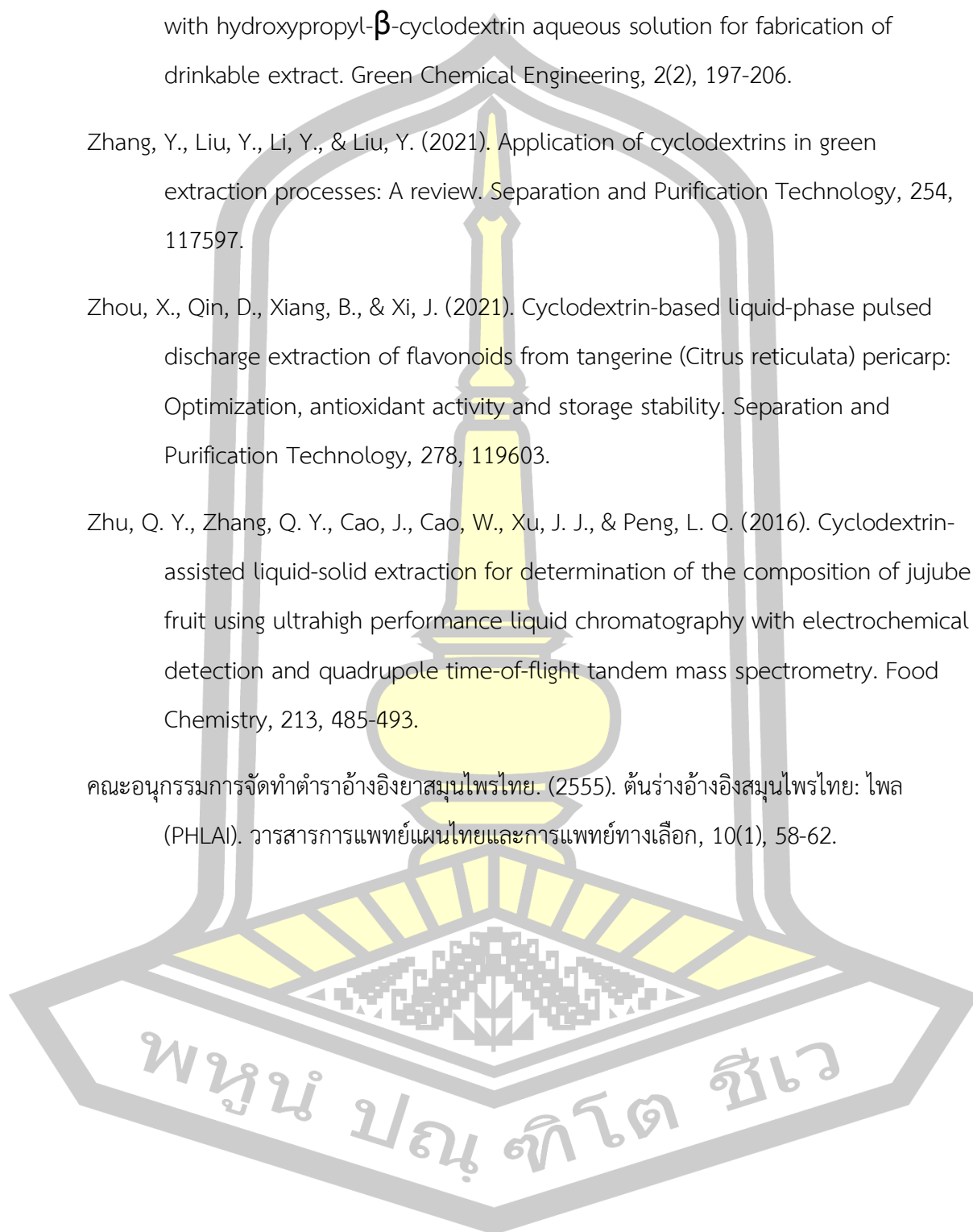
Zhang, Y., Cao, Y., Meng, X., Prawang, P., & Wang, H. (2021). Extraction of artemisinin with hydroxypropyl- β -cyclodextrin aqueous solution for fabrication of drinkable extract. *Green Chemical Engineering*, 2(2), 197-206.

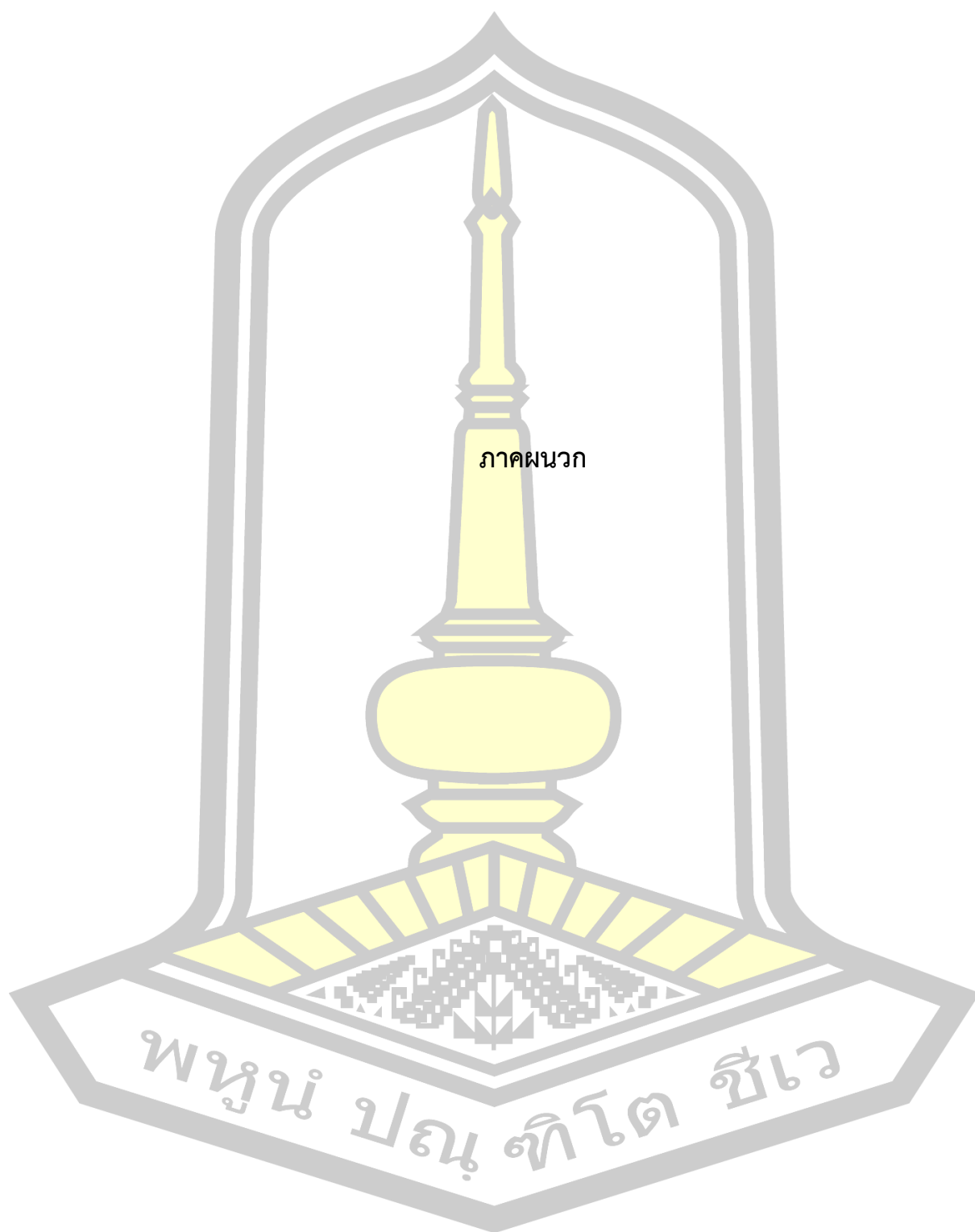
Zhang, Y., Liu, Y., Li, Y., & Liu, Y. (2021). Application of cyclodextrins in green extraction processes: A review. *Separation and Purification Technology*, 254, 117597.

Zhou, X., Qin, D., Xiang, B., & Xi, J. (2021). Cyclodextrin-based liquid-phase pulsed discharge extraction of flavonoids from tangerine (*Citrus reticulata*) pericarp: Optimization, antioxidant activity and storage stability. *Separation and Purification Technology*, 278, 119603.

Zhu, Q. Y., Zhang, Q. Y., Cao, J., Cao, W., Xu, J. J., & Peng, L. Q. (2016). Cyclodextrin-assisted liquid-solid extraction for determination of the composition of jujube fruit using ultrahigh performance liquid chromatography with electrochemical detection and quadrupole time-of-flight tandem mass spectrometry. *Food Chemistry*, 213, 485-493.

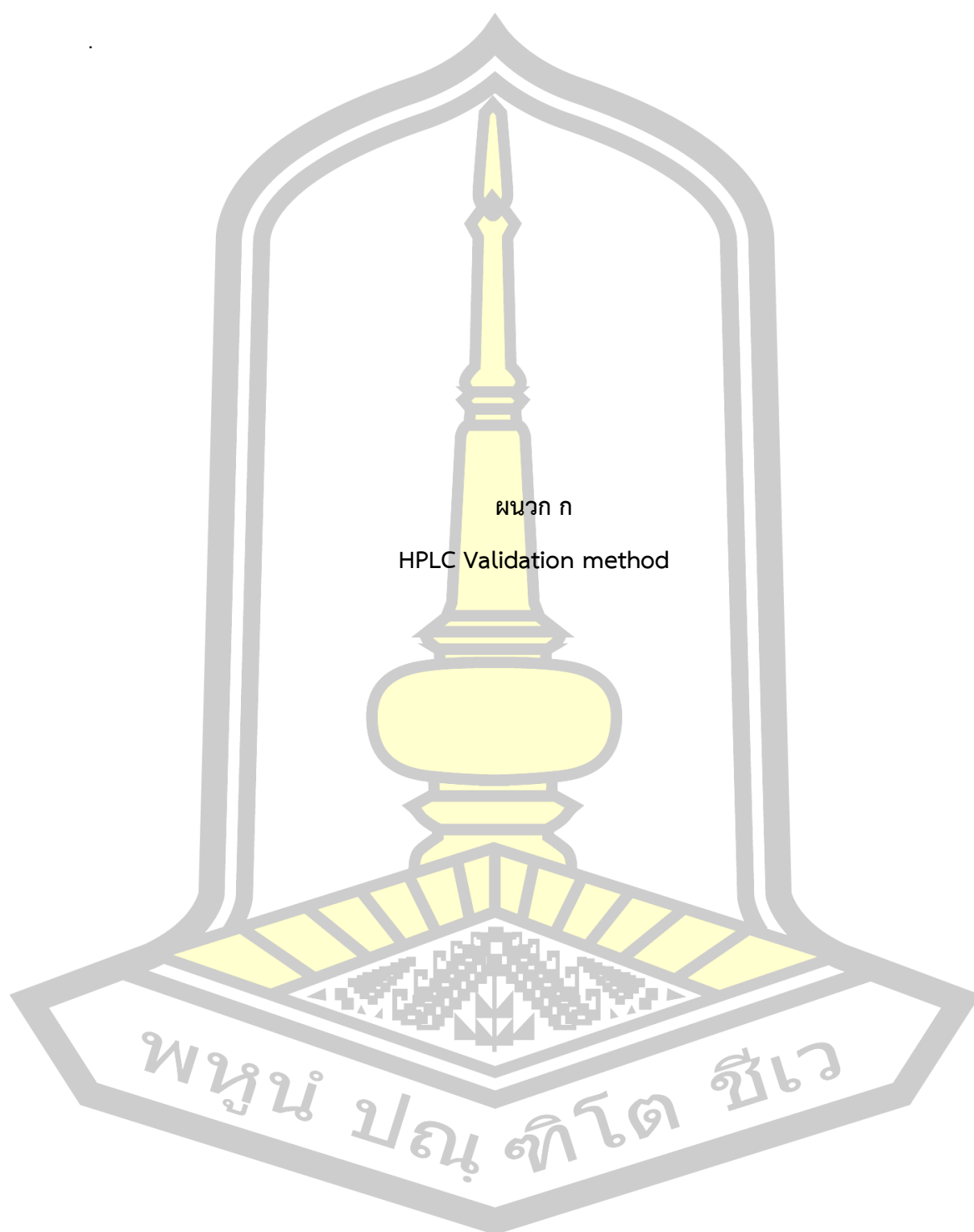
คณะกรรมการจัดทำตำราอ้างอิงยาสมุนไพรไทย. (2555). ตำราอ้างอิงสมุนไพรไทย: ไพล (PHLAI). วารสารการแพทย์แผนไทยและการแพทย์ทางเลือก, 10(1), 58-62.





ภาคผนวก

พูนํ ปณํ ทิโต ชีเว



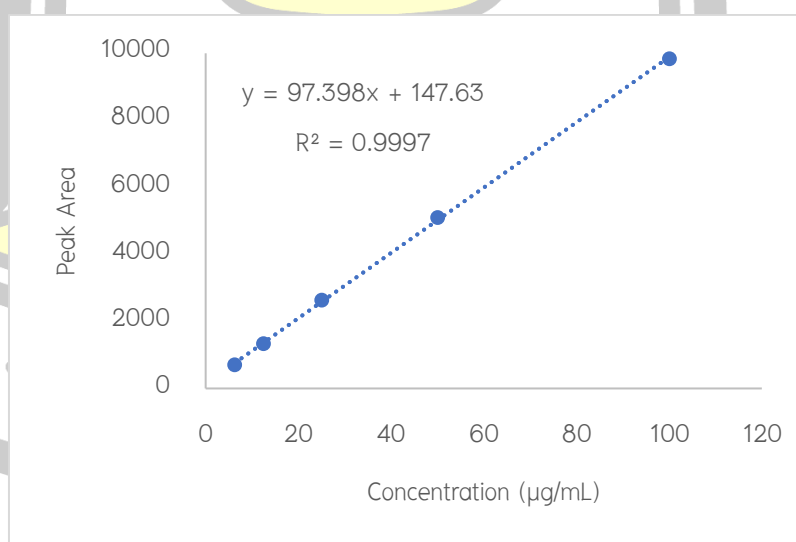
1. Linearity and Range

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงของกราฟมาตรฐานโดยเตรียมสารมาตรฐานที่มีความเข้มข้นแตกต่างกันแล้ววิเคราะห์ด้วย HPLC ได้พื้นที่ใต้กราฟดังแสดงในตารางดังต่อไปนี้

1.1 สารมาตรฐาน Compound D นำค่าความเข้มข้นและพื้นที่ใต้กราฟมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น (X) และพื้นที่ใต้กราฟของ Compound D ดังแสดงในกราฟ โดยมีค่า Linear of regression (R^2) เท่ากับ 0.9997 ซึ่งสูงกว่า 0.995 แสดงว่าความเข้มข้นของ Compound D ในช่วง 6.25-100 $\mu\text{g/mL}$ และพื้นที่ใต้กราฟมีความสัมพันธ์เป็นสมการเชิงเส้นหรือมีความเป็น Linearity ในตารางผนวก 4

ตารางผนวก 1 แสดงความเข้มข้นของ Compound D ที่ฉีด HPLC และพื้นที่ใต้กราฟ

ความเข้มข้น Compound D ($\mu\text{g/mL}$)	พื้นที่ใต้กราฟ (mAU)
0	0
6.25	696.2807
12.5	1,333.9511
25	2,640.6265
50	5,097.6509
100	9,840.5175

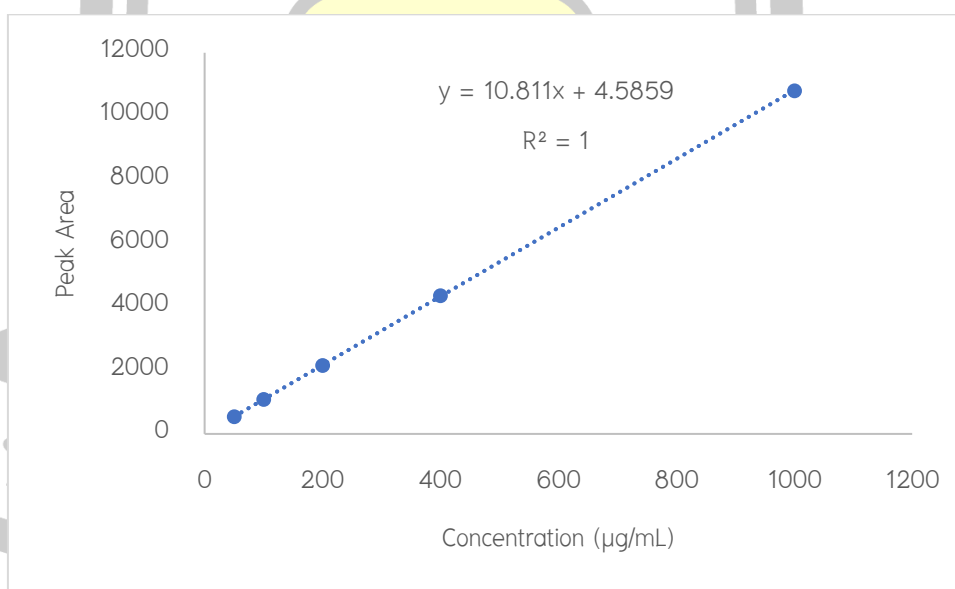


รูปผนวก 1 กราฟสารมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณ Compound D ด้วยเครื่อง HPLC

1.2 สารมาตรฐาน DMPBD นำค่าความเข้มข้นและพื้นที่ใต้กราฟมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น (X) และพื้นที่ใต้กราฟของ DMPBD ดังแสดงในกราฟ โดยมีค่า Linear of regression (R^2) เท่ากับ 1.0000 ซึ่งสูงกว่า 0.995 แสดงว่าความเข้มข้นของ DMPBD ในช่วง 50-1,000 $\mu\text{g/mL}$ และพื้นที่ใต้กราฟมีความสัมพันธ์เป็นสมการเชิงเส้นหรือมีความเป็น Linearity ในตารางผนวก 4

ตารางผนวก 2 แสดงความเข้มข้นของ DMPBD ที่ฉีด HPLC และพื้นที่ใต้กราฟ

ความเข้มข้น DMPBD ($\mu\text{g/mL}$)	พื้นที่ใต้กราฟ (mAU)
0	0
50	547.8284
100	1,081.1179
200	2,150.7096
400	4,353.2374
1,000	10,809.7311

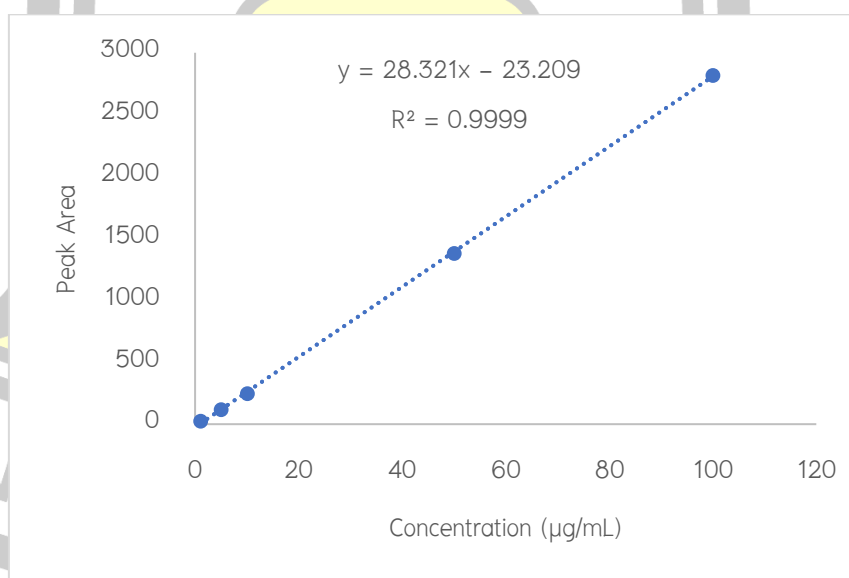


รูปผนวก 2 กราฟสารมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณ DMPBD ด้วยเครื่อง HPLC

1.3 สารมาตรฐาน Curcumin นำค่าความเข้มข้นและพื้นที่ใต้กราฟมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น (X) และพื้นที่ใต้กราฟของ Curcumin ดังแสดงในกราฟ โดยมีค่า Linear of regression (R^2) เท่ากับ 0.9999 ซึ่งสูงกว่า 0.995 แสดงว่าความเข้มข้นของ Curcumin ในช่วง 1-100 $\mu\text{g/mL}$ และพื้นที่ใต้กราฟมีความสัมพันธ์เป็นสมการเชิงเส้นหรือมีความเป็น Linearity ในตารางผนวก 4

ตารางผนวก 3 แสดงความเข้มข้นของ Curcumin ที่ฉีด HPLC และพื้นที่ใต้กราฟ

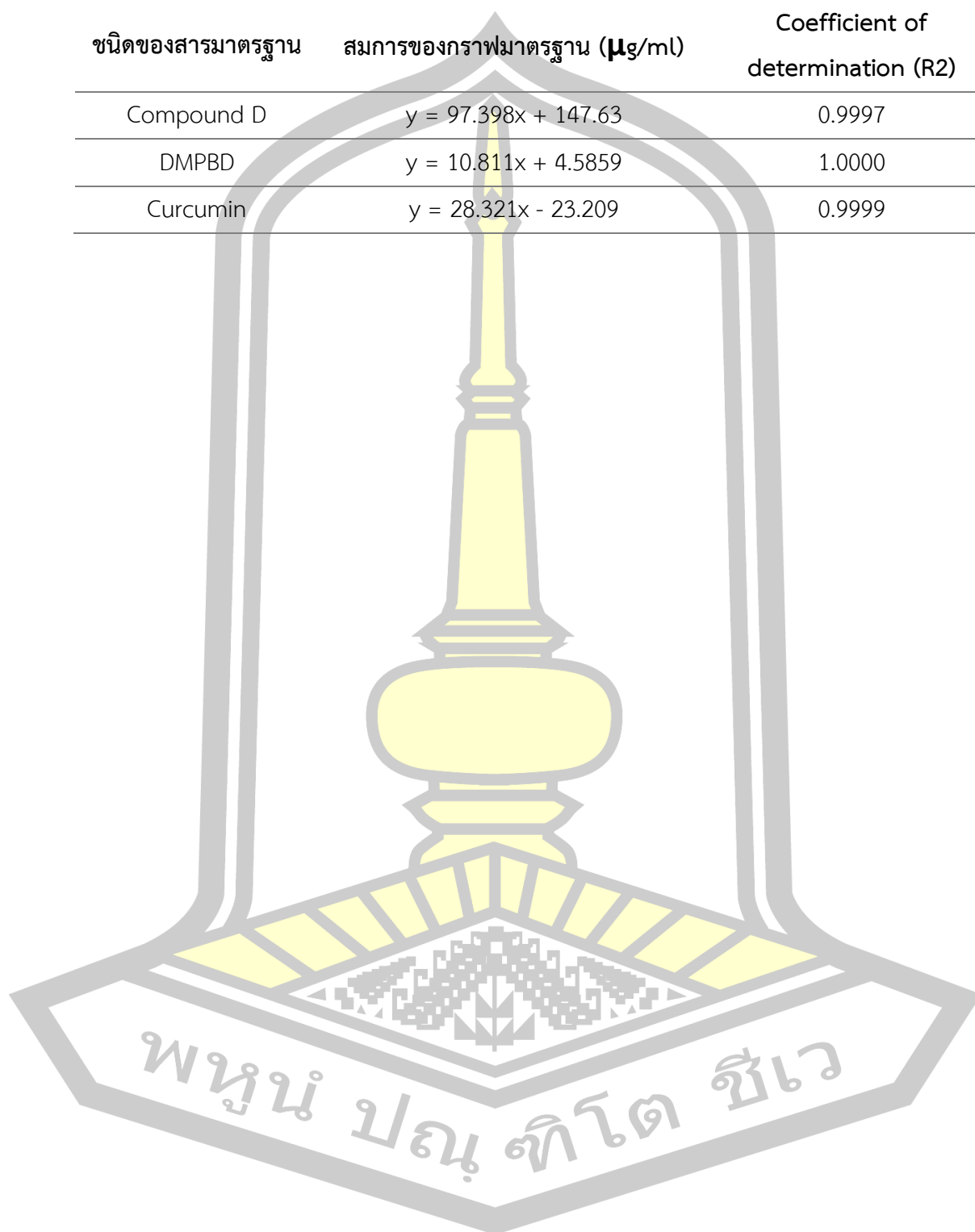
ความเข้มข้น Curcumin ($\mu\text{g/mL}$)	พื้นที่ใต้กราฟ (mAU)
0	0
1	23.4257
5	117.2228
10	249.1444
50	1,378.3233
100	2,817.0681



รูปผนวก 3 กราฟสารมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณ Curcuminoid content ด้วยเครื่อง HPLC

ตารางผนวก 4 สมการกราฟมาตรฐานสำหรับวิเคราะห์ปริมาณสารมาตรฐานด้วยเครื่อง HPLC

ชนิดของสารมาตรฐาน	สมการของกราฟมาตรฐาน ($\mu\text{g/ml}$)	Coefficient of determination (R^2)
Compound D	$y = 97.398x + 147.63$	0.9997
DMPBD	$y = 10.811x + 4.5859$	1.0000
Curcumin	$y = 28.321x - 23.209$	0.9999



2. ความถูกต้องและความแม่นยำ

2.1 สารมาตรฐาน Compound D

การทดสอบเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของวิธีการวิเคราะห์โดยทำการฉีดสารมาตรฐาน Compound D ความเข้มข้น 6.25, 25 และ 100 $\mu\text{g/mL}$ จำนวน 5 ซ้ำ เพื่อตรวจสอบค่า %Recovery และทำการเปรียบเทียบตามเกณฑ์ AOAC 2002 พบว่าสารมาตรฐานทั้ง 3 ตัวอย่างมีค่า %Recovery อยู่ในช่วง 90.01–102.94% ซึ่งเป็นไปตามเกณฑ์ของ AOAC 2002 ดังแสดงในตารางที่ 5 สรุปได้ว่าวิธีการวิเคราะห์มีความถูกต้อง

การทดสอบเพื่อตรวจสอบความแม่นยำในการวิเคราะห์โดยทำการฉีดสารมาตรฐาน Compound D ความเข้มข้น 6.25, 25 และ 100 $\mu\text{g/mL}$ จำนวน 5 ซ้ำ และคำนวณค่า %Relative Standard Deviation (%RSD) แล้วทำการเปรียบเทียบตามเกณฑ์ AOAC 2002 พบว่าสารมาตรฐานทั้ง 3 ตัวอย่างมีค่า %RSD อยู่ในช่วงตามเกณฑ์ AOAC 2002 ดังแสดงในตารางผนวก 5 สรุปได้ว่าวิธีการวิเคราะห์มีความแม่นยำ

ตารางผนวก 5 แสดงค่า % Recovery และความเบี่ยงเบนมาตรฐานในการวิเคราะห์ Compound D ที่ความเข้มข้น 6.25, 25 และ 100 $\mu\text{g/mL}$

ซ้ำที่	ความเข้มข้นที่วิเคราะห์ได้ (6.25 $\mu\text{g/mL}$)	%Recovery	ความเข้มข้นที่วิเคราะห์ได้ (25 $\mu\text{g/mL}$)	%Recovery	ความเข้มข้นที่วิเคราะห์ได้ (100 $\mu\text{g/mL}$)	%Recovery
1	5.6324	90.12	25.7152	102.86	98.9735	98.97
2	5.6259	90.01	25.6223	102.49	99.7874	99.79
3	5.6390	90.22	25.5877	102.35	100.0621	100.06
4	5.6357	90.17	25.7357	102.94	99.0734	99.07
5	5.6287	90.06	25.5416	102.17	97.0597	97.06
เฉลี่ย	5.6323	90.12	25.6405	102.56	98.9912	98.99
SD	0.0049	-	0.0720	-	1.0873	-
%RSD	0.0865	-	0.2810	-	1.0986	-

2.2 สารมาตรฐาน DMPBD

การทดสอบเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของวิธีการวิเคราะห์โดยทำการฉีดสารมาตรฐาน DMPBD ความเข้มข้น 50, 100 และ 200 $\mu\text{g/mL}$ จำนวน 5 ซ้ำ เพื่อตรวจสอบค่า %Recovery และทำการเปรียบเทียบตามเกณฑ์ AOAC 2002 พบว่าสารมาตรฐานทั้ง 3 ตัวอย่างมีค่า %Recovery อยู่ในช่วง 98.84–100.69% ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ตาม AOAC 2002 ดังแสดงในตารางที่ 5 สรุปได้ว่าวิธีการวิเคราะห์มีความถูกต้อง

การทดสอบเพื่อตรวจสอบความแม่นยำในการวิเคราะห์โดยทำการฉีดสารมาตรฐาน DMPBD ความเข้มข้น 50, 100 และ 200 $\mu\text{g/mL}$ จำนวน 5 ซ้ำ และคำนวณค่า %Relative Standard Deviation (%RSD) แล้วทำการเปรียบเทียบตามเกณฑ์ AOAC 2002 พบว่าสารมาตรฐานทั้ง 3 ตัวอย่างมีค่า %RSD อยู่ในช่วง 0.06–0.37% ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ตาม AOAC 2002 ดังแสดงในตารางผนวก 6 สรุปได้ว่าวิธีการวิเคราะห์มีความแม่นยำ

ตารางผนวก 6 แสดงค่า %Recovery และความเบี่ยงเบนมาตรฐานในการวิเคราะห์ DMPBD ที่ความเข้มข้น 50, 100 และ 200 $\mu\text{g/mL}$

ซ้ำที่	ความเข้มข้นที่วิเคราะห์ได้ (50 $\mu\text{g/mL}$)	%Recovery	ความเข้มข้นที่วิเคราะห์ได้ (100 $\mu\text{g/mL}$)	%Recovery	ความเข้มข้นที่วิเคราะห์ได้ (200 $\mu\text{g/mL}$)	%Recovery
1	50.278	100.56	99.704	99.70	199.08	99.54
2	50.289	100.58	99.723	99.72	198.62	99.31
3	50.258	100.52	99.853	99.85	199.76	99.88
4	50.258	100.52	99.749	99.75	197.69	98.84
5	50.347	100.69	99.828	99.83	199.47	99.74
เฉลี่ย	50.286	100.58	99.771	99.77	198.92	99.46
SD	0.032	-	0.062	-	0.74	-
%RSD	0.064	-	0.062	-	0.37	-

พูน ปณ ทิโต ชเว

2.3 สารมาตรฐาน Curcumin

การทดสอบเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของวิธีการวิเคราะห์โดยทำการฉีดสารมาตรฐาน Curcuminoid ที่ความเข้มข้น 5, 50 และ 100 $\mu\text{g/mL}$ จำนวน 5 ซ้ำ เพื่อตรวจสอบค่า %Recovery และทำการเปรียบเทียบตามเกณฑ์ AOAC 2002 พบว่าสารมาตรฐานทั้ง 3 ตัวอย่างมีค่า %Recovery อยู่ในช่วง 98.3–100.43% ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ตาม AOAC 2002 ดังแสดงในตารางที่ 5 สรุปได้ว่าวิธีการวิเคราะห์มีความถูกต้อง

การทดสอบเพื่อตรวจสอบความแม่นยำในการวิเคราะห์โดยทำการฉีดสารมาตรฐาน Curcuminoid ที่ความเข้มข้น 5, 50 และ 100 $\mu\text{g/mL}$ จำนวน 5 ซ้ำ และคำนวณค่า %Relative Standard Deviation (%RSD) แล้วทำการเปรียบเทียบตามเกณฑ์ AOAC 2002 พบว่าสารมาตรฐานทั้ง 3 ตัวอย่างมีค่า %RSD อยู่ในช่วง 0.10–1.19% ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ตาม AOAC 2002 ดังแสดงในตารางที่ 5 สรุปได้ว่าวิธีการวิเคราะห์มีความแม่นยำ

เนื่องจากผลการทดลองที่ความเข้มข้น 1 $\mu\text{g/mL}$ มีค่า %Recovery สูงกว่าเกณฑ์ AOAC 2002 จึงเลือกใช้เฉพาะความเข้มข้น 5, 50 และ 100 $\mu\text{g/mL}$ ซึ่งมีค่า %Recovery และ %RSD อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้เพื่อประเมินความถูกต้องและความแม่นยำของวิธีการวิเคราะห์

ตารางผนวก 7 แสดงค่า % Recovery และความเบี่ยงเบนมาตรฐานในการวิเคราะห์ Curcuminoid ที่ความเข้มข้น 5, 50 และ 100 $\mu\text{g/mL}$

ซ้ำที่	ความเข้มข้นที่วิเคราะห์ได้ (5 $\mu\text{g/mL}$)	%Recovery	ความเข้มข้นที่วิเคราะห์ได้ (50 $\mu\text{g/mL}$)	%Recovery	ความเข้มข้นที่วิเคราะห์ได้ (100 $\mu\text{g/mL}$)	%Recovery
1	4.920	98.4	49.55	99.10	100.43	100.43
2	4.914	98.3	49.60	99.20	100.41	100.41
3	5.063	101.3	50.09	100.18	100.34	100.34
4	4.945	98.9	49.62	99.24	100.41	100.41
5	5.003	100.1	49.86	99.72	100.17	100.17
เฉลี่ย	4.969	99.38	49.744	99.49	100.35	100.35
SD	0.0594	-	0.206	-	0.100	-
%RSD	1.19	-	0.41	-	0.10	-

3. Limited of detection (LOD) and Limit of quantitation (LOQ)

3.1 สารมาตรฐาน Compound D

เพื่อตรวจสอบค่า LOD และ LOQ ของ Compound D ได้ทำการฉีดสารมาตรฐานที่ความเข้มข้นต่ำสุด 6.25 µg/mL จำนวน 5 ครั้ง เพื่อตรวจสอบค่า signal และ noise ของสาร โดยเก็บค่าพื้นที่ใต้กราฟ (area) ของ Compound D และนำค่าที่ได้มาคำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) จากนั้นใช้ slope ของ calibration curve (97.398) เพื่อหาค่า LOD และ LOQ จากผลการคำนวณพบว่า SD เท่ากับ 0.5098 ดังนั้นค่า LOD และ LOQ ของ Compound D คือ 0.01727 µg/mL และ 0.0523 µg/mL ตามลำดับ ดังแสดงในตารางผนวก 8

ตารางผนวก 8 แสดงค่า area ของ Compound D (6.25 µg/mL) และค่า SD ที่ได้

ซ้ำที่	พื้นที่ใต้กราฟ (Blank)	พื้นที่ใต้กราฟ (Compound D 6.25 µg/mL)	ความเข้มข้น Compound D (µg/mL)
1	0	696.2822	5.6324
2	0	695.6437	5.6259
3	0	696.9162	5.6390
4	0	696.5812	5.6357
5	0	695.9062	5.6287
ค่าเฉลี่ย	0	696.2659	5.6323
SD	-	0.5098	0.0049
RSD	-	-	0.0865%

พหุ ประจักษ์ ชีวะ

3.2 สารมาตรฐาน DMPBD

เพื่อตรวจสอบค่า LOD และ LOQ ของ DMPBD ได้ทำการฉีด sample blank และสารมาตรฐาน DMPBD ความเข้มข้น 50 $\mu\text{g/mL}$ จำนวน 5 ครั้งเพื่อตรวจสอบค่า signal และ noise ของสาร โดยเก็บค่าพื้นที่ใต้กราฟ (area) ของ DMPBD ที่ความเข้มข้นดังกล่าวและนำค่าที่ได้มาคำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) จากนั้นใช้ slope ของ calibration curve (10.811) เพื่อหาค่า LOD และ LOQ จากผลการคำนวณพบว่า SD ของ area เท่ากับ 0.3961 ทำให้ค่า LOD และ LOQ ของ DMPBD คือ 0.1208 $\mu\text{g/mL}$ และ 0.3667 $\mu\text{g/mL}$ ตามลำดับ ดังแสดงในตารางผนวก 9

ตารางผนวก 9 แสดงค่าพื้นที่ใต้กราฟของ sample blank และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ซ้ำที่	พื้นที่ใต้กราฟ (Blank)	พื้นที่ใต้กราฟ (DMPBD 50 $\mu\text{g/mL}$)	ความเข้มข้น DMPBD ($\mu\text{g/mL}$)
1	0	547.5372	50.278
2	0	547.6586	50.289
3	0	547.3261	50.258
4	0	547.3297	50.258
5	0	548.2896	50.347
ค่าเฉลี่ย	0	547.6282	50.286
SD	-	0.3961	0.0366
RSD	-	-	0.073%

พูน ปณ ทิโต ชีเว

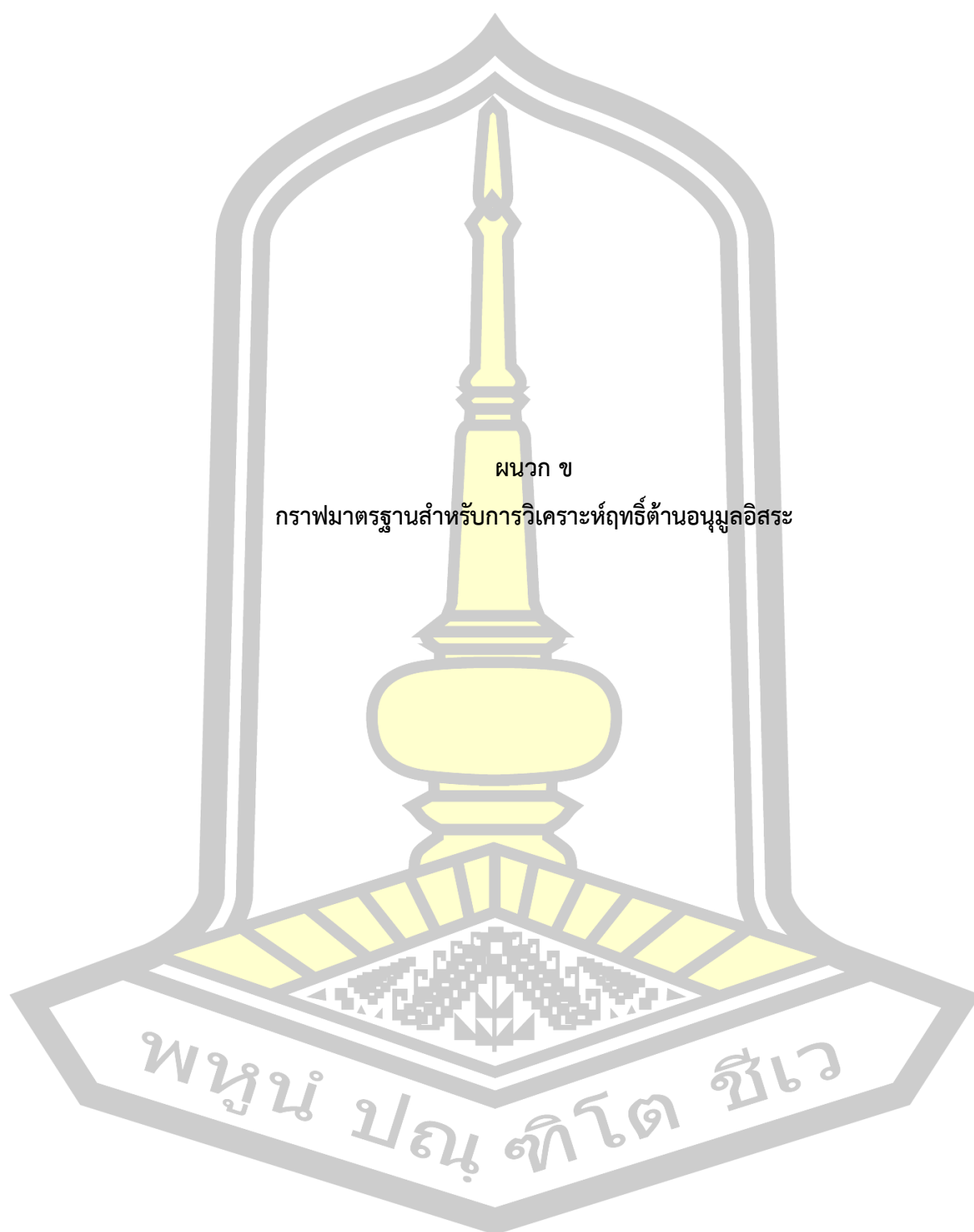
3.3 สารมาตรฐาน Curcumin

เพื่อตรวจสอบค่า LOD และ LOQ ของ Curcuminoid ได้ทำการฉีด sample blank และ สารมาตรฐาน Curcuminoid ความเข้มข้น 5 µg/mL จำนวน 5 ครั้งเพื่อตรวจสอบค่า signal และ noise ของสาร โดยเก็บค่าพื้นที่ใต้กราฟ (area) ของ Curcuminoid ที่ความเข้มข้นดังกล่าวและนำค่าที่ได้มาคำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) จากนั้นใช้ slope ของ calibration curve (28.321) เพื่อหาค่า LOD และ LOQ จากผลการคำนวณพบว่า SD ของ area เท่ากับ 1.7373 ทำให้ค่า LOD และ LOQ ของ Curcuminoid คือ 0.2023 µg/mL และ 0.6133 µg/mL ตามลำดับ ดังแสดงในตารางผนวก 10

ตารางผนวก 10 แสดงค่าพื้นที่ใต้กราฟของ sample blank และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ซ้ำที่	พื้นที่ใต้กราฟ (Blank)	พื้นที่ใต้กราฟ (Curcumin 5 µg/mL)	ความเข้มข้น Curcumin (µg/mL)
1	0	116.265	4.920
2	0	116.1056	4.914
3	0	120.2413	5.063
4	0	116.969	4.945
5	0	118.4344	5.003
ค่าเฉลี่ย	0	117.6031	4.969
SD	-	1.7373	0.0631
RSD	-	-	1.27%

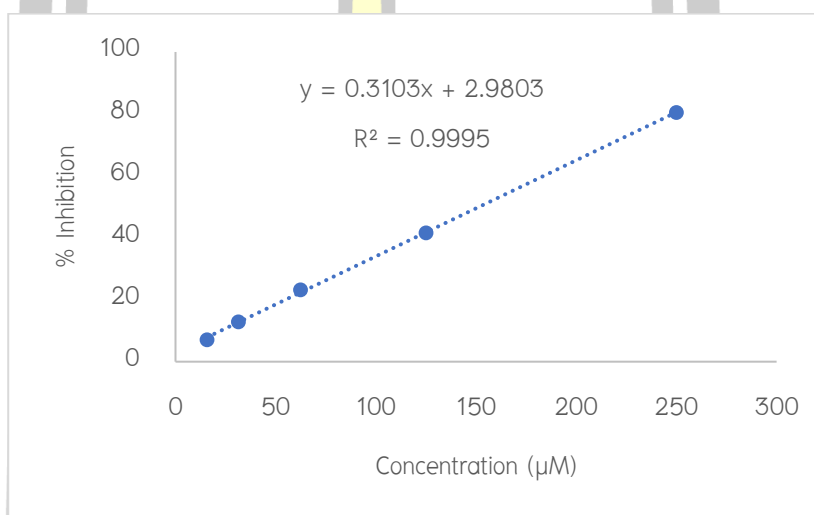
พหุ ประจักษ์ ชีวะ



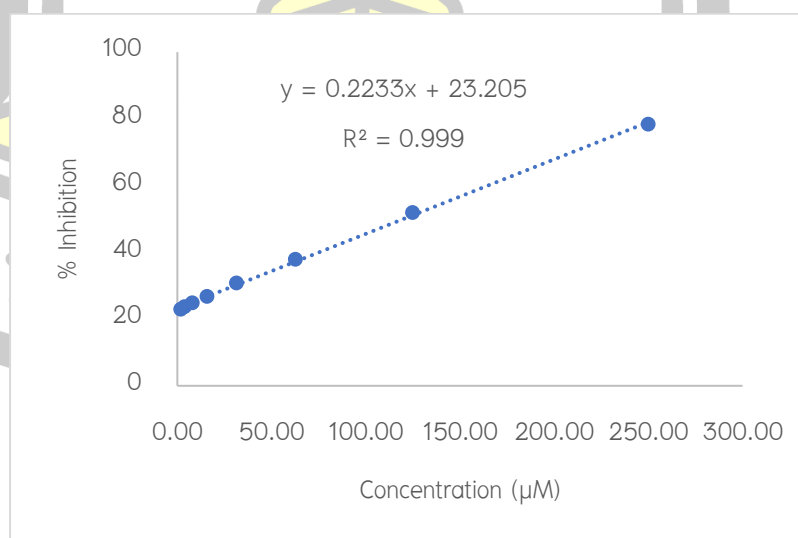
กราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ

ในการประเมินฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของตัวอย่าง ได้ทำการสร้างกราฟมาตรฐานของ Trolox สำหรับแต่ละวิธี ได้แก่ DPPH assay, ABTS assay และ FRAP assay โดยทดสอบความเข้มข้นต่าง ๆ ของ Trolox และวัดค่า %Inhibition หรือค่า Absorbance เพื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับค่าการตอบสนองที่ได้

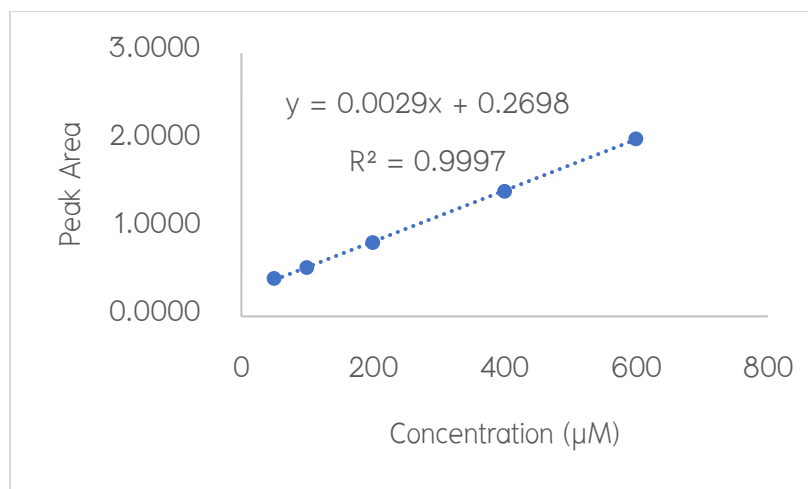
ค่าความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง (R^2) ของกราฟมาตรฐานทั้งสามวิธีอยู่ในช่วง 0.999–0.9997 แสดงถึงความสัมพันธ์เชิงเส้นที่ดี สามารถนำไปใช้ในการคำนวณค่าความสามารถต้านอนุมูลอิสระของตัวอย่างได้อย่างแม่นยำ ดังแสดงในภาพและตารางต่อไปนี้



รูปผนวก 4 กราฟมาตรฐาน Trolox สำหรับวิเคราะห์ฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH assay



รูปผนวก 5 กราฟมาตรฐาน Trolox สำหรับวิเคราะห์ฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระ ABTS assay

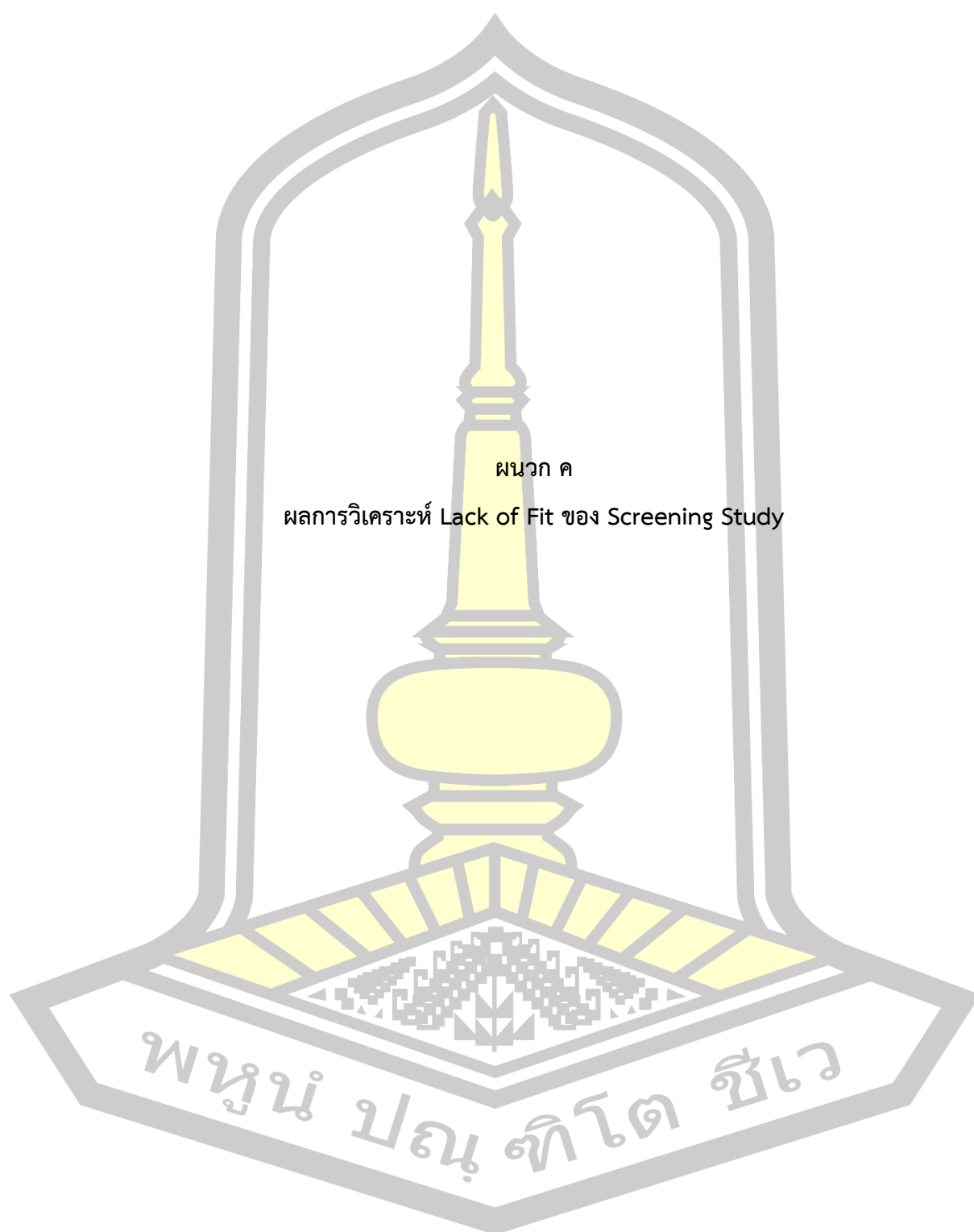


รูปผนวก 6 กราฟมาตรฐาน Trolox สำหรับวิเคราะห์ฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระ FRAP assay

ตารางผนวก 11 สมการกราฟมาตรฐานสำหรับวิเคราะห์ฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระ

วิธีวิเคราะห์	สมการของกราฟมาตรฐาน (µM)	Coefficient of determination (R ²)
DPPH assay	$y = 0.3103x + 2.9803$	0.9995
ABTS assay	$y = 0.2233x + 23.205$	0.999
FRAP assay	$y = 0.0029x + 0.2698$	0.9997





Lack of Fit ของ Screening Study

การวิเคราะห์ Lack of Fit (LOF) ใช้สำหรับประเมินความเหมาะสมของโมเดลทางสถิติที่ได้จาก Screening Study ว่าโมเดลสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้เพียงพอหรือไม่ โดยใช้ค่าทางสถิติ ได้แก่ F-value และ p-value ในการพิจารณา ถ้า p-value มีค่ามากกว่า 0.05 แสดงว่าโมเดลไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับข้อมูลจริง โมเดลถือว่ามีความเหมาะสมและสามารถใช้ในการทำนายข้อมูลได้

จากผลการวิเคราะห์ Lack of Fit ของตัวแปร Compound D, DMPBD, Curcuminoid, DPPH, ABTS และ FRAP พบว่า p-value ของแต่ละตัวแปรมีค่ามากกว่า 0.05 ทุกตัว แสดงว่าโมเดลที่ได้มีความเหมาะสมและไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญจากข้อมูลจริง ดังแสดงในตารางผนวก 12

ตารางผนวก 12 ผลการวิเคราะห์ Lack of Fit สำหรับตัวแปรแต่ละตัวของ Screening Study

ตัวแปร	DF	SS	MS (variance)	SD. LOF	Sp	F-value	ค่า p-value
Compound D	16	476.864	29.804	5.459	7.824	0.487	0.839
DMPBD	16	227.386	14.211	3.770	3.773	0.998	0.611
Curcuminoid	16	370.060	23.129	4.809	5.943	0.655	0.753
DPPH	16	4221.380	263.836	16.243	14.838	1.198	0.548
ABTS	16	33004.100	2062.750	45.418	41.590	1.193	0.550
FRAP	16	19026.800	1189.170	34.484	35.055	0.968	0.622

หมายเหตุ DF (Degrees of Freedom) องศาอิสระของแต่ละตัวแปรในการวิเคราะห์ SS (Sum of Squares): ผลรวมของกำลังสองของค่าความแตกต่างระหว่างค่าที่คาดการณ์และค่าจริง MS (Mean Squares): ค่าเฉลี่ยของ SS ซึ่งได้จากการหารด้วยค่า DF SD. LOF (Standard Deviation of Lack of Fit): ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความผิดพลาดจาก Lack of Fit Sp: ค่าความผิดพลาดที่ใช้พิจารณาความเหมาะสมของโมเดล F-value: ค่าสถิติที่ใช้ทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าความผิดพลาดของโมเดลกับค่าความผิดพลาดของการทดลอง p-value: ค่าความน่าจะเป็นที่ใช้ในการพิจารณาความมีนัยสำคัญทางสถิติ

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาวศิริกาญจน์ วิญญูพันธ์
วันเกิด	วันที่ 8 มกราคม พ.ศ. 2537
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 73 ซอยเทอดไท 79/1 แขวงบางหว้า เขตภาษีเจริญ กรุงเทพมหานคร รหัสไปรษณีย์ 10160
ตำแหน่งหน้าที่การงาน	นักวิจัย
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ตำบลขามเือง อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม รหัสไปรษณีย์ 44150
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2559 ปริญญาแพทยแผนไทยบัณฑิต (พท.บ.) สาขาวิชา การแพทย์แผนไทย มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา พ.ศ. 2568 ปริญญาดุษฎีบัณฑิต (ปร.ด.) สาขาวิชาเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

พูน ปณ ภิโต ชีเว