



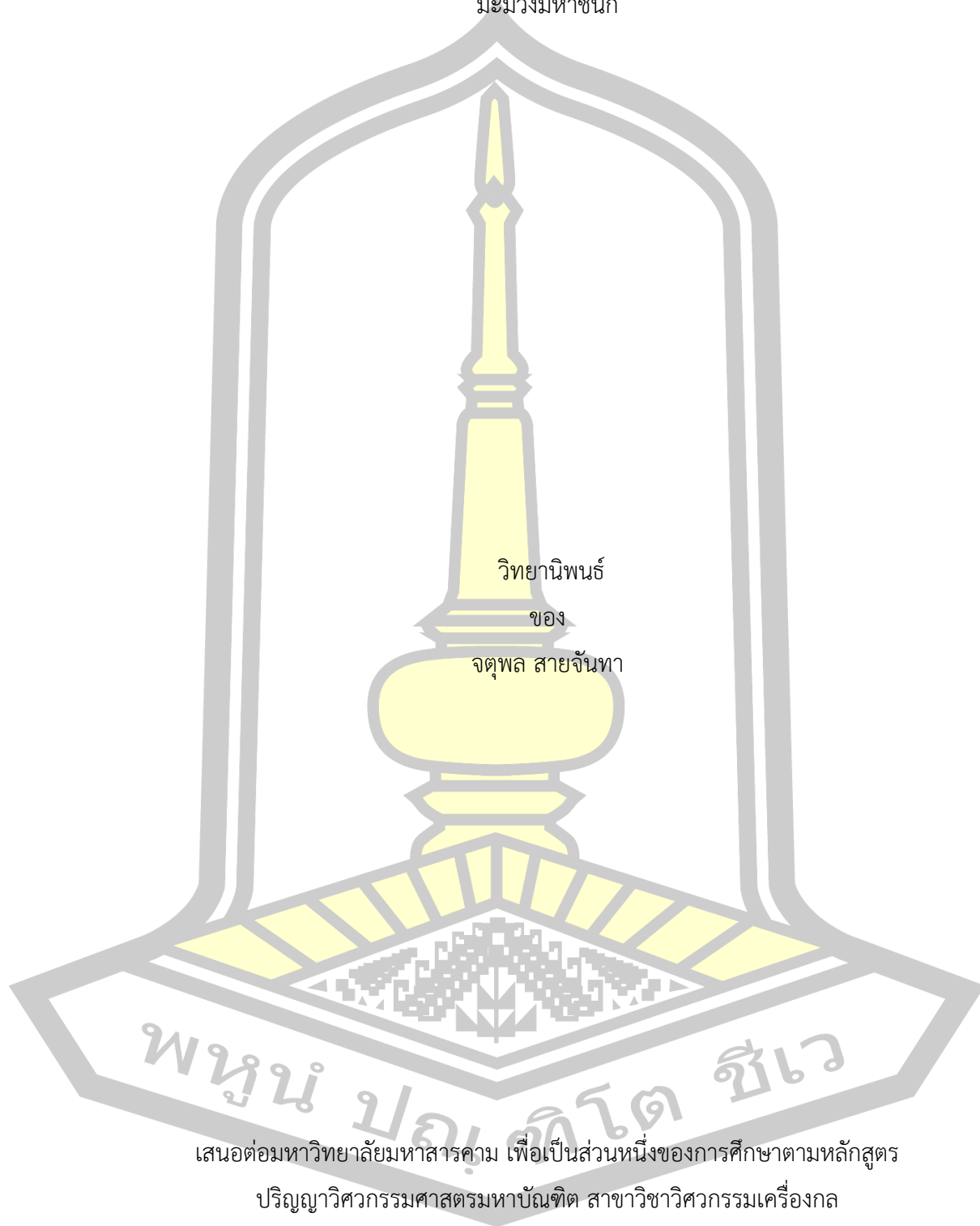
การประยุกต์ใช้เทคนิคการอบแห้งแบบโฟมแม่ทรมร่วมกับไมโครเวฟสำหรับแปรรูปอาหารว่างจาก
มะม่วงมหาชนก

วิทยานิพนธ์
ของ
จตุพล สายจันทา

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
พฤษภาคม 2568

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การประยุกต์ใช้เทคนิคการอบแห้งแบบโฟมเมทร่วมกับไมโครเวฟสำหรับแปรรูปอาหารว่างจาก
มะม่วงมหาชนก

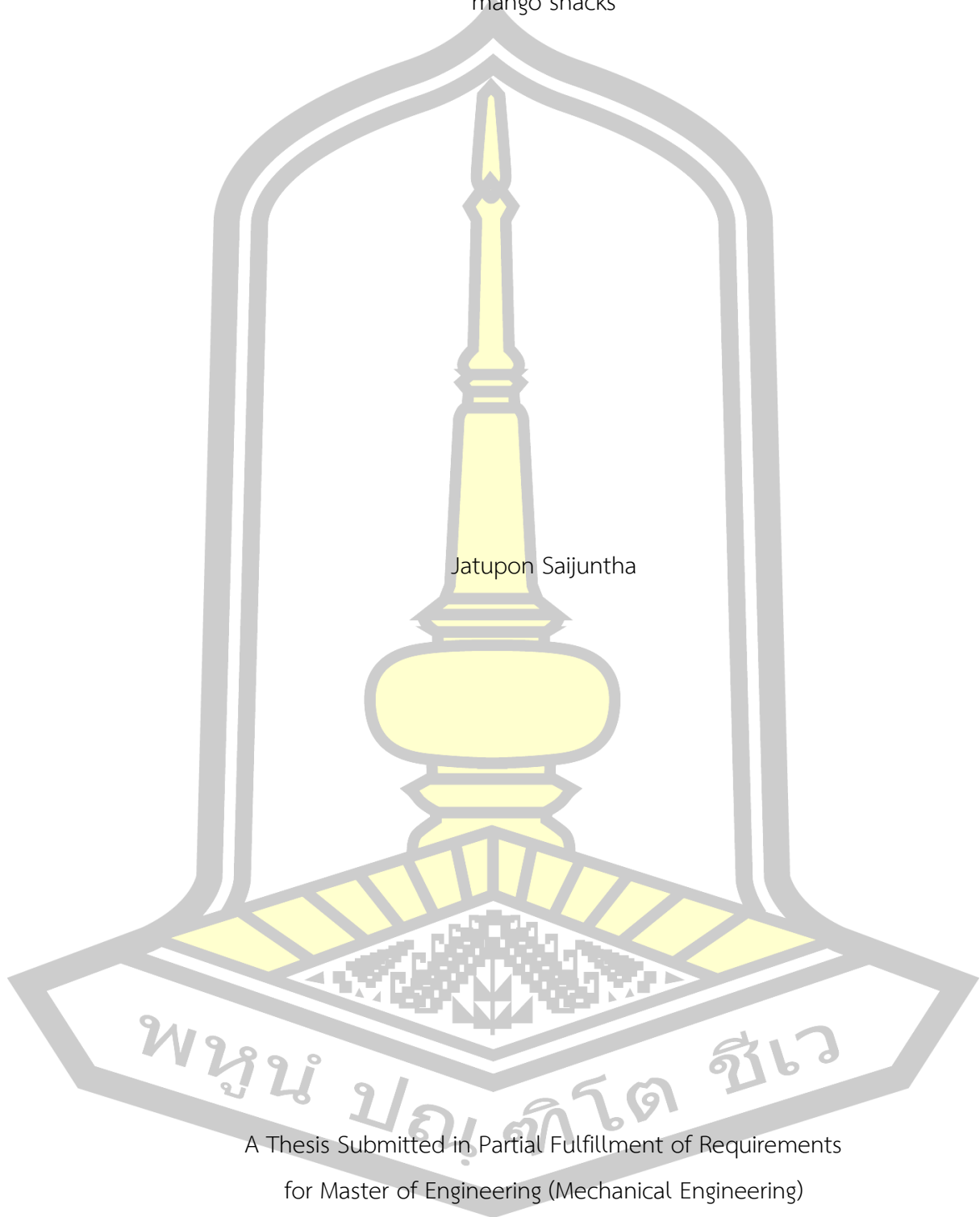


เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

พฤษภาคม 2568

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Applying a foam-mat drying combined with microwave technique for processing
mango snacks



Jatupon Saijuntha

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements
for Master of Engineering (Mechanical Engineering)

May 2025

Copyright of Maharakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายจตุพล สายจันทา แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร. ดลฤดี ใจสุทธิ์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รศ. ดร. วสันต์ ดำรงคำจันทร์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อ. ดร. ปริญญา ชูปวา)

กรรมการ

(ผศ. ดร. ละมุล วิเศษ)

กรรมการ

(ผศ. ดร. อนุรักษ์ ภูมิสะอาด)

กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก

(รศ. ดร. ดลฤดี ใจสุทธิ์)

มหาวิทยาลัยขอนแก่นให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

(รศ. ดร. จักรมาส เลหาวนิช)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ผศ. ดร. พลเดช เขาวรัตน์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง	การประยุกต์ใช้เทคนิคการอบแห้งแบบโคมเมทร่วมกับไมโครเวฟสำหรับแปรรูปอาหารว่างจากมะม่วงมหาชนก		
ผู้วิจัย	จตุพล สายจันทา		
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. วสันต์ ต้วงคำจันทร์ อาจารย์ ดร. ปริชญ์ ชูปวา		
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต	สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม	ปีที่พิมพ์	2568

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนาเทคนิคการอบแห้งแบบโคมเมทร่วมกับไมโครเวฟเพื่อแปรรูปมะม่วงมหาชนกเป็นผลิตภัณฑ์อาหารว่าง โดยมีเป้าหมายเพื่อลดปัญหาผลผลิตที่ไม่ได้มาตรฐานและเพิ่มมูลค่าให้กับผลไม้ไทย งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากระบวนการอบแห้งแบบโคมเมทร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ สำหรับการแปรรูปมะม่วงมหาชนกเป็นอาหารว่าง โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ (1) การศึกษาคุณลักษณะและสภาวะอบแห้งที่เหมาะสม (2) การควบคุมอุณหภูมิของโคมเมทระหว่างอบแห้งด้วยไมโครเวฟแบบขั้นตอน และ (3) การใช้ฟังก์ชันกำลังวัตต์ไมโครเวฟเพื่อควบคุมอุณหภูมิของโคมเมท

ผลการทดลอง พบว่า สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งโคมเมทมหาชนก คือ การใช้ลมร้อนที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส ร่วมกับกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟ 520 วัตต์ อย่างไรก็ตามการใช้กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟคงที่ทำให้อุณหภูมิของโคมเมทสูงเกินไป ส่งผลให้เกิดการไหม้ของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นการควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟแบบขั้นตอน(520/0 วัตต์) จึงถูกนำมาใช้เพื่อรักษาอุณหภูมิของโคมเมทให้คงที่ เพื่อรักษาอุณหภูมิของโคมเมทให้สม่ำเสมอ ผลการศึกษาแสดงว่าการควบคุมไมโครเวฟแบบขั้นตอนช่วยลดอุณหภูมิสูงเกินไปได้อย่างมีประสิทธิภาพลดการคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิ และสามารถคงโครงสร้างของโคมเมทได้ดีกว่าการใช้กำลังไฟคงที่

นอกจากนี้ ยังมีการศึกษาฟังก์ชันกำลังไฟที่ป้อนให้กับไมโครเวฟแบบแปรผันตามเวลาเพื่อควบคุมอุณหภูมิของโคมเมทอย่างแม่นยำ พบว่าการใช้ฟังก์ชันปรับกำลังไฟที่ป้อนให้กับไมโครเวฟช่วยลดความไม่สม่ำเสมอของการกระจายความร้อนภายในผลิตภัณฑ์ และยังสามารถคงคุณสมบัติทางเคมีกายภาพ เช่น ค่าความแข็ง, ความกรอบ และสี ได้ใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ที่ใช้สภาวะการอบแห้งแบบมาตรฐาน

ผลการทดลองยืนยันว่ากระบวนการควบคุมอุณหภูมิและกำลังไฟที่ป้อนให้กับไมโครเวฟ ทั้งในรูปแบบขั้นตอนและแบบปรับตามเวลา สามารถปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์มะม่วงอบแห้งได้อย่างมีประสิทธิภาพ ช่วยลดเวลาอบแห้ง รักษาโครงสร้างภายในโฟม และลดการใช้พลังงานเฉลี่ยต่อหน่วยผลิตภัณฑ์ จึงเป็นแนวทางที่มีศักยภาพสำหรับการผลิตอาหารว่างจากมะม่วงมหาชนกในระดับอุตสาหกรรมในอนาคต

คำสำคัญ : การอบแห้งแบบโฟมแมท, ไมโครเวฟ, การควบคุมอุณหภูมิ, กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟ, มะม่วงมหาชนก



TITLE	Applying a foam-mat drying combined with microwave technique for processing mango snacks		
AUTHOR	Jatupon Saijuntha		
ADVISORS	Associate Professor Wasan Duangkhamchan , Ph.D. Prarin Chupawa , Ph.D.		
DEGREE	Master of Engineering	MAJOR	Mechanical Engineering
UNIVERSITY	Maharakham University	YEAR	2025

ABSTRACT

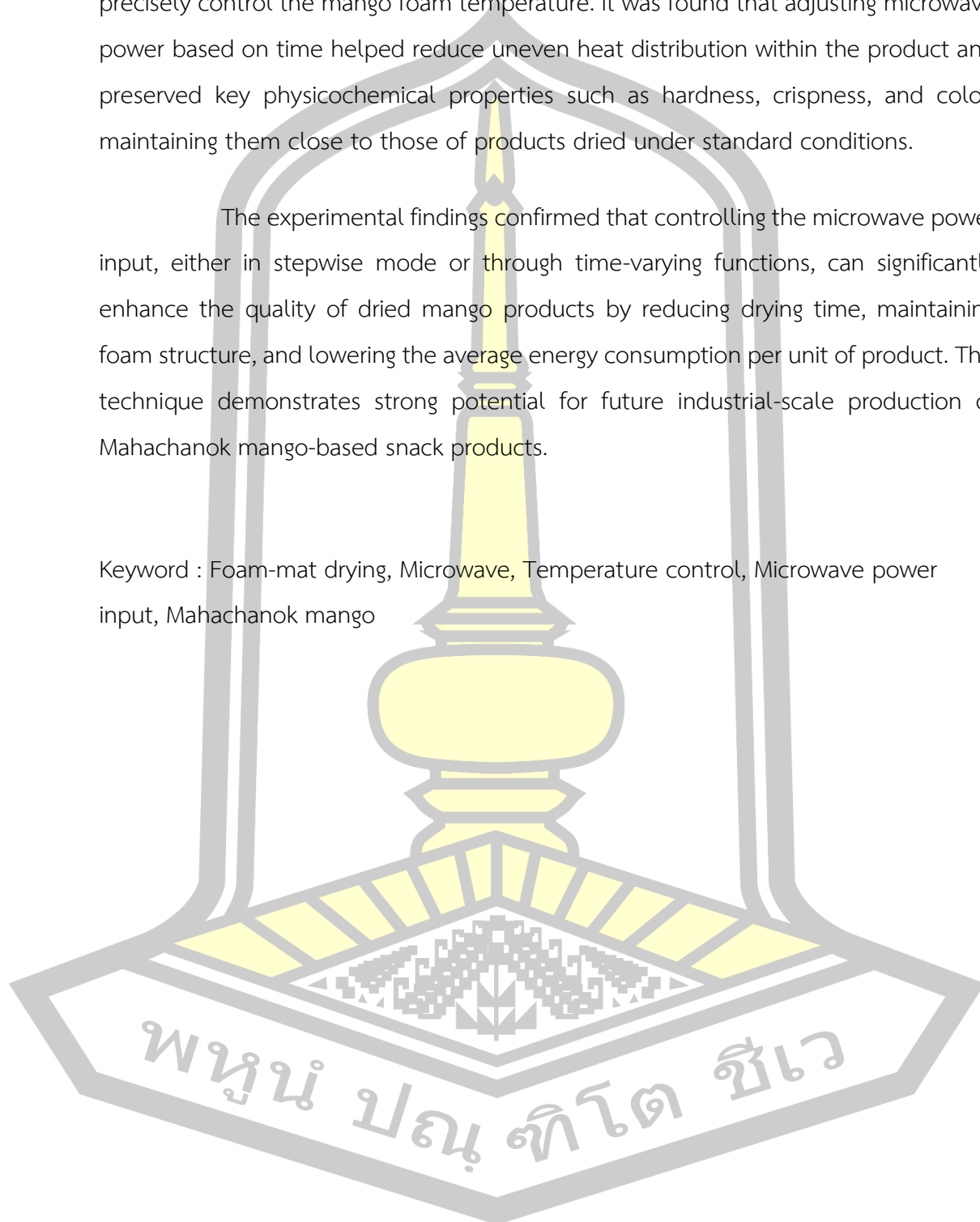
This research focuses on developing a foam-mat drying technique combined with microwave heating to process Mahachanok mango into a snack product, aiming to address issues related to substandard yields and add value to Thai fruits. The objectives of this study were to investigate the foam-mat drying process integrated with microwave heating for transforming Mahachanok mango into snacks, divided into three parts: (1) studying the characteristics and optimal drying conditions, (2) controlling the temperature of mango foam during drying using stepwise microwave power, and (3) applying time-varying microwave power functions to regulate the foam temperature.

The experimental results indicated that the optimal drying conditions for Mahachanok mango foam were hot air drying at 55°C combined with microwave power input of 520 W. However, using a constant microwave power input caused the foam temperature to become excessively high, leading to product burning. Therefore, stepwise control of the microwave power input (520/0 W) was employed to stabilize the foam temperature. The study showed that stepwise microwave control effectively reduced overheating, minimized temperature deviations, and better preserved the foam structure compared to constant power input.

Furthermore, a time-varying microwave power function was studied to precisely control the mango foam temperature. It was found that adjusting microwave power based on time helped reduce uneven heat distribution within the product and preserved key physicochemical properties such as hardness, crispness, and color, maintaining them close to those of products dried under standard conditions.

The experimental findings confirmed that controlling the microwave power input, either in stepwise mode or through time-varying functions, can significantly enhance the quality of dried mango products by reducing drying time, maintaining foam structure, and lowering the average energy consumption per unit of product. This technique demonstrates strong potential for future industrial-scale production of Mahachanok mango-based snack products.

Keyword : Foam-mat drying, Microwave, Temperature control, Microwave power input, Mahachanok mango



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความอนุเคราะห์จากทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้อง ซึ่งผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ซึ่งให้การสนับสนุนทุนสำหรับการทำวิจัยตลอดจน

รองศาสตราจารย์ ดร.วสันต์ ดั่งวงศ์จันทร์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ ดร.ปริญญา ชูปวา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ซึ่งได้ชี้แนะแนวทาง ให้ความรู้ คำแนะนำอย่างเอาใจใส่ในทุกขั้นตอนของการทำวิทยานิพนธ์ ทั้งในการทดลอง การเขียนวิทยานิพนธ์ ตลอดจนการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ตลฤดี ใจสุทธิ์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพล ภูมิสะอาด และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ละมุล วิเศษ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งให้ความกรุณาตรวจสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนการสอนวิชาการความรู้ต่าง ๆ แนะนำการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ และประสิทธิ์ประสาท วิชาความรู้ ในด้านต่าง ๆ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวที่คอยเอาใจใส่ดูแลและสนับสนุนทุกสิ่งทุกอย่างด้วยดีเสมอมา โดยเฉพาะการให้กำลังใจและคำแนะนำในการดำเนินชีวิตแก่ข้าพเจ้าตลอดมา

หากเนื้อหาหรือข้อมูลต่าง ๆ ในวิทยานิพนธ์นี้เป็นประโยชน์แก่ผู้สนใจศึกษาและผู้วิจัยท่านอื่น ๆ ข้าพเจ้าขอยกคุณงามความดีทั้งหลายนี้ให้แก่บุคคลทุกท่านที่กล่าวมา ท้ายสุดหากวิทยานิพนธ์เล่มนี้มีข้อบกพร่องหรือผิดพลาดประการใด ข้าพเจ้ากราบขออภัยไว้ ณ โอกาสนี้

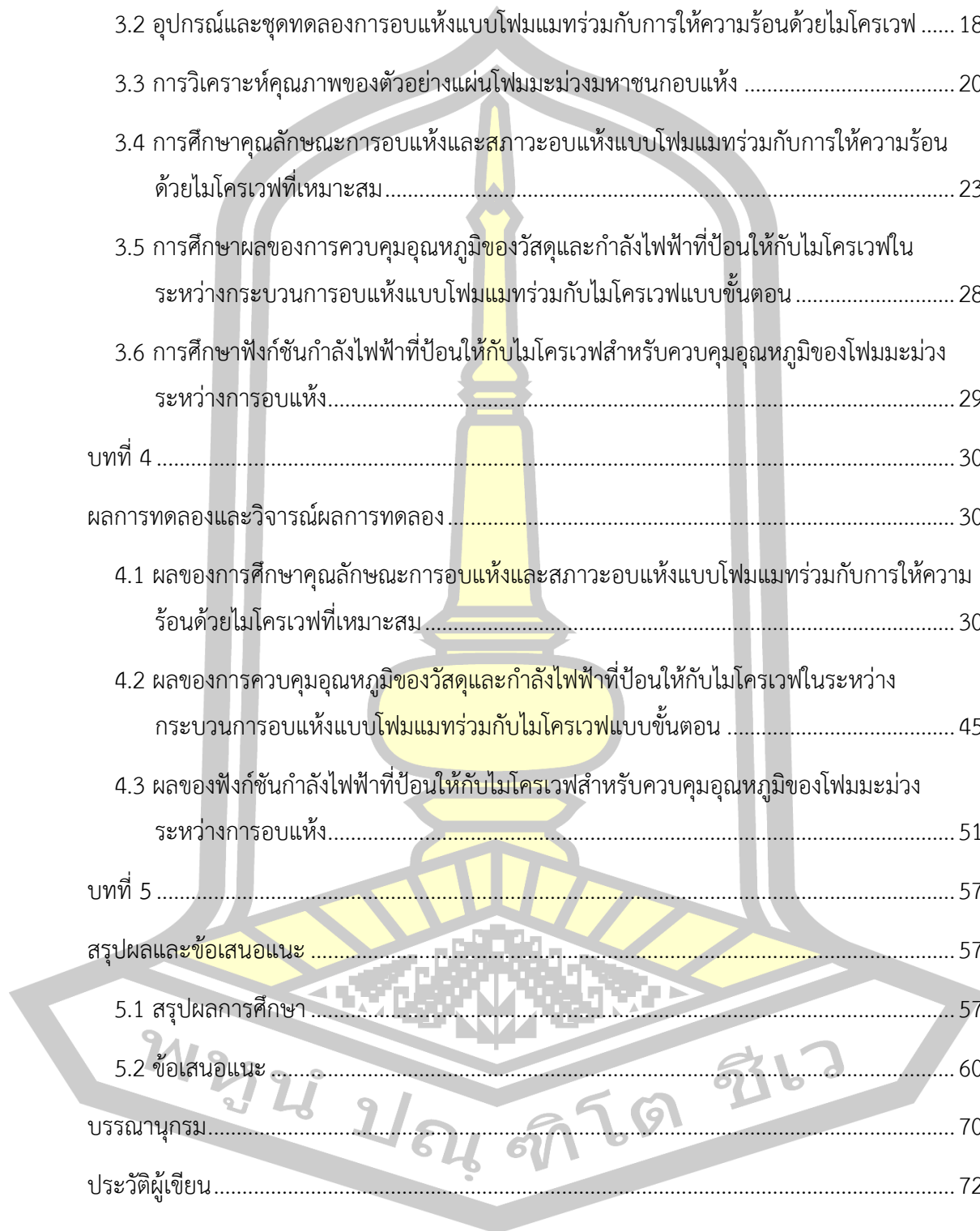
จตุพล สายจันทา

พูน ปณ ทิโต ชีเว

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ฉ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ฌ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพประกอบ.....	ฉ
บทที่ 1	1
บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2	5
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 มะม่วงมหาชนก.....	5
2.2 ทฤษฎีพื้นฐานการอบแห้ง.....	6
2.3 ทฤษฎีการอบแห้งแบบโฟมแมท.....	7
2.4 การอบแห้งโฟมแมทแบบไฮบริด.....	12
2.5 การทบทวนวรรณกรรม/ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	14
บทที่ 3	16
วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	16

3.1	วัสดุและการเตรียมตัวอย่างโคมะม่วงมหาชนก	16
3.2	อุปกรณ์และชุดทดลองการอบแห้งแบบโคมะม่วงมหาชนกกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ	18
3.3	การวิเคราะห์คุณภาพของตัวอย่างแผ่นโคมะม่วงมหาชนกอบแห้ง	20
3.4	การศึกษาคุณลักษณะการอบแห้งและสภาวะอบแห้งแบบโคมะม่วงมหาชนกกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟที่เหมาะสม	23
3.5	การศึกษาผลของการควบคุมอุณหภูมิของวัสดุและกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟในระหว่างกระบวนการอบแห้งแบบโคมะม่วงมหาชนกกับไมโครเวฟแบบขั้นตอน	28
3.6	การศึกษาฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟสำหรับควบคุมอุณหภูมิของโคมะม่วงระหว่างการอบแห้ง.....	29
บทที่ 4	30
	ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	30
4.1	ผลของการศึกษาคุณลักษณะการอบแห้งและสภาวะอบแห้งแบบโคมะม่วงมหาชนกกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟที่เหมาะสม	30
4.2	ผลของการควบคุมอุณหภูมิของวัสดุและกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟในระหว่างกระบวนการอบแห้งแบบโคมะม่วงมหาชนกกับไมโครเวฟแบบขั้นตอน	45
4.3	ผลของฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟสำหรับควบคุมอุณหภูมิของโคมะม่วงระหว่างการอบแห้ง.....	51
บทที่ 5	57
	สรุปผลและข้อเสนอแนะ	57
5.1	สรุปผลการศึกษา	57
5.2	ข้อเสนอแนะ	60
	บรรณานุกรม.....	70
	ประวัติผู้เขียน.....	72



สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 1	คุณค่าทางโภชนาการของเนื้อมะม่วงส่วนที่บริโภคได้ (ต่อปริมาณ 100 กรัม) [19]	5
ตาราง 2	สภาวะการทดลองสำหรับการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการอบแห้งและการหาสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมภายใต้การใช้กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟคงที่ตลอดระยะเวลาการอบแห้ง	23
ตาราง 3	รูปแบบสมการเอ็มพิริกัลที่ใช้ทำนายการอบแห้งวัสดุชิ้นบาง [76]	26
ตาราง 4	ค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความชื้นและความหนาของโฟมมะม่วงที่สภาวะการอบแห้งแตกต่างกัน	33
ตาราง 5	พารามิเตอร์ทางสถิติของแบบจำลองการอบแห้งที่ได้จากสภาวะการอบแห้งที่แตกต่างกัน	37
ตาราง 6	พารามิเตอร์ของแบบจำลอง Midilli ที่สภาวะการอบแห้งแตกต่างกัน	38
ตาราง 7	ปัจจัยการอบแห้งและผลตอบสนอง	38
ตาราง 8	ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของแบบจำลองสหสัมพันธ์ของผลตอบสนอง	40
ตาราง 9	คุณสมบัติทางเคมีกายภาพ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล ค่าความผิดพลาดของอุณหภูมิ และค่าการใช้พลังงานที่สภาวะการทดลองแบบขั้นตอนที่แตกต่างกัน	50
ตาราง 10	เปรียบเทียบคุณสมบัติทางเคมีกายภาพ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล และค่าการใช้พลังงานระหว่างสภาวะการทดลองแบบกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟคงที่และกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟแปรผัน	53

พจน ปรณ ทิโต ชีเว

สารบัญภาพประกอบ

	หน้า
ภาพประกอบ 1 ไดอะแกรมขั้นตอนการอบแห้งแบบโฟมเมท [37].....	11
ภาพประกอบ 2 ไดอะแกรมโครงสร้างของโฟม [37]	11
ภาพประกอบ 3 แผนผังของเครื่องอบแห้งแบบโฟมเมทร่วมกับไมโครเวฟ	19
ภาพประกอบ 4 ไดอะแกรมแสดงชุดควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟ	20
ภาพประกอบ 5 ตำแหน่งที่ใช้ในการวัดปริมาณความชื้นและความหนาของโฟม	21
ภาพประกอบ 6 จลนศาสตร์การอบแห้งของโฟมเนื้อมะม่วงที่สภาวะการอบแห้งต่างกัน	31
ภาพประกอบ 7 กราฟอัตราการอบแห้งที่สภาวะการอบแห้งที่แตกต่างกัน	32
ภาพประกอบ 8 ภาพโฟมเนื้อมะม่วงอบแห้งและภาพ SEM ที่อบแห้งภายใต้สภาวะที่แตกต่างกัน โดย	36
ภาพประกอบ 9 กราฟ 3 มิติแสดงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (D_{eff}).....	42
ภาพประกอบ 10 กราฟ 3 มิติแสดงค่าการใช้พลังงานจำเพาะ (SEC) ที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิอบแห้ง และกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟ	43
ภาพประกอบ 11 กราฟ 3 มิติแสดงค่าการเปลี่ยนแปลงเ็น (ΔE) ที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิอบแห้งและ กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟ.....	44
ภาพประกอบ 12 ฟังก์ชันการออกแบบกระบวนการ (Desirability function)	45
ภาพประกอบ 13 กราฟแสดงกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟและอุณหภูมิที่สภาวะการให้ความร้อน ด้วยไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟคงที่เท่ากับ 520 วัตต์	46
ภาพประกอบ 14 กราฟแสดงกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟและอุณหภูมิที่สภาวะการให้ความร้อน ด้วยไมโครเวฟแบบ 520/0 วัตต์.....	46
ภาพประกอบ 15 กราฟแสดงกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟและอุณหภูมิที่สภาวะการให้ความร้อน ด้วยไมโครเวฟแบบ 520/100 วัตต์.....	47
ภาพประกอบ 16 กราฟแสดงกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟและอุณหภูมิที่สภาวะการให้ความร้อน ด้วยไมโครเวฟแบบ 520/200 วัตต์.....	48

ภาพประกอบ 17 กราฟแสดงกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟและอุณหภูมิที่สภาวะการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟแบบ 520/300 วัตต์..... 48

ภาพประกอบ 18 กราฟแสดงกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟที่เป็นฟังก์ชันกับเวลาอบแห้ง 52

ภาพประกอบ 19 เปรียบเทียบจลนศาสตร์ความชื้นระหว่างการใช้กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟคงที่และการปรับกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟตามอุณหภูมิของวัสดุ..... 53

ภาพประกอบ 20 เปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของโฟมมะม่วงอบแห้งที่ผ่านสภาวะการอบที่.. 55

ภาพประกอบ 21 ภาพ SEM ของโฟมมะม่วงอบแห้งที่ผ่านกระบวนการอบแห้งภายใต้กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟคงที่ 520 วัตต์ ที่ตำแหน่ง (ก) ซ้าย (ข) กลาง (ค) ขวา และภายใต้กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟแปรผันที่ตำแหน่ง (ง) ซ้าย (จ) กลาง (ค) ขวา 56



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

มะม่วงมหาชนก (*Mangifera indica* L.) เป็นมะม่วงพันธุ์ดีของไทยที่เกิดจากการผสมข้ามสายพันธุ์ มีคุณสมบัติที่โดดเด่น คือ รสชาติหอมหวานเป็นเอกลักษณ์ จึงเป็นที่ชื่นชอบทั้งชาวไทยและต่างประเทศ ดังนั้นมะม่วงมหาชนกจึงได้รับการส่งเสริมให้เป็นสินค้าเกษตรของไทยและส่งออกไปยังประเทศต่าง ๆ ทั่วโลก ผลผลิตมะม่วงในประเทศไทยปี พ.ศ. 2566 มีผลผลิตมะม่วงสดหรือแช่แข็งส่งออกสู่ตลาดประมาณ 1.45 แสนตัน คิดเป็นมูลค่าประมาณ 6.8 พันล้านบาท [1] ส่วนใหญ่มะม่วงสดถูกส่งไปยังประเทศญี่ปุ่นซึ่งมีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยมีการส่งออกมะม่วงมหาชนกคิดเป็นส่วนแบ่งการตลาดประมาณเกือบร้อยละ 20 รองจากประเทศเม็กซิโกและฟิลิปปินส์ อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันพบว่า ผู้ประกอบการประสบปัญหาด้านการจัดการกับผลผลิตที่ไม่ผ่านเกรด เช่น ผลสุกเกินไป ขนาดไม่ได้ตามข้อกำหนด ซึ่งในแต่ละปีมีผลผลิตที่ไม่ผ่านเกรดจำนวนมาก โดยผลผลิตดังกล่าวบางส่วนจะถูกนำไปจำหน่ายยังโรงงานแปรรูปซึ่งจะได้ราคาค่อนข้างต่ำ (กิโลกรัมละ 2 บาท) และบางส่วนจะเกิดการเน่าเสียหาย ดังนั้นเพื่อเป็นการแก้ไขปัญหาดังกล่าว วิทยานิพนธ์นี้จึงมีแนวคิดในการพัฒนาผลิตภัณฑ์เพื่อให้สามารถเพิ่มมูลค่าได้ โดยใช้เทคโนโลยีแปรรูปด้วยวิธีการอบแห้งแบบโฟมแมทร่วมกับไมโครเวฟ เพื่อผลิตผลิตภัณฑ์อาหารว่างจากมะม่วงมหาชนก (แผ่นโฟมมะม่วงมหาชนกอบแห้ง) นอกจากนี้เทคโนโลยีที่จะนำมาใช้เป็นการประยุกต์การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟซึ่งมีคุณสมบัติในการให้ความร้อนด้วยอัตราที่สูง ดังนั้นจึงทำให้ใช้เวลาในการสัมผัสกับความเร็วก่อนข้างสั้น ส่งผลให้สามารถลดการสูญเสียกลิ่นรสของผลิตภัณฑ์ซึ่งเป็นเอกลักษณ์ของมะม่วงมหาชนกได้ ขณะเดียวกันการใช้เทคโนโลยีอื่น ๆ เช่น การอบแห้งแบบโฟมแมทร่วมกับการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง จากข้อมูลพบว่าเป็นเทคนิคที่เหมาะสมสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์กึ่งสำเร็จรูปและอาหารอบกรอบเมื่อพิจารณาโครงสร้างที่เป็นรูพรุนที่ได้ แต่วิธีการอบแห้งดังกล่าวจะใช้ระยะเวลาและค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง จากข้อจำกัดที่กล่าวมาข้างต้นนั้น วิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำเสนอวิธีการอบแห้งแบบโฟมแมทร่วมกับการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

การอบแห้งแบบโฟมแมทเป็นกระบวนการที่ใช้ในการเปลี่ยนวัสดุแข็งของเหลวให้เป็นของแห้ง ซึ่งมักใช้กับผักและผลไม้เนื่องจากใช้งานง่าย ใช้เวลาในการอบแห้งสั้น และต้นทุนต่ำ [2] เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการอบแห้งแบบฟุ้งฝอย [3] เป็นผลให้การอบแห้งด้วยโฟมแมทมีศักยภาพสำหรับวิสาหกิจชุมชนขนาดกลางและขนาดย่อม เนื่องจากความง่ายและความเหมาะสมสำหรับวัสดุที่แห้งยากด้วยต้นทุนที่ต่ำ [4]–[6] ในกระบวนการนี้วัสดุของเหลวหรือกึ่งของเหลวที่มีความหนืดสูงจะถูกทำให้เกิดโฟมโดยการผสมกับสารก่อโฟม และต่อมาอบแห้งในเวลาอันสั้นเนื่องจากลักษณะของโฟมที่มีรูพรุนและพื้นที่ผิวการระเหยที่ขยายใหญ่ขึ้น [7], [8] ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีคุณสมบัติการดูดน้ำกลับที่ดี [9] อย่างไรก็ตามการถ่ายเทความร้อนของอากาศที่อยู่ในโฟมของวัสดุนั้นมีประสิทธิภาพต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับถ่ายเทความร้อนของวัสดุที่เป็นของเหลวและของแข็ง [10] เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อน จึงมีการใช้คลื่นไมโครเวฟเพื่อสร้าง

ความร้อนเชิงปริมาตร ซึ่งการแทรกซึมของพลังงานไมโครเวฟโดยตรงไปยังวัสดุช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนของอากาศที่กักอยู่ในโฟมได้ดีขึ้น ดังนั้นเวลาในการทำให้แห้งจึงเร็วขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรอบแห้งด้วยโฟมแบบเดิมที่มีการใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียว [11]

กรอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟเป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพสำหรับอาหารที่ทำจากผักและผลไม้ เนื่องจากใช้เวลาในการอบแห้งที่สั้นกว่าและมีคุณภาพที่ดีขึ้นของผลิตภัณฑ์ที่ได้ [12]–[16] ข้อดีเหล่านี้ส่วนใหญ่เกิดจากการให้ความร้อนเชิงปริมาตรอย่างรวดเร็วซึ่งเกิดจากพลังงานไมโครเวฟ อย่างไรก็ตามการอบแห้งด้วยไมโครเวฟอย่างรวดเร็วยังประสบปัญหาในเรื่องของการกระจายความร้อนที่ไม่สม่ำเสมอและความชื้นของพลังงานไมโครเวฟต่อน้ำหนักของวัสดุที่เพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลาการอบแห้ง ส่งผลให้เกิดความร้อนสูงเกินไปและการไหม้เกรียมของผลิตภัณฑ์แห้งที่ได้ ความร้อนที่สูงเกินไปดังกล่าวนี้เกิดจากการกระจายสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในผลิตภัณฑ์ที่ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งเกิดจากการออกแบบอุปกรณ์และพฤติกรรมทางความร้อนของผลิตภัณฑ์ในสนามแม่เหล็กไฟฟ้า [17] การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติไดอิเล็กทริกของตัวอย่างในระหว่างการอบแห้งส่งผลอย่างมากต่อพฤติกรรมทางความร้อนของวัสดุ แม้ว่าการใช้ลมร้อนร่วมด้วยจะสามารถแก้ปัญหาของการกระจายความร้อนที่ไม่สม่ำเสมอนี้ได้บ้าง แต่ความชื้นของพลังงานไมโครเวฟที่วัสดุดูดซับระหว่างการอบแห้งก็ยังคงส่งผลต่อการเกิดความร้อนที่สูงเกินไป โดยทั่วไปพลังงานไมโครเวฟที่ปล่อยออกมาจากแมกนีตรอนจะมีค่าคงที่ตลอดระยะเวลาการอบแห้ง ในขณะที่การอบแห้งดำเนินต่อไปนั้นน้ำหนักของวัสดุจะลดลงเนื่องจากการระเหยของน้ำ ส่งผลให้ความชื้นของพลังงานไมโครเวฟเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการอบแห้ง และเกิดความร้อนสูงเกินไปจนกระทั่งการอบแห้งสิ้นสุดลง ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยการใช้คลื่นไมโครเวฟแบบขั้นตอน และการควบคุมพลังงานไมโครเวฟที่ใช้เพื่อรักษาอุณหภูมิของวัสดุให้คงที่ตลอดระยะเวลาการอบแห้ง อาจเป็นวิธีการที่สามารถนำมาใช้เพื่อหลีกเลี่ยงหรืออย่างน้อยสามารถลดความร้อนที่สูงเกินไปและการไหม้เกรียมได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1.2.1 เพื่อศึกษาคุณลักษณะการอบแห้งและสภาวะอบแห้งแบบโฟมเมทร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟที่เหมาะสม
- 1.2.2 เพื่อศึกษาผลของการควบคุมอุณหภูมิของวัสดุและกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟในระหว่างกระบวนการอบแห้งแบบโฟมเมทร่วมกับไมโครเวฟ ต่อพฤติกรรมกรอบแห้ง การใช้พลังงาน และคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์มะม่วงมหาชนก

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

- 1.3.1 วัสดุที่ใช้ คือ เนื้อมะม่วงมหาชนก
- 1.3.2 สารก่อโฟมที่ใช้ คือ ไข่ขาว และสารให้ความคงตัวของโฟม คือ แชนแทนกัม
- 1.3.3 เครื่องอบแห้งที่ใช้มีขนาดระดับห้องปฏิบัติการ
- 1.3.4 ตัวแปรที่ศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้ได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ส่วน โดยมีตัวแปรที่ศึกษาแตกต่างกัน
ดังนี้

1.3.4.1) การศึกษาคุณลักษณะการอบแห้งและสภาวะอบแห้งแบบโฟมแม่ทรม่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟที่เหมาะสม

1) ตัวแปรต้น ประกอบด้วย

- อุณหภูมิความร้อนอยู่ในช่วง 55 65 และ 75 องศาเซลเซียส
- กำลังวัตต์ไมโครเวฟอยู่ในช่วง 300 450 และ 600 วัตต์

2) ตัวแปรตาม ประกอบด้วย

- ค่าความชื้นของโฟมมะม่วง
- ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล
- ลักษณะโฟมภายนอกและโครงสร้างภายในของโฟม
- ความหนาของโฟม ค่าการเปลี่ยนแปลงสี และค่าการใช้พลังงานจำเพาะ

3) ตัวแปรควบคุม ประกอบด้วย

- ความเร็วลมเท่ากับ 0.5 เมตรต่อวินาที
- ความหนาของโฟมมะม่วงเท่ากับ 20 มิลลิเมตร
- ปริมาณความชื้นสุดท้ายน้อยกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 7 ฐานเปียก

1.3.4.2) การศึกษาผลของการควบคุมอุณหภูมิของวัสดุและกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟในระหว่างกระบวนการอบแห้งแบบโฟมแม่ทรม่วมกับไมโครเวฟแบบขั้นตอน

1) ตัวแปรต้น ประกอบด้วย

- อุณหภูมิของวัสดุจากสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมที่ได้จากหัวข้อ 1.3.4.1
- กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟระดับสูงจากสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมที่ได้จากหัวข้อ 1.3.4.1
- กำลังวัตต์ไมโครเวฟระดับต่ำ 4 ระดับ คือ 0,100,200,300 วัตต์

2) ตัวแปรตาม ประกอบด้วย

- ค่าความชื้นของโฟมมะม่วง
- คุณสมบัติทางเคมีกายภาพ ได้แก่ ค่าปริมาณน้ำอิสระ และค่าดัชนีสีน้ำตาล
- ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล
- ค่าการใช้พลังงานจำเพาะ

3) ตัวแปรควบคุม ประกอบด้วย

- ความเร็วลมเท่ากับ 0.5 เมตรต่อวินาที

- ความหนาของโพนมะม่วงเท่ากับ 20 มิลลิเมตร
- ปริมาณความชื้นสุดท้ายน้อยกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 7 ฐานเปียก

1.3.4.3) การศึกษาฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟสำหรับควบคุมอุณหภูมิของโพนมะม่วงระหว่างการอบแห้ง

1) ตัวแปรต้น ประกอบด้วย

- อุณหภูมิของวัสดุจากสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมที่ได้จากหัวข้อ 1.3.4.1
- การผันแปรของกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟตลอดระยะเวลาการอบแห้งที่ได้จากการหาสมการโดยใช้กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟแบบขั้นตอนสำหรับควบคุมอุณหภูมิของโพนมะม่วงในระหว่างการอบแห้งในหัวข้อ 1.3.4.2

2) ตัวแปรตาม ประกอบด้วย

- ลักษณะโพนภายนอกและโครงสร้างภายในของโพน
- คุณสมบัติทางเคมีกายภาพ ได้แก่ ค่าความชื้น ค่าปริมาณน้ำอิสระ และค่าดัชนีสีน้ำตาล
- ค่าความหนาของโพน ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล
- คุณสมบัติด้านเนื้อสัมผัส ได้แก่ ค่าความแข็ง และความกรอบ
- ค่าการใช้พลังงานจำเพาะ และค่าความผิดพลาดของอุณหภูมิโพน

3) ตัวแปรควบคุม ประกอบด้วย

- ความเร็วลมเท่ากับ 0.5 เมตรต่อวินาที
- ความหนาของโพนเท่ากับ 20 มิลลิเมตร
- ปริมาณความชื้นสุดท้ายน้อยกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 7 ฐานเปียก

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้กระบวนการใหม่สำหรับกระบวนการผลิต คือ กระบวนการอบแห้งแบบโพนแมทร่วมกับไมโครเวฟ

1.4.2 ได้ผลิตภัณฑ์ใหม่ คือ อาหารว่างที่ได้จากมะม่วงมหาชนก

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 มะม่วงมหาชนก

มะม่วงมหาชนก มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Mangifera indica* L. เป็นมะม่วงพันธุ์ใหม่ที่เกิดจากการผสมระหว่างมะม่วงพันธุ์ชั้นเซทกับมะม่วงพันธุ์หนึ่งกลางวัน ผลแก่มีจุดประที่ผิวปานกลาง ผลดิบมีผิวเนียนเรียบสีเขียวอ่อน เนื้อผลดิบสีขาวเนื้อละเอียด มีเส้นใยน้อย รสชาติเปรี้ยวและมีกลิ่นยาง เนื้อผลสุกมีสีเหลืองอมส้ม เนื้อละเอียดมีเส้นใยน้อยและแน่น รสชาติหวานอมเปรี้ยว มีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ ประมาณ 15-18 องศาบริกซ์ มีกลิ่นหอมและฉุนเมื่อสุกงอม ผลมีขนาดกว้าง 6-8 มิลลิเมตร ยาวประมาณ 15-18 มิลลิเมตร หนาประมาณ 5-7 มิลลิเมตร และมีน้ำหนักประมาณ 350-500 กรัมต่อผล เมล็ดแบนและมีส่วนของเนื้อที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ประมาณร้อยละ 79 ของผล เนื้อมะม่วงมหาชนกมีรสชาติดหวานอมเปรี้ยว อุดมไปด้วยวิตามินซี ป้องกันโรคหวัด และช่วยชะลอริ้วรอยก่อนวัยได้ด้วย [18]

มะม่วงมหาชนกเป็นผลไม้ที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูงโดยเฉพาะคาร์โบไฮเดรต เส้นใยอาหาร วิตามิน และแร่ธาตุต่าง ๆ เช่น แคลเซียม และโพแทสเซียม คุณค่าทางโภชนาการของผลมะม่วง นอกจากมะม่วงมหาชนกยังอุดมไปด้วยสารต้านอนุมูลอิสระซึ่งประกอบไปด้วยรายละเอียดดังในตาราง 1

ตาราง 1 คุณค่าทางโภชนาการของเนื้อมะม่วงส่วนที่บริโภคได้ (ต่อปริมาณ 100 กรัม) [19]

ส่วนประกอบ (หน่วย)	ต่อปริมาณ 100 กรัม
องค์ประกอบ	
น้ำ (กรัม)	81.71
พลังงาน (กิโลจูล)	272
โปรตีน (กรัม)	0.51
ไขมันทั้งหมด (กรัม)	0.27
เถ้า (กรัม)	0.50
คาร์โบไฮเดรต (กรัม)	17.0
เส้นใย (กรัม)	1.8
น้ำตาล (กรัม)	14.8
แร่ธาตุ	
แคลเซียม (มิลลิกรัม)	10
เหล็ก (มิลลิกรัม)	0.13
แมกนีเซียม (มิลลิกรัม)	9

ส่วนประกอบ (หน่วย)	ต่อปริมาณ 100 กรัม
องค์ประกอบ	
สารต้านอนุมูลอิสระ	
เนื้อมะม่วงสุก (ไม่โครโมลต่อกรัมน้ำหนักสด)	5.66
เนื้อมะม่วงมหาชนก (ไม่โครโมลต่อกรัมน้ำหนักสด)	4.54
เปลือกมะม่วงสุก (ไม่โครโมลต่อกรัมน้ำหนักสด)	490.56
เปลือกมะม่วงมหาชนก (ไม่โครโมลต่อกรัมน้ำหนักสด)	425.82

2.2 ทฤษฎีพื้นฐานการอบแห้ง

การอบแห้งเป็นกระบวนการดั้งเดิมที่ใช้ในการถนอมอาหารที่นิยมใช้มาช้านาน ในอดีตนิยมใช้วิธีการตากแดด หรือการนำไปคั่วกับกระทะ เช่น การคั่วเมล็ดกาแฟ หรือใบชา ในการอบแห้ง ความชื้นที่อยู่ในอาหารจะลดลงเนื่องจากการระเหยของน้ำ การระเหยของน้ำระหว่างกระบวนการอบแห้ง ณ อุณหภูมิต่าง ๆ จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี กายภาพ และชีวภาพของอาหาร ทำให้ความเข้มข้นของอาหารเพิ่มขึ้น ซึ่งจะช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ทุกชนิด เช่น รา ยีสต์ แบคทีเรียที่เป็นสาเหตุให้อาหารเสื่อมเสีย รวมถึงยับยั้งการทำงานของเอนไซม์หรือชะลอปฏิกิริยาต่าง ๆ ทั้งทางเคมีและทางชีวเคมีซึ่งมีน้ำเป็นส่วนร่วม และเป็นเหตุให้อาหารเสื่อมเสีย นอกจากนี้การอบแห้งยังทำให้อาหารมีน้ำหนักเบาและลดปริมาตรลง ส่งผลให้สะดวกต่อการขนส่ง การบริโภค หรือการทำไปเป็นวัตถุดิบในการแปรรูปต่อเนื่องด้วยวิธีอื่น ทั้งยังเป็นการสร้างผลิตภัณฑ์ใหม่ที่เป็นทางเลือกของผู้บริโภคมากขึ้นอีกด้วย อย่างไรก็ตามในการอบแห้งอาหาร น้ำที่เคลื่อนที่ออกจากอาหารจะถูกแทนที่ด้วยอากาศหรือแก๊สออกซิเจน ทำให้เกิดการหดตัวหรือการเปลี่ยนแปลงของรูปร่าง สี กลิ่นรส และลักษณะเนื้อสัมผัส รวมถึงความสามารถในการคืนรูปและการลดลงของคุณค่าทางอาหารของผลิตภัณฑ์แห้ง ดังนั้นความเหมาะสมของอุปกรณ์ เครื่องมือ ขั้นตอน วิธีการในการอบแห้งอาหารจึงยังต้องมีการศึกษา ค้นคว้า และพัฒนาอย่างต่อเนื่อง

ในระหว่างกระบวนการอบแห้งจะเกิดกระบวนการถ่ายเทพลังงานความร้อนจากสิ่งแวดล้อม เพื่อระเหยความชื้นบริเวณผิวนอก ทำให้เกิดความแตกต่างของความดันไอของน้ำระหว่างอากาศภายนอกกับความชื้นภายในชิ้นอาหาร เกิดเป็นแรงขับให้น้ำจากภายในเคลื่อนย้ายออกมาที่ผิวนอกของอาหาร [20] ด้วยแรงคาпилลารี (Capillary force) และการแพร่ของน้ำผ่านชั้นของตัวถูกละลายมายังผิวนอกของอาหารและระเหยออกไป [21]

ภายใต้กระบวนการอบแห้งที่ความดันคงที่นั้นสามารถแบ่งช่วงการอบแห้งออกได้เป็น 2 ช่วง คือ ช่วงอัตราอบแห้งลดลงและช่วงอัตราอบแห้งคงที่ ขณะเดียวกันอาหารที่นำมาทำแห้งสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ไวต่อความชื้น (Hygroscopic material) เป็นอาหารที่ดูดซับความชื้นไว้ได้ดีและความดันย่อย (Partial pressure) ของไอน้ำผันแปรไปตามความชื้นและกลุ่มที่ไม่ไวต่อความชื้น (Non-hygroscopic material) เป็นกลุ่มอาหารที่ได้ดูดซับความชื้นเป็นอาหารที่มีความดันไอน้ำคงที่ที่ระดับความชื้นต่าง ๆ

เมื่อเริ่มอบแห้งอาหารในช่วงแรก น้ำในอาหารมีปริมาณมาก ทำให้น้ำภายในอาหารสามารถเคลื่อนที่ไปแทนที่น้ำที่ผิวหน้าที่ระเหยไปได้ทัน จนกระทั่งน้ำในอาหารเหลือน้อยจนไม่เพียงพอที่จะไปแทนที่น้ำที่ผิวหน้าได้ทัน จึงเป็นจุดสิ้นสุดของอัตราการอบแห้งคงที่ จากนั้นจะเป็นช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ในระหว่างช่วงอัตราอบแห้งลดลง พบว่า เกิดการระเหยน้ำยึดเกาะบางส่วนไปจากชิ้นอาหาร ทำให้ปริมาณความชื้นในอาหารลดลง ส่งผลให้อัตราการเคลื่อนที่ของความชื้นภายในอาหารมายังผิวหน้าช้าลง โดยอัตราการอบแห้งจะคงที่เมื่อความชื้นของอาหารลดลงจนกระทั่งค่าความชื้นในอาหารสมดุลกับความชื้นในอากาศ (Equilibrium moisture value) [20]

2.3 ทฤษฎีการอบแห้งแบบโฟมเมท

การอบแห้งถือเป็นวิธีการถนอมอาหารที่มีมาแต่โบราณ และเป็นวิธีการถนอมอาหารระยะยาวที่ดีที่สุดวิธีหนึ่งมาโดยตลอด [22] โดยทั่วไปแล้วการอบแห้งถือเป็นกระบวนการในการแปลงอาหารในรูปแบบใด ๆ (ของแข็ง ของเหลว และกึ่งของเหลว) ไปเป็นผลิตภัณฑ์ของแข็งขั้นสุดท้ายที่มีความชื้นต่ำและมีความคงตัว ปริมาณน้ำอิสระของอาหารจะลดลงอย่างมากในระหว่างการอบแห้ง ทำให้อาหารทนต่อการเน่าเสียที่เกิดจากจุลินทรีย์ [23] การกำจัดความชื้นในอาหารออกโดยอาศัยกลไกการถ่ายเทความร้อนและมวลพร้อมกัน [24] ความร้อนช่วยเพิ่มพลังงานให้กับน้ำอย่างเพียงพอที่จะทำให้เกิดการระเหยได้ ไอระเหยจะเคลื่อนที่จากภายในผลิตภัณฑ์ไปยังพื้นผิวอันเป็นผลมาจากความแตกต่างของการแพร่ระหว่างความชื้นและไอที่เกิดขึ้นระหว่างชั้นต่าง ๆ ของผลิตภัณฑ์ การถ่ายเทความร้อนและมวลเกิดขึ้นในระดับโมเลกุล ค่าการนำความร้อนของผลิตภัณฑ์จำกัดอัตราการถ่ายเทความร้อนภายในผลิตภัณฑ์ และบนพื้นผิว ความแตกต่างของอุณหภูมิและสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะควบคุมอัตราการถ่ายเทความร้อน การแพร่ของโมเลกุลของน้ำจากผลิตภัณฑ์สู่บรรยากาศโดยรอบเกิดขึ้นโดยอาศัยกลไกความแตกต่างของความดันไอ ซึ่งจำเป็นต้องใช้พลังงานอย่างมากเพื่อลดปริมาณความชื้นของอาหารลง ทำให้การอบแห้งเป็นกระบวนการที่สิ้นเปลืองพลังงานสูง [25]

แม้ว่าขณะอบแห้งคุณภาพอาหารจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมาก แต่ความก้าวหน้าในเทคนิคการอบแห้งได้ช่วยลดการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวได้ การพัฒนาและการประยุกต์ใช้เทคนิคการอบแห้งแบบใหม่สามารถช่วยในการพัฒนาผลิตภัณฑ์อบแห้งและอาหารสะดวกซื้อใหม่ ๆ ได้ ซึ่งตอบสนองความต้องการด้านคุณภาพและความคงตัวได้อย่างง่ายดาย และในขณะเดียวกันก็ประหยัดด้วย

การอบแห้งแบบโฟมเมทได้ถูกพัฒนาขึ้นมาเป็นวิธีการอบแห้งที่สำคัญ เป็นกระบวนการที่เปลี่ยนรูปแบบของวัสดุที่เป็นของเหลวให้เป็นโฟมที่มีความคงตัว จากนั้นอบแห้งด้วยลมร้อน ซึ่งกระบวนการดังกล่าวนี้เป็นเทคนิคง่าย ๆ และแสดงให้เห็นผลลัพธ์ที่ดีในการทำให้อาหารเหลวแห้งที่อุณหภูมิต่ำ การอบแห้งแบบโฟมเมทเหมาะสำหรับการอบแห้งอาหารที่ไวต่อความร้อน ปริมาณน้ำตาลสูง และอาหารที่มีความหนืด ซึ่งมักจะแห้งยาก นอกจากนี้ยังเป็นทางเลือกที่ประหยัดและเป็นไปได้เมื่อเทียบกับวิธีการอบแห้งอื่น ๆ สำหรับการผลิตผงอาหารเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งแบบพ่นฝอย

การอบแห้งแบบโฟมเมทเป็นวิธีการอบแห้งอาหารเหลวที่มีประสิทธิภาพ เหมาะสำหรับน้ำผลไม้และผักบดที่ไวต่อความร้อนที่มีลักษณะหนืดและแห้งได้ยาก การทำให้เกิดโฟมของของเหลวช่วย

เพิ่มพื้นที่ผิวอย่างมาก ทำให้พื้นผิวการถ่ายเทมวลเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นลง ในช่วง 10-20 ปีที่ผ่านมาการอบแห้งแบบโฟมแมทได้รับความนิยมอีกครั้ง เนื่องจากความสามารถที่เพิ่มขึ้นในการแปรรูปวัสดุที่แห้งยาก และผลิตภัณฑ์อบแห้งที่ได้มีคุณสมบัติเป็นไปตามที่ต้องการ เช่น การคืนรูปด้วยน้ำดี ความหนาแน่นที่ควบคุมได้ เป็นต้น มีรายงานว่าวัสดุแห้งของแผ่นโฟมสามารถรักษาสารระเหยได้ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุแห้งที่ไม่ใช่โฟม [26]

อาหารหลายชนิดไม่มีคุณสมบัติการเกิดโฟมแม้ว่าจะใช้วิธีการทำให้เกิดโฟมตามที่อธิบายไว้ข้างต้นก็ตาม อาหารดังกล่าวสามารถเปลี่ยนเป็นโฟมที่มีความเสถียรได้โดยใช้สารเติมแต่งบางชนิด สารเติมแต่งที่ช่วยให้เกิดโฟมคงตัวแบ่งออกเป็นสารทำให้เกิดฟองและสารเพิ่มความคงตัวของโฟม สารทำให้เกิดโฟมจะช่วยลดแรงตึงผิวระหว่างส่วนต่อประสานและช่วยในการเกิดโฟมของของเหลว สารเกิดโฟมที่ดีช่วยสร้างฟิล์มที่แข็งแรง ยืดหยุ่นเหนียว และเหนียวซึ่งมีเสถียรภาพทางความร้อนและทางกลที่ดีเยี่ยม [3] โฟมที่เกิดขึ้นจะคงตัว ซึ่งเป็นข้อกำหนดเบื้องต้นในการอบแห้งแบบโฟมแมท โปรตีนมักทำหน้าที่เป็นสารออกฤทธิ์ที่พื้นผิวที่ดีและให้ความคงตัวทางจลน์ ซึ่งช่วยลดความไม่เสถียรทางอุณหพลศาสตร์ในโฟม [27] โปรตีนที่ใช้เป็นสารก่อโฟมในอาหารควรมีประสิทธิภาพที่ความเข้มข้นต่ำ ทำงานอย่างเหมาะสมในช่วง pH ที่กว้าง และออกฤทธิ์อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อมีองค์ประกอบอื่น ๆ ที่อาจมีลักษณะยับยั้งการเกิดโฟม สารทำให้เกิดฟองที่ใช้กันทั่วไปในการศึกษาต่าง ๆ ได้แก่ อัลบูมินไข่ทั้งแบบสดและแห้ง [5], [11], [28], [29] เวย์โปรตีนเข้มข้น [28] และโปรตีนไอโซเลท [30] และไอโซเลทโปรตีนจากถั่วเหลือง [31], [32]

สารเพิ่มความคงตัวของโฟมเป็นสารเติมแต่งที่ช่วยให้โฟมสามารถคงโครงสร้างไว้ได้นานขึ้น และชะลอการยุบรวมตัวกัน โพลีเมอร์เป็นสารเติมแต่งที่ต้องการสำหรับการรักษาความคงตัวของโฟม เนื่องจากความสามารถในการเพิ่มความหนืดของสารละลาย ซึ่งจะลดความเร็วจากการระบายน้ำและการซึมผ่านของก๊าซของลาเมลลา เช่น เจลาติน แป้ง เพคติน และกัม [33] สารคงตัวที่ใช้กันทั่วไปโดยนักวิจัยในการศึกษาการอบแห้งแบบโฟมแมทส่วนใหญ่เป็นโพลีแซ็กคาไรด์ Walsh, Russell และ Fitzgerald [33] ได้ศึกษาผลของกัมชนิดต่าง ๆ ต่อความคงตัวของโฟมของโฟมโซเดียมเคซีนเตไฮโดไลเซต และสรุปว่าการใช้กัมเหล่านี้เหมาะสมอาจนำไปสู่ความคงตัวของโฟมที่ดีขึ้น โปรตีนที่สามารถลดระดับพลังงานที่พื้นผิวที่ใช้ร่วมกันโดยฟองที่อยู่ติดกันในโฟม สามารถใช้เป็นสารให้ความคงตัวที่มีศักยภาพได้เช่นเดียวกัน

2.3.1 สารก่อโฟม

ไข่ขาว (Egg white) เป็นส่วนประกอบภายในไข่มีอยู่ประมาณร้อยละ 58 ของน้ำหนักไข่ทั้งฟอง ไข่ขาวเป็นส่วนของเหลวใส (Clear) โปร่งแสง (Transparent) ล้อมรอบไข่ขาวชั้นนอกส่วนชั้น (Thick egg white) ส่วนของเหลวชั้นหนืดอีกชั้นหนึ่ง ไข่ขาวมีส่วนประกอบหลัก คือ น้ำ ไข่ขาวมีความชื้นร้อยละ 87-89 และ มีโปรตีนซึ่งเป็นโปรตีนคุณภาพดีที่สุด มีกรดแอมิโนที่จำเป็น (Essential amino acid) ครบทุกชนิด โปรตีนไข่ขาวเป็นแอลบูมิน (Albumin) ประกอบด้วยโปรตีนชนิดต่าง ๆ คือ โอวัลบูมิน (Ovalbumin) คอนอัลบูมิน (Conalbumin) โอโวมิวคอยด์ (Ovomucoid) และไลโซโซม (Lysosome)

สมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนจากไข่ขาวที่สำคัญ คือ การเกิดโฟม (Foaming) ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการการอบแห้งแบบโฟมเมท การตีไข่ขาวสูญเสียสภาพธรรมชาติ (Protein denaturation) เพราะแรงกลทำให้โปรตีนคลายตัว และกักอากาศไว้ภายใน มีลักษณะเป็นโฟม โปร่งฟู ไข่ขาวใส่ตีได้ปริมาณมากกว่าไข่ขาวชั้น การผสมครีมออฟทาร์ทาร์ (Cream of tartar) จะช่วยให้โฟมไขที่ขึ้นฟูอยู่ตัวและมีปริมาณมากขึ้น

2.3.2 โครงสร้างโฟม

โฟม คือ การกระจายตัวของแก๊สในของเหลว และหากของเหลวเกิดเป็นเจลหรือแข็งตัว หลังจากการกระจายตัวของแก๊ส จะเรียกว่าโฟมแข็ง เมื่อพิจารณาจากขนาดเฉลี่ย ซึ่งอยู่ระหว่าง 0.1 ถึง 3 มิลลิเมตร จะมีฟองในโฟมประมาณ 10^3 ฟองต่อมิลลิลิตร เมื่อเปรียบเทียบกับอิมัลชันซึ่งมีจำนวนละอองโดยเฉลี่ยประมาณ 1,011 ฟองต่อมิลลิลิตร เมื่อเกิดการกระจายตัว โฟมจะเกิดการเปลี่ยนแปลงหลายอย่าง การแพร่กระจายของก๊าซผ่านเฟสต่อเนื่องไปยังฟองอากาศที่ใหญ่ขึ้นจะทำให้ก๊าซมีขนาดใหญ่ขึ้น ในขณะที่ฟองอากาศที่เล็กกว่าจะละลายโดยปรากฏการณ์ที่เรียกว่า “Oswald ripening” ฟองอากาศมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นจนเกิดการแบ่งแยกที่ด้านบน การเสีรูปร่างที่เกิดขึ้นที่บริเวณเชื่อมต่อระหว่างฟองทำให้เกิดโครงสร้างหลายเหลี่ยมของโฟม การระบายของเหลวออกจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องซึ่งเป็นผลให้บริเวณผิวสัมผัสระหว่างฟองหรือที่เรียกว่าลามลลา (Lamella) แตกส่งผลให้เกิดการรวมตัวกัน (Coalescence) ในที่สุด โฟมประเภทต่าง ๆ มักพบได้ในอาหารซึ่งอาจเป็นที่ต้องการ เช่น โฟมไข่ขาวในผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ หรือไม่พึงประสงค์ เช่น โฟมที่เกิดขึ้นระหว่างการหมัก เพื่อให้สามารถควบคุมโฟมได้ดี จึงมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาธรรมชาติของโฟมและคุณสมบัติทางกายภาพของโฟมซึ่งเป็นสิ่งสำคัญในกระบวนการอบแห้งแบบโฟมเมท [34]

2.3.3 ความคงตัวของโฟม (Foam stability)

ความคงตัวของโฟมเป็นสิ่งสำคัญอันดับแรกส่งผลต่อประสิทธิภาพของการอบแห้งแบบโฟมเมท โฟมจะต้องไม่ยุบตลอดกระบวนการอบแห้ง สิ่งสำคัญที่สุด คือ โฟมควรมีความคงตัวแม้สัมผัสกับความชื้นและยังคงโครงสร้างไว้อย่างน้อยตลอดระยะเวลาการอบแห้งในช่วงอัตราคงที่ ความคงตัวในช่วงเริ่มต้นมีความสำคัญมาก เนื่องจากการพังทลายของโครงสร้างโฟมอาจส่งผลให้แนวคิดทั้งหมดเกี่ยวกับการอบแห้งแบบโฟมเมทล้มเหลว หากโฟมสามารถคงตัวอยู่ได้ในระยะเริ่มแรกของการอบแห้ง โครงสร้างจะแน่นขึ้น ซึ่งในที่สุดจะนำไปสู่แผ่นโฟมแห้งบางที่มีโครงสร้างภายในคล้ายรังผึ้ง [3]

แซนแทนกัม (Xanthan gum) แซนแทนกัมเป็นกัม (Gum) ซึ่งเป็นสารไฮโดรคอลลอยด์ (Hydrocolloid) ชนิดหนึ่งใช้เป็นวัตถุเจือปนอาหาร (Food additive) สกัดได้จากเมือก (Slime) ที่สร้างโดย แบคทีเรีย *Xanthomonas campestris* ซึ่งมักพบในกะหล่ำปลี กะหล่ำปลีดอก โมเลกุลของแซนแทนกัม เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide) ประเภท Heteropolysaccharide ที่เป็นสายพอลิเมอร์ของ β -D-Glucose มีโครงสร้างคล้ายกับเซลลูโลส (Cellulose) แต่ทุก ๆ 2 โมเลกุลของกลูโคส (Glucose) เชื่อมต่อกับกิ่งของ Trisaccharide ที่เกิดจากน้ำตาลแมนโนส (Mannose) 2 โมเลกุล และกรดกลูคูโรนิก (Glucuronic acid) 1 โมเลกุล โมเลกุลของแมนโนสที่อยู่ติดกับสายหลักมี

เอสเทอร์ของกรดแอสติกที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 6 และแมนโนส ที่ตำแหน่งปลายของ Trisaccharide มีกรดไพรูวิกเชื่อมต่อกันที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 4 และ 6

แซนแทนกัม ละลายในน้ำได้ดี ให้ความหนืดแบบ Non Newtonian fluid โดยมีพฤติกรรมเป็นแบบ Shear thinning fluid xanthan gum ไม่เกิดเจล (Gel) เนื่องจากโครงสร้างเป็นกิ่งก้านสาขา (Brancing) แต่จะเกิดเจลได้เมื่อใช้ร่วมกับกัมบางชนิด เช่น โลคัสบีนกัม (Locust bean gum) กัวกัม (Guar gum) เป็น Thickening agent ทำให้อาหารมีความข้น ความหนืด (Viscosity) ทนความร้อนได้สูง ทำให้อาหารคงรูป (Stabilizer) นำรับประทาน มันทวาร โดยมักใช้ Xanthan gum ผสมกับกัวร์กัม (Guar gum) เพื่อเพิ่มความหนืด ดิกว่าใช้ได้ย

2.3.4 การทำให้เกิดโฟม (Foam formation)

โดยทั่วไปของเหลวสามารถทำให้เกิดโฟมได้โดย 2 วิธี

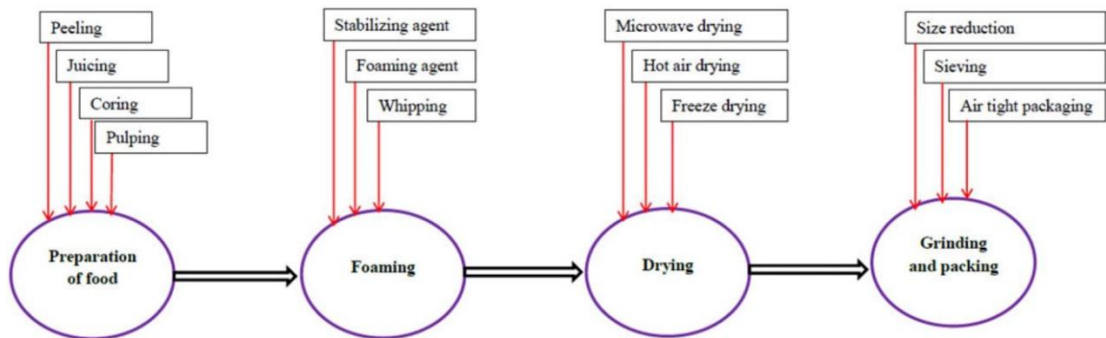
1) วิธีแรกทำได้โดยก๊าซถูกทำให้มีความอึดตัวสูงภายในของเหลวโดยการบังคับให้สารละลายละลายที่แรงดันสูง เช่น น้ำอัดลม เมื่อปล่อยแรงดันของเหลวจะเริ่มเกิดฟอง

2) วิธีที่สองเกี่ยวข้องกับวิธีการทางกล ของเหลวสามารถทำให้เกิดฟองได้โดยการตีหรือตีผสมแรงๆ หรือโดยการฉีดก๊าซผ่านเครื่องพ่นที่มีรูพรุน

การทำฟองอาหารสำหรับการอบแห้งแบบโฟมเมทนั้นส่วนใหญ่กระทำโดยวิธีเชิงกล การตีหรือตีผสมสารละลายที่เป็นของเหลวสามารถทำได้โดยใช้อุปกรณ์หลายชนิดที่ทำให้เกิดการปั่นป่วนอย่างรุนแรงในของเหลว โฟมที่เกิดจากการตีจะถูกผสมอย่างเหมาะสมทำให้มีการกระจายตัวของก๊าซอย่างสม่ำเสมอ การพ่นสามารถเปลี่ยนของเหลวให้เป็นโฟมได้อย่างสมบูรณ์โดยสามารถควบคุมขนาดฟองได้ดีกว่า แต่โฟมที่ผลิตโดยการตีฟองมีความสม่ำเสมอมากกว่า

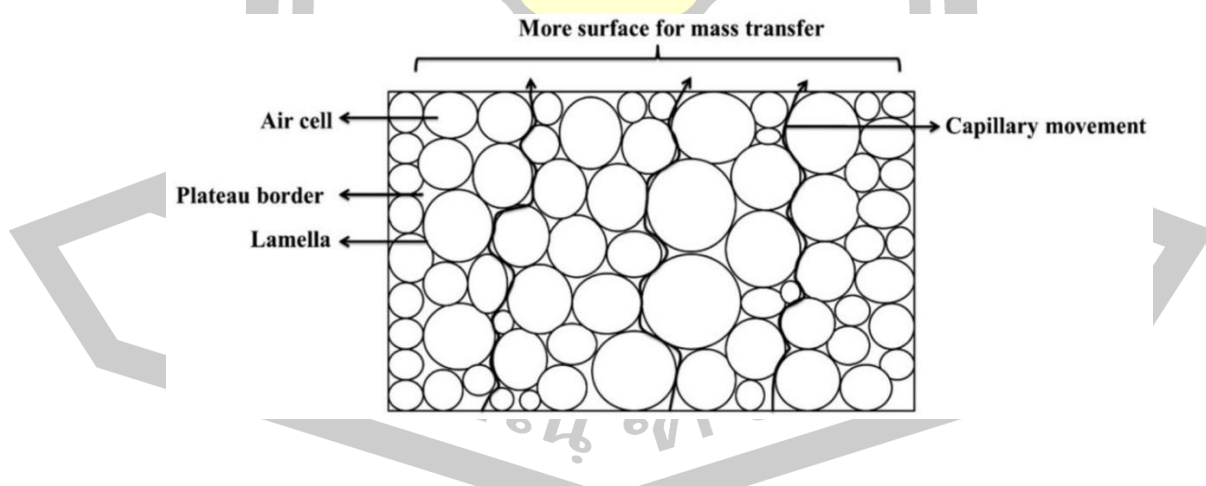
2.3.5 การอบแห้งโฟม

กระบวนการอบแห้งแบบโฟมเมทสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ขั้นตอนสำคัญ ดังสรุปไว้ในรูป 1 กระบวนการเริ่มต้นด้วยการเตรียมวัตถุดิบอาหารที่เฉพาะเจาะจงขึ้นอยู่กับประเภทของอาหาร ผักและผลไม้อาจปอกเปลือก คว้านแกน ลวก และบดเป็นเนื้อ เนื้อหรือน้ำผลไม้ที่ได้อาจนำไปทำให้เข้มข้นหรือนำไปใช้สำหรับขั้นตอนต่อไป อาหารเหลวอย่าง เช่น นม อาจนำไปใช้ทำให้เกิดโฟมได้โดยตรง [35] ขั้นตอนต่อไป คือการทำให้เกิดโฟม ขั้นตอนนี้ประกอบด้วย การเติมสารทำให้เกิดโฟมและ/หรือสารทำให้คงตัว และการทำให้เกิดโฟมซึ่งส่วนใหญ่ใช้วิธีการตีหรือตีผสมด้วยเครื่องตีผสมความเร็วสูง เนื้ออาหารบางชนิดมีความหนืดสูงและอาจเปลี่ยนเป็นโฟมที่มีความคงตัวสูงได้ โฟมของเนื้อวัสดุดังกล่าวมีความแน่นมากซึ่งทำให้ความสามารถในการแพร่กระจายมีจำกัด เป็นสิ่งที่ไม่พึงประสงค์และทำให้ประสิทธิภาพในการอบแห้งแบบโฟมเมทต่ำ เนื้อวัสดุเหล่านี้จึงอาจทำให้เจือจางลงอย่างเหมาะสมเพื่อให้สามารถทำให้เกิดโฟมเป็นไปตามที่ต้องการได้ [36]



ภาพประกอบ 1 ไตอะแกรมขั้นตอนการอบแห้งแบบโฟมแมท [37]

การอบแห้งแบบโฟมแมทโดยทั่วไปแล้วจะหมายถึงการทำให้โฟมชั้นบางแห้งด้วยลมร้อน นอกจากการอบแห้งโฟมโดยใช้ลมร้อนแล้วยังมีการศึกษาเพื่อใช้เทคนิคอื่น ๆ ร่วมด้วย เช่น การให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ เป็นต้น [11] ระหว่างการอบแห้งแบบโฟมแมท การระบายของเหลวออกโดยการแพร่แบบคาพิลลารีผ่านฟิล์มของเหลวเป็นกลไกหลักของการเคลื่อนที่ของน้ำ ดังแสดงในรูป 2 [38] พื้นที่ผิวที่เพิ่มขึ้นอย่างมากเนื่องจากการเกิดโฟมช่วยเร่งอัตราการอบแห้งอีกด้วย [39] นอกจากการกำจัดความชื้นแล้ว การเปลี่ยนแปลงอื่น ๆ บางอย่างอาจเกิดขึ้นระหว่างการอบแห้งซึ่งอาจส่งผลต่อพฤติกรรมการอบแห้งและคุณภาพของผลิตภัณฑ์สุดท้ายทั้งเชิงบวกและเชิงลบ [38] ตัวอย่างเช่น อัตราการอบแห้งของโฟมบางชนิด เช่น นมถั่วเหลือง [40] และมะเฟือง [41] มีอัตราสูงในระยะเริ่มแรกของการอบแห้ง ในขณะที่มะเขือเทศ [42] มะม่วง [43] และกล้วย [39] มีอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นในระยะสุดท้าย จากนั้นวัสดุแห้งที่ได้จะมีลักษณะเป็นแผ่นมีโครงสร้างภายในคล้ายรังผึ้ง และบดเป็นผงที่มีคุณสมบัติคืนตัวได้อย่างง่าย [6]



ภาพประกอบ 2 ไตอะแกรมโครงสร้างของโฟม [37]

2.4 การอบแห้งโพลีเมอร์แบบไฮบริด

การอบแห้งแบบโพลีเมอร์เป็นกระบวนการง่าย ๆ ที่มีข้อดีมากมาย แต่ผลิตภัณฑ์อบแห้งที่ได้ อาจจะมีคุณภาพไม่ดีเท่ากับกระบวนการอบแห้งแบบอื่น ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเปรียบเทียบกับ การอบแห้งแบบพ่นฝอย มีรายงานว่าปริมาณวิตามินในมะม่วงบดที่ได้จากการอบแห้งแบบโพลีเมอร์มีค่า ลดลงถึงร้อยละ 80 และมีการยอมรับจากผู้บริโภคน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ที่ได้จาก การอบแห้งแบบพ่นฝอย [43] ยังมีรายงานผลการศึกษาระบุอีกว่า แม้ว่าคุณสมบัติทาง กายภาพและการคืนตัวของนมถั่วเหลืองแห้งแบบโพลีเมอร์จะดีกว่าแบบไม่ใช้โพลีเมอร์ แต่วัสดุที่ทำ แห้งแบบพ่นฝอยแสดงคุณสมบัติที่เหนือกว่า [40] การกักเก็บรักษารสชาติลดลงเนื่องจากการทำให้ แผ่นโพลีเมอร์ในอาหารบางชนิด ตัวอย่างเช่น แผ่นโพลีเมอร์ห่อหุ้มเนื้อสัตว์มีความสามารถในการละลาย ได้ดีแต่คงรสชาติได้ไม่ดี [42] การเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันเนื่องจากการเพิ่มขึ้นอย่างมากของพื้น ผิวสัมผัสระหว่างของเหลวและก๊าซเป็นหนึ่งในสาเหตุหลักที่ทำให้คุณภาพผลิตภัณฑ์ลดลง รวมถึง การสูญเสียรสชาติ แต่อาจมีความเป็นไปได้อื่น ๆ เช่นกัน ตัวอย่างเช่น จากการศึกษาการอบแห้งเนื้อ มะขามรายงานว่า การยอมรับของผลิตภัณฑ์ในแง่ของรสชาติได้รับผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญจาก ประเภทของสารทำให้เกิดฟองที่ใช้ [44] คุณสมบัติการนำความร้อนต่ำของก๊าซที่กักอยู่ในโพลีเมอร์ลด อัตราการถ่ายเทความร้อนภายในแผ่นโพลีเมอร์ในการอบแห้งแบบโพลีเมอร์ทั่วไป [38] อย่างไรก็ตามการ อบแห้งอาหารแบบโพลีเมอร์ยังคงเร็วกว่าเมื่อเทียบกับการอบแห้งแบบไม่มีโพลีเมอร์

เพื่อลดผลกระทบที่ไม่พึงประสงค์ต่อคุณลักษณะการอบแห้งและคุณสมบัติด้านคุณภาพ มี งานวิจัยมากมายที่นำเทคนิคการอบแห้งแบบอื่นมาใช้ร่วมกับการอบแห้งแบบโพลีเมอร์แทนที่การ อบแห้งด้วยลมร้อนแบบธรรมดาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและรักษาคุณสมบัติเฉพาะ ของผลิตภัณฑ์

2.4.1 การอบแห้งแบบโพลีเมอร์แช่เยือกแข็ง

การอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งเป็นกระบวนการอบแห้งขั้นสูงที่มีจุดมุ่งหมายเพื่อผลิตผลิตภัณฑ์ อบแห้งคุณภาพสูง อย่างไรก็ตามกระบวนการนี้ใช้เวลาค่อนข้างนานและมีราคาแพง ดังนั้นการใช้งาน จึงจำกัดเฉพาะผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าทางเศรษฐกิจสูงเท่านั้น นักวิจัยบางคนได้ใช้โพลีเมอร์แห้งแบบแช่ เยือกแข็งและศึกษาผลกระทบต่อคุณสมบัติต่าง ๆ Raharitsifa และ Ratti [45] ได้ศึกษาและประเมินผล ของการเกิดโพลีเมอร์ของน้ำแอปเปิ้ลต่อระยะเวลาในการอบแห้งในระหว่างการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง การ เกิดโพลีเมอร์ทำได้โดยการเติมเมทิลเซลลูโลสหรืออัลบูมินไฮโดรเจนในน้ำแอปเปิ้ลที่ความเข้มข้นต่างกันแล้วดี ส่วนผสม น้ำแอปเปิ้ลที่มีโพลีเมอร์และไม่มีโพลีเมอร์ถูกแช่เยือกแข็งที่ -40 องศาเซลเซียส ในความหนาต่างกัน และ ต่อมาอบแห้งภายใต้สุญญากาศที่ 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง สำหรับความหนาของ ตัวอย่างเท่ากัน ตัวอย่างโพลีเมอร์ใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่า แต่ผลิตภัณฑ์ที่เป็นโพลีเมอร์จะมีความหนาแน่น น้อยกว่าเมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์ที่ไม่มีโพลีเมอร์ ซึ่งช่วยลดภาระน้ำหนักของเครื่องอบแห้ง

Muthukumaran Ratti และ Raghavan [5], [29] ศึกษาผลของการเกิดโพลีเมอร์ต่อการอบแห้ง แบบเยือกแข็งของอัลบูมินไฮโดรเจนเพื่อพิจารณาความเป็นไปได้ของวิธีนี้ อัลบูมินไฮโดรเจนเกิดโพลีเมอร์หลังจากผสม

สารทำให้คงตัว (แซนแทนกัม ไกลคอลอัลจิเนต และเมทิลเซลลูโลส) ที่ความเข้มข้นต่างกัน จากการศึกษาสรุปได้ว่าการเติมแซนแทนกัมช่วยลดระยะเวลาในการอบแห้งทั้งหมด และได้ผงอัลบูมินไซท์ที่มีคุณภาพดีเยี่ยม

มีงานวิจัยที่ได้ศึกษาผลของการเกิดโฟมต่ออัตราการอบแห้งและควมมีชีวิตของ *Bifidobacterium longum* RO175 ที่อบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง จากการศึกษาพบว่า เวลาที่ลดลงอยู่ระหว่าง 1/4 ถึง 1/7 เท่า เมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่มีโฟม ในการศึกษาการเก็บรักษา ความมีชีวิตของเชื้อจุลินทรีย์ในช่วงแรกของผลิตภัณฑ์อบแห้งแบบโฟมเมทดีกว่า แต่หลังจากระยะเวลาการเก็บรักษา 56 วัน ความมีชีวิตลดลงอย่างมากสำหรับตัวอย่างโฟมเมทแห้ง [46]

Darniadi Ho และ Murray [30] ได้ศึกษาการอบแห้งน้ำบลูเบอร์รี่โดยการอบแห้งแบบโฟมเมทแช่เยือกแข็งและการอบแห้งแบบพ่นฝอยเพื่อศึกษาผลกระทบต่อคุณสมบัติต่าง ๆ เติมนมโกลเด้นเด็กซ์ตรินและเวย์โปรตีนไอโซเลทในอัตราส่วนที่ต่างกันลงในน้ำ ผงที่ได้จากอบแห้งแบบโฟมเมทแช่เยือกแข็งเป็นสีม่วงเข้ม ส่วนผงแห้งแบบพ่นฝอยมีสีม่วงสดใสมะและมีสีแดงน้อยกว่า (ความคล้ายคลึงกับสีดั้งเดิมน้อยกว่า) ผลผลิตจะดีกว่าในการอบแห้งแบบโฟมเมทแช่เยือกแข็ง แต่อนุภาคที่ทำให้แห้งโดยการอบแห้งแบบพ่นฝอยมีความเรียบและเล็กกว่า ซึ่งแสดงคุณสมบัติการคืนน้ำได้ดีกว่า

มีงานวิจัยที่ได้ศึกษาผลของการเติมนมโกลเด้นเด็กซ์ตรินและกัมอารบิกที่ความเข้มข้นต่างกันต่อคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของผงอินทผลัมโฟมเมทแช่เยือกแข็ง จากการศึกษาพบว่า ความเข้มข้นของตัวพามีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อคุณสมบัติต่าง ๆ ของผงแห้ง ในขณะที่ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ความสามารถในการเปียกน้ำและการดูดความชื้นเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของตัวพามีเพิ่มขึ้น ผงที่ได้จากการเติมนมโกลเด้นเด็กซ์ตรินแสดงความสามารถในการละลายที่สูงขึ้นและความสามารถในการดูดความชื้นที่ต่ำกว่า [47]

จากการศึกษาทั้งหมดเกี่ยวกับการอบแห้งแบบโฟมเมทแช่เยือกแข็งสรุปได้ว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะคุณภาพที่ดีกว่า ดังนั้น การอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งเป็นวิธีการอบแห้งจึงมีการวิจัยอย่างกว้างขวาง แต่การใช้งานยังมีจำกัด เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายสูงและใช้เวลาในการอบแห้งนาน และการอบแห้งแบบโฟมเมทก็เป็นวิธีการอบแห้งที่ไม่ใช่การอบแห้งทั่วไป ดังนั้น การผสมผสานระหว่างเทคนิคการอบแห้งทั้งสองนี้จึงเป็นสิ่งที่ทำได้ยากและต้องการการเอาใจใส่อย่างดีในแง่ของการวิจัยเพื่อให้เป็นไปได้และประสบความสำเร็จ

2.4.2 การอบแห้งแบบโฟมเมทร่วมกับไมโครเวฟ

การอบแห้งด้วยไมโครเวฟเป็นเทคนิคใหม่ที่มีศักยภาพในการทำให้วัสดุอาหารแห้ง เนื่องจากสามารถสร้างความร้อนภายในวัสดุอาหารได้อย่างรวดเร็ว งานวิจัยหลายชิ้นได้รายงานถึงข้อดีของไมโครเวฟ Maskan [48] ศึกษาผลของการอบแห้งขึ้นกล้วยด้วยลมร้อนร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ เมื่อเปรียบเทียบกับอบแห้งด้วยลมร้อนทั่วไป ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าเวลาในการอบแห้งลดลงร้อยละ 64 คุณลักษณะทางสีและการคืนน้ำดีขึ้น Sharma และ Prasad [49] ได้รายงานไว้ว่าเวลาในการอบแห้งกระเทียมลดลงร้อยละ 80-90 อีกทั้งคุณภาพผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้ดีกว่ากระเทียมที่อบแห้งด้วยลมร้อนโดยทั่วไป ผลการวิจัยดังกล่าวนี้สอดคล้องกันกับผลการศึกษาของ Ozkan Akbudak และ Akbudak [50] ในการอบแห้งผักโขมด้วยไมโครเวฟ

การอบแห้งแบบโฟมเมทกำลังได้รับความสนใจในการอบแห้งอาหารต่าง ๆ เนื่องจากมีข้อดีหลายประการ เช่น ลดเวลาการอบแห้ง คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่เหนือกว่า ฯลฯ แต่จากข้อจำกัดต่าง ๆ ของเทคนิคการอบแห้งนี้ ข้อจำกัดหลักประการหนึ่งคือการถ่ายเทความร้อนภายในวัสดุไม่ดี เนื่องจากมีอากาศ [38] การทำความร้อนด้วยไมโครเวฟจึงเป็นวิธีแก้ปัญหาคือเป็นไปได้สำหรับปัญหานี้ เนื่องจากสามารถสร้างความร้อนเชิงปริมาตรได้อย่างรวดเร็ว ดังนั้น การผสมผสานระหว่างการอบแห้งแบบโฟมเมทและการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟจึงเป็นงานวิจัยที่น่าสนใจที่นำมาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและผลิตผลิตภัณฑ์อบแห้งที่มีคุณภาพได้

2.5 การทบทวนวรรณกรรม/ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การบูรณาการการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟเข้ากับกระบวนการอบแห้งแบบโฟมเมทถือเป็นความก้าวหน้าที่สำคัญในเทคโนโลยีอาหาร โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพและคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารแห้ง วิธีการอบแห้งโฟมเมทแบบดั้งเดิมมักเผชิญกับข้อจำกัด เช่น ระยะเวลาในการอบแห้งที่ยาวนานและการกระจายความร้อนที่ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งอาจส่งผลเสียต่อเนื้อสัมผัส ปริมาณสารอาหาร และคุณภาพโดยรวมของผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้ การนำความร้อนด้วยไมโครเวฟสามารถช่วยแก้ปัญหาดังกล่าวเหล่านี้ได้โดยการให้ความร้อนเชิงปริมาตรอย่างรวดเร็ว ซึ่งช่วยลดเวลาในการอบแห้งและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานได้อย่างมาก อย่างไรก็ตามการเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งด้วยวิธีดังกล่าวนี้ทำให้เกิดความซับซ้อนเพิ่มขึ้นด้วย โดยเฉพาะการควบคุมอุณหภูมิและพลังงานไมโครเวฟซึ่งจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องควบคุมอย่างถูกต้องและแม่นยำ เพื่อป้องกันผลกระทบเชิงลบ เช่น ความร้อนสูงเกินไป การไหม้เกรียม และการสูญเสียสารอาหาร การทำความเข้าใจถึงพฤติกรรมทางความร้อนของผลิตภัณฑ์อาหารในระหว่างการอบแห้งร่วมกับไมโครเวฟที่มีความแตกต่างจากวิธีการทั่วไปอย่างเห็นได้ชัด เป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งในการรักษาความสมบูรณ์ทางโครงสร้างและคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์ การทบทวนวรรณกรรมนี้จึงเป็นการตรวจสอบการศึกษาต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้และการเพิ่มประสิทธิภาพของการอบแห้งแบบโฟมเมทร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ โดยเน้นบทบาทที่สำคัญของการควบคุมอุณหภูมิและพลังงานไมโครเวฟในการแปรรูปอาหารให้มีประสิทธิภาพ

งานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับเทคนิคการอบแห้งแบบโฟมเมทร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ ได้แสดงให้เห็นว่าเทคนิคดังกล่าวนี้เป็นเทคนิคการอบแห้งที่มีประสิทธิภาพในการแปรรูปผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร เช่น ผัก และผลไม้ รวมถึงผลิตผลพลอยได้จากการกระบวนการผลิต ให้เป็นผลิตภัณฑ์อบแห้งคุณภาพสูง จุดมุ่งเน้นหลัก ได้แก่ การหาสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในขณะที่ยังคงรักษาคุณสมบัติทางโภชนาการและประสาทสัมผัส การศึกษาเกี่ยวกับผงเน็อบลูเบอร์รี่ [51] และราสเบอร์รี่บด [52] แสดงให้เห็นว่าสารก่อโฟมและความเข้มข้นของสารก่อโฟมมีอิทธิพลอย่างมากต่อคุณลักษณะการอบแห้งและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ งานวิจัยนี้

เกี่ยวข้องอย่างยิ่งกับการแปรรูปมะม่วงให้กลายเป็นแผ่นอาหารว่างกรอบ โดยเน้นศึกษาการหาสภาวะการอบแห้งและสูตรการเติมสารก่อโฟมให้เหมาะสม

ประสิทธิภาพการใช้พลังงานและการควบคุมกระบวนการอบแห้งเป็นสิ่งที่มีความสำคัญเช่นกัน การศึกษาชิ้นแรกท่อนั้น [53] ได้แนะนำการควบคุมลอจิกไมโครเวฟแบบไดนามิกเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ซึ่งเป็นแนวทางที่อาจเป็นเครื่องมือในการป้องกันความร้อนสูงเกินไปและการไหม้เกรียม ซึ่งเป็นปัญหาที่พบได้ทั่วไปในการอบแห้งที่ใช้พลังงานไมโครเวฟคงที่ตลอดกระบวนการ งานวิจัยอบแห้งส้มเกลี้ยง [54] และผงราสเบอร์รี่สีดำ [55] ยังเน้นย้ำถึงผลกระทบของพลังงานไมโครเวฟและเทคนิคการอบแห้งต่อคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ เช่น สี เนื้อสัมผัส และปริมาณโภชนาการ

ความสำคัญของการควบคุมพลังงานไมโครเวฟยังถูกเน้นเพิ่มเติมในการศึกษาการแปรรูปผงโปรตีนยีสต์ [56] เมล็ดผักโขม [57] และถั่วพีแคน [58] งานวิจัยเหล่านี้แสดงให้เห็นว่าการควบคุมพลังงานไมโครเวฟที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อเวลาในการอบแห้ง คุณภาพของผลิตภัณฑ์ และการใช้พลังงาน งานวิจัยเกี่ยวกับผงโยเกิร์ต [59] และเนื้อมะละกอ [60] ให้ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับประสิทธิภาพของตัวแปรต่างๆ เช่น ความเข้มข้นของอัลบูมินไข่และความหนาของโฟมต่อกระบวนการอบแห้ง ซึ่งนำไปใช้ได้โดยตรงกับการควบคุมคุณสมบัติเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์อาหารว่างจากมะม่วงมหาชนก

เทคนิคการอบแห้งแบบโฟมแมทร่วมกับทำให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ เป็นกระบวนการอบแห้งที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรได้หลากหลาย เช่น เมล็ดข้าวโพด [61] รากหัวผักกาดเขียว [62] และถั่วแมคคาเดเมีย [63] โดยนำเสนอในแง่วัสดุที่แตกต่างกันมีปฏิริยาอย่างไรต่อการอบแห้งด้วยไมโครเวฟ

โดยสรุป การศึกษาจากงานวิจัยที่กล่าวไปทั้งหมดนี้ทำให้มีความเข้าใจ ครอบคลุมเกี่ยวกับความซับซ้อนและความแตกต่างของการอบแห้งแบบโฟมแมทร่วมกับไมโครเวฟ วิทยานิพนธ์นี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการศึกษาการแปรรูปผลิตภัณฑ์อาหารว่างจากมะม่วงมหาชนกที่ตกเกรดโดยใช้เทคนิคการอบแห้งดังกล่าว โดยผลิตภัณฑ์อบแห้งที่ได้จะอยู่ในรูปของแผ่นโฟมมะม่วงมหาชนกโดยไม่ผ่านขั้นตอนการบดซึ่งเป็นขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการอบแห้งแบบโฟมแมททั่วไป อีกทั้งจากปัญหาที่เกิดจากการใช้ไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟคงที่ เช่น ความร้อนสูงเกินไปและการอบแห้งที่ไม่สม่ำเสมอ วิทยานิพนธ์นี้จึงมุ่งเน้นที่การหาสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมผ่านการควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟที่แม่นยำ จากข้อมูลผลการศึกษาการควบคุมพารามิเตอร์การอบแห้ง [53], [56], [60], [61], [64]–[67] เทคนิคขั้นสูง เช่น การควบคุมลอจิกไมโครเวฟแบบไดนามิกจะถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เป้าหมายสูงสุด คือ การสร้างวิธีการที่ยั่งยืนและประหยัดพลังงาน ซึ่งเพิ่มมูลค่าให้กับของเหลือทิ้งได้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการศึกษากระบวนการอบแห้งแบบโคมแอมพร้อมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ สำหรับแปรรูปมะม่วงมหาชนก โดยทำการศึกษา 3 หัวข้อหลัก ซึ่งประกอบด้วย

- 1) การศึกษาคุณลักษณะการอบแห้งและสภาวะอบแห้งแบบโคมแอมพร้อมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟที่เหมาะสม
- 2) การศึกษาผลของการควบคุมอุณหภูมิของวัสดุและกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟในระหว่างกระบวนการอบแห้งแบบโคมแอมพร้อมไมโครเวฟแบบขั้นตอน
- 3) การศึกษาฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟสำหรับควบคุมอุณหภูมิของโคมแอมระหว่างกระบวนการอบแห้ง

3.1 วัสดุและการเตรียมตัวอย่างโคมแอมม่วงมหาชนก

มะม่วงมหาชนกที่ใช้ในการทดลองเป็นพันธุ์ที่ปลูกในอำเภอหนองกุ้งศรี จังหวัดกาฬสินธุ์ โดยนำผลที่ตกเกรดที่ไม่สามารถจำหน่ายได้ เนื้อมะม่วงสุกของม มีค่าความหวาน 12.7 ± 0.4 องศาบริกซ์ หั่นเป็นชิ้นสี่เหลี่ยมลูกเต๋าขนาด 1 มิลลิเมตร แล้วลวกในน้ำเดือด 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 นาที เพื่อยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ หลังจากนั้นนำเนื้อมะม่วงที่ผ่านการลวกไปบด จนได้ลักษณะหนืดข้น (พูเร) เก็บใส่ถุงโพลีเอทิลีนภายใต้อุณหภูมิ -24 องศาเซลเซียส จนกว่าจะนำมาใช้ในการทดลอง

การศึกษาปริมาณสารก่อโคม (อัลูมิเนียมไซขาว) ที่ต่ำที่สุดที่ทำให้เกิดโคม โดยใช้เนื้อมะม่วงที่เตรียมไว้ละลายที่อุณหภูมิ 5-7 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง ปริมาณ 100 กรัม เติมน้ำให้ความคงตัว แชนแทนกัมปริมาณ 10%w/w ตีโคมโดยใช้เครื่องตีแบบหัวตะกร้อ 2 หัว (Electrolux, รุ่น EHM3407, ประเทศไทย) ที่ความเร็วต่ำสุด และค่อยๆ เติมน้ำสารก่อโคม และปรับระดับการตีสูงสุดจนครบเวลา 10 นาที สังเกตความสามารถในการเกิดโคม และความคงตัวของโคม

นำเนื้อมะม่วงที่ผสมสารให้ความคงตัว (แชนแทนกัม) 10%w/w นำมาผสมสารก่อโคม ปริมาณต่ำที่สุดที่สามารถทำให้เกิดโคม ในสัดส่วนที่แตกต่างกัน 6 ระดับโดยปริมาณที่ต่ำที่สุดคือ ปริมาณที่เติมลงในเนื้อมะม่วงที่น้อยที่สุดที่ทำให้เกิดโคมและเพิ่มปริมาณสารก่อโคมขึ้นระดับละ 10%w/w ในแต่ละระดับความเข้มข้นของสาร ที่ทำให้โคมคงตัวจะใช้เวลาในการตีปั่นโคมด้วยเครื่องผสมอาหาร ระดับต่ำสุด 2 นาที และระดับสูงสุดอีก 8 นาที รวม 10 นาที นำโคมที่ได้จากการตีปั่นมาวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ ความหนาแน่นของโคม และความคงตัวของโคมหลังจากกำหนดปริมาณสารก่อโคมที่เหมาะสมแล้ว ส่วนผสมจะถูกนำไปตีผสมกับเนื้อมะม่วงที่เตรียมไว้ และเข้าสู่กระบวนการ อบแห้งแบบโคมแอมพร้อมไมโครเวฟ หลังการอบแห้ง ผลิตภัณฑ์จะถูกบรรจุในถุงอะลูมิเนียมฟอยล์ เพื่อรอการวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ต่อไป

- ความหนาแน่นของโฟม Foam Density Sangamithra,[68]Salahi et al., 2015[69] โฟมมะม่วงปริมาณประมาณ 50 มิลลิลิตร ถูกถ่ายลงในกระบอกตวงแบบมีมาตรวัดปริมาตร โดยระมัดระวังไม่ให้เกิดการกักเก็บอากาศภายในหรือโครงสร้างของโฟมยุบตัว จากนั้นทำการวัดน้ำหนักและปริมาตรของโฟม ก่อนนำมาคำนวณความหนาแน่นของโฟมโดยใช้สมการต่อไปนี้

$$FD = \frac{W_f}{V_f} \quad (1)$$

โดยที่:

FD = ความหนาแน่นของโฟม (g/cm³)

W_f = น้ำหนักของโฟม (กรัม, g)

V_f = ปริมาตรของโฟม (ลูกบาศก์มิลลิเมตร, cm³)

- การขยายตัวของโฟม Foam Expansion, FE[70]Kandasamy et al., 2014[71] การขยายตัวของโฟมแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้นของปริมาตรของเนื้อหลังจากการเกิดโฟมด้วยความเข้มข้นที่ต้องการของสารที่ทำให้เกิดโฟมและเวลาในการตี Akiokato et al., 1983[72] คุณภาพของโฟมที่ตีขึ้นโฟมในแง่ของการขยายตัวของโฟม คำนวณได้ตามสมการที่ (2)

$$\text{Foam Expansion(\%)} = \left(\frac{V_f - V_p}{V_p} \right) \times 100 \quad (2)$$

V_p คือ ปริมาตรเริ่มต้นของเนื้อมะม่วงบดละเอียด (ลูกบาศก์มิลลิเมตร)

V_f คือ ปริมาตรสุดท้ายของเนื้อมะม่วงบดละเอียด (ลูกบาศก์มิลลิเมตร)

- ความคงตัวของโฟม Foam Stability, FS[73]Dehghannya et al., 2019[74] โฟมมะม่วงประมาณ 100 มิลลิลิตร ถูกนำไปใส่ในกรวยกรองบุชเนอร์ (เส้นผ่านศูนย์กลาง 80 มิลลิเมตร) ที่ปูด้วยกระดาษกรอง และวางบนกระบอกตวงที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 180 นาที ปริมาตรของน้ำผลไม้ที่แยกออกจากโฟมเนื่องจากการระบาย ถูกวัดทุก ๆ 30 นาที เพื่อคำนวณค่าดัชนีความคงตัวของโฟม โดยใช้สูตร Dehghannya et al., 2019[74]

$$FS (\%) = \left(\frac{V_{f0} - \Delta V_{ft}}{V_{f0}} \right) \times 100 \quad (3)$$

V_{f0} = ปริมาตรเริ่มต้นของโฟม (มิลลิลิตร)

ΔV_{ft} = ปริมาตรของเหลวที่แยกออกจากโคม (มิลลิลิตร)

3.2 อุปกรณ์และชุดทดลองการอบแห้งแบบโคมแม่เหล็กกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ

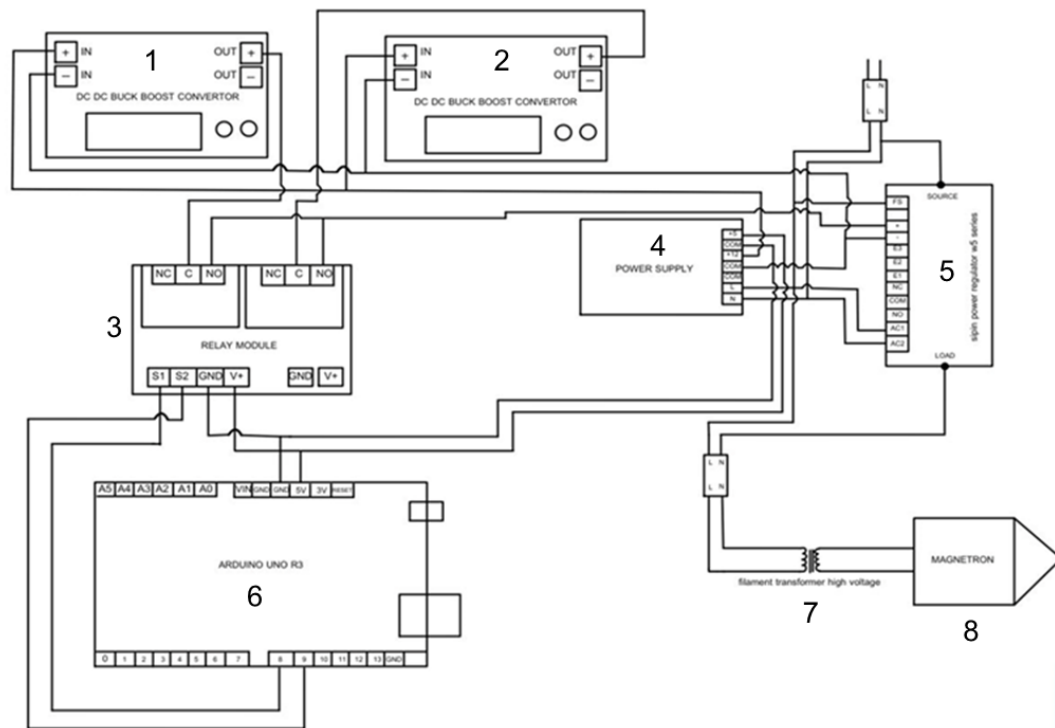
3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องอบแห้งแบบลมร้อนระดับห้องปฏิบัติการร่วมกับการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ ดังแสดงในรูป 3 ประกอบด้วย ไมโครเวฟดัดแปลงสำหรับงานวิจัย (รุ่น MS23F300EEK, Samsung, ประเทศไทย) (หมายเลข 6) ซึ่งสามารถให้ลมร้อนไหลเข้าสู่ระบบการอบแห้งได้ ลมจากภายนอกถูกดูดเข้ามาโดยใช้โบลเวอร์ (หมายเลข 1) ผ่านฮีตเตอร์ขนาด 10 กิโลวัตต์ (หมายเลข 2) อุณหภูมิลมร้อนถูกควบคุมโดยตัวควบคุมอุณหภูมิแบบ PID (รุ่น MAC-3D, Shimax Co., Ltd., ญี่ปุ่น) (หมายเลข 9) ซึ่งทำงานร่วมกับเทอร์โมคัปเปิลชนิด K (หมายเลข 3) ความเร็วลมถูกควบคุมให้อยู่ที่ 0.5 เมตรต่อวินาที โดยใช้ อินเวอร์เตอร์ (หมายเลข 12) และทิศทางการไหลของลมถูกควบคุมโดยท่อที่ต่อตรงเข้าไมโครเวฟ (หมายเลข 4) เพื่อให้แน่ใจว่าลมได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการก่อนถูกส่งเข้าไปในเตาอบ

สำหรับการควบคุมอุณหภูมิของโคมแม่เหล็กนั้นจะใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K (หมายเลข 7) เพื่อตรวจวัดอุณหภูมิของตัวอย่างโคมแม่เหล็กและส่งค่าอุณหภูมิไปยังตัวควบคุมอุณหภูมิแบบ PID (รุ่น MAC-3D, Shimax Co., Ltd., ญี่ปุ่น) (หมายเลข 8) ขา RS-485 Output ของตัวควบคุมอุณหภูมิจะส่งค่าอุณหภูมิไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อแสดงผลแบบเรียลไทม์และบันทึกข้อมูลบนซอฟต์แวร์สำเร็จรูป (Shimax Soft, Shimax Co., Ltd., ญี่ปุ่น) นอกจากนี้ขา Relay Output ของตัวควบคุมอุณหภูมิจะส่งไปยังชุดควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟ (หมายเลข 10) เพื่อควบคุมการปรับเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟ

นอกจากนี้น้ำหนักของตัวอย่างถูกตรวจวัดโดยใช้โหลดเซลล์ (หมายเลข 5) และบันทึกข้อมูลในไมโครคอนโทรลเลอร์ที่อยู่ภายในชุดควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟ (หมายเลข 10) และยังมีมิเตอร์วัดการใช้พลังงานไฟฟ้า (หมายเลข 11) เพื่อบันทึกการใช้พลังงานระหว่างกระบวนการอีกด้วย

พหุ ประถมศึกษา



ภาพประกอบ 4 ไดอะแกรมแสดงชุดควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟ

3.3 การวิเคราะห์คุณภาพของตัวอย่างแผ่นโฟมมะม่วงมหาชนกอบแห้ง

3.3.1 ปริมาณความชื้น ความหนา และปริมาณน้ำอิสระของโฟมมะม่วงมหาชนกอบแห้ง

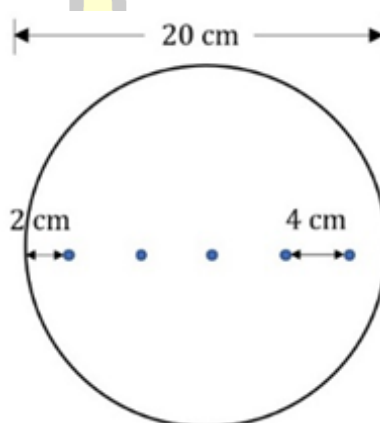
การวัดปริมาณความชื้น และความหนาของโฟมมะม่วงมหาชนกอบแห้งวัด 5 ตำแหน่งตามที่แสดงในรูป 5 โดยจะใช้เวอร์เนียร์คาลิเปอร์วัดความหนาของโฟมก่อน จากนั้นนำตัวอย่างโฟมมะม่วง 5 ตำแหน่งเดิมนั้นบด 3 กรัม ใส่ในภาชนะอะลูมิเนียม และนำไปอบแห้งจนได้น้ำหนักคงที่ในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง แล้วนำออกมาชั่งน้ำหนักที่แน่นอน และคำนวณปริมาณความชื้นจากสมการ (4) และ (5) ตามวิธีการมาตรฐาน AOAC (2006)[75]

$$MC_w = \frac{W_t - W_d}{W_w} \times 100 \quad (4)$$

$$MC_d = \frac{W_t - W_d}{W_d} \times 100 \quad (5)$$

เมื่อ	MC_w	คือ	ความชื้น (ร้อยละฐานเปียก)
	MC_d	คือ	ความชื้น (ร้อยละฐานแห้ง)
	W_t	คือ	น้ำหนักตัวอย่างที่เวลาใด ๆ (กรัม)
	W_d	คือ	น้ำหนักแห้งของตัวอย่าง (กรัม)
	W_w	คือ	น้ำหนักเปียกของตัวอย่าง (กรัม)

สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณน้ำอิสระ (a_w) ทำได้โดยชั่งตัวอย่างโพนัมะม่วงมหาชนกอบแห้ง บดประมาณ 3 กรัม หรือให้ปริมาณตัวอย่างอยู่สูงระดับครึ่งของภาชนะใส่ตัวอย่าง จากนั้นนำภาชนะใส่ในเครื่องวัดปริมาณน้ำอิสระ รุ่น Aqualab (Decagon, United of Kingdom)



ภาพประกอบ 5 ตำแหน่งที่ใช้ในการวัดปริมาณความชื้นและความหนาของโพนัม

3.3.2 การวิเคราะห์คุณภาพทางด้านสี

การทดสอบคุณภาพด้านสีของตัวอย่างโพนัมะม่วงมหาชนกอบแห้งบดโดยใช้เครื่องวัดสี (HunterLab, Reston, VA, USA) วัดค่าสีระบบ CIE ($L^* a^* b^*$) ด้วยเครื่อง Chroma meter รายงานค่าเป็น L^* (ค่าความสว่าง) a^* (ค่าความเป็น สีแดง) $-a^*$ (ค่าความเป็น สีเขียว) b^* (ค่าความเป็น สีเหลือง) $-b^*$ (ค่าความเป็น สีน้ำเงิน) โดยการทดลองจะทำการวัด 5 ซ้ำ และรายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย

ค่าการเปลี่ยนแปลงสี (ΔE) เป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่ใช้ในการประเมินคุณภาพทางกายภาพ ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้ค่า ΔE เป็นคุณสมบัติที่ใช้ในการประเมินการไหม้ของผลิตภัณฑ์เมื่อใช้กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟที่ไม่เหมาะสม ค่า ΔE นี้คำนวณได้จากการเปรียบเทียบกับสีอ้างอิงซึ่งใช้ค่าสีของผลิตภัณฑ์โพนัมเมทที่ผ่านการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง เนื่องจากเป็นวิธีการอบแห้งในอุดมคติที่สามารถรักษาคุณภาพทางด้านกลิ่น สี และรสชาติของผลิตภัณฑ์ได้ ค่า ΔE สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$

(6)

ค่าดัชนีสีน้ำตาล (Browning Index, BI) ใช้ในการประเมินระดับการเกิดสีน้ำตาลในผลิตภัณฑ์อาหาร โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการแปรรูป เช่น การอบแห้ง ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ค่าดัชนีสีน้ำตาลสามารถคำนวณได้จากค่าพิกัดสี L , a , b ตามสมการต่อไปนี้: (7,8)

$$BI = \frac{100(x-0.31)}{0.172} \quad (7)$$

โดยที่

$$x = \frac{(a^*+1.75L^*)}{(5.645L^*+a^*-3.012b^*)} \quad (8)$$

คำนวณค่า x ใช้ค่าที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดสี L^* (ค่าความสว่าง), a^* (สีแดง/เขียว), และ b^* (สีเหลือง/น้ำเงิน) นำค่าไปแทนในสมการที่ (8)

คำนวณค่า BI นำค่า x ที่คำนวณได้มาแทนในสมการที่ (7)

3.3.3 ลักษณะโครงสร้างภายในของโฟมมะม่วงมหาชนกอบแห้ง

ก่อนทำการบดตัวอย่างโฟม จะทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของแผ่นโฟมมะม่วงมหาชนกอบแห้งเพื่อศึกษาผลของการใช้ไมโครเวฟต่อโครงสร้างความเป็นรูพรุนของแผ่นโฟม ตรวจสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) (โดยเฉพาะรุ่น TM4000Plus จาก Hitachi High-Tech Ltd.) ที่กำลังขยาย 30X และแรงดันไฟฟ้าในการทำงานที่ 10 กิโลโวลต์

3.3.4 เนื้อสัมผัสของแผ่นโฟมมะม่วงมหาชนกอบแห้ง

ความกรอบเป็นคุณสมบัติที่แสดงออกมาเมื่อถูกแรงกระทำจนเกิดเสียงที่มีลักษณะเฉพาะอย่างฉับพลัน ซึ่งมีความสัมพันธ์กับโครงสร้างภายในของแผ่นโฟมอบแห้ง คุณสมบัตินี้สามารถวัดได้ในระหว่างการทดสอบความต้านทานการแตกหัก

การวัดค่าความกรอบของแผ่นโฟมมะม่วงมหาชนกอบแห้งทำได้โดยเตรียมตัวอย่างแผ่นโฟมแห้งขนาดกว้าง 3 มิลลิเมตร ยาว 5 มิลลิเมตร ใช้เครื่องวัดเนื้อสัมผัส Texture Analyzer ร่วมกับหัววัด Crisp fracture support rig (HDP/CDS) ซึ่งประกอบด้วยหัววัดกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 นิ้ว ทำการทดสอบจำนวน 12 ตัวอย่าง หาค่าเฉลี่ย ค่าแรงสูงสุด และระยะทางที่เกิดการแตกหักที่ได้จากการพล็อตกราฟระหว่างแรงกดและระยะกด นำมาคำนวณเป็นความสามารถในการแตกหัก (Fracturability)

3.3.5 ค่าการใช้พลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC)

ค่าการใช้พลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) คือ อัตราส่วนระหว่างพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งต่อปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุอบแห้ง สามารถคำนวณได้ดังสมการ 9

สภาวะการทดลองที่	อุณหภูมิลมร้อน (°C)	กำลังไฟฟ้าที่ป้อน ให้กับไมโครเวฟ (วัตต์)
1	55	300
2	55	300
3	55	300
4	55	450
5	55	450
6	55	450
7	55	600
8	55	600
9	55	600
10	65	300
11	65	300
12	65	300
13	65	450
14	65	450
15	65	450
16	65	600
17	65	600
18	65	600
19	75	300
20	75	300
21	75	300
22	75	450
23	75	450
24	75	450
25	75	600
26	75	600
27	75	600

โดยมีขั้นตอนการทดลองดังต่อไปนี้

- เมื่อเตรียมตัวอย่างโพนะม่วงดังหัวข้อ 3.1 แล้วทำการเทตัวอย่างโพนะม่วง 250 กรัม บนภาชนะที่สามารถใช้กับไมโครเวฟได้ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร เคลือบให้มีความหนาสม่ำเสมอประมาณ 2 มิลลิเมตร

- นำโพลีเมอร์ผงมหาชนกที่ได้อบแห้งที่สภาวะการอบแห้งต่าง ๆ จนกระทั่งได้ความชื้นประมาณร้อยละ 7 ฐานเปียก ทำการบันทึกค่าน้ำหนักโพลีเมอร์ผงในระหว่างการอบแห้งทุก ๆ 1 วินาที เพื่อหาจลนศาสตร์การอบแห้ง และอัตราการอบแห้ง
- นำค่าอัตราส่วนความชื้นที่เวลาใด ๆ จากการทดลอง มาวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสมการอบแห้งที่ใช้ในการทำนายจำนวน 10 สมการ โดยใช้เทคนิควิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear regression) ซึ่งมีดัชนีบ่งชี้ความสามารถในการทำนายของสมการ คือ สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square error, RMSE) และค่าโคสแควร์ (χ^2)
- เก็บตัวอย่างที่สภาวะการอบแห้งต่าง ๆ ในถุงออลูมิเนียมฟอยล์เพื่อรอการวิเคราะห์คุณภาพต่อไป (ดังหัวข้อ 3.3)
- ศึกษาสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง

3.4.1 การศึกษาคุณลักษณะการอบแห้ง

3.4.1.1 การหาจลนศาสตร์การอบแห้ง

การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งโพลีเมอร์ผงมหาชนกอบแห้งสามารถทำได้โดยการวิเคราะห์ในรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นและเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง สมการของอัตราส่วนความชื้นโดยคำนวณดังสมการ 10

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (10)$$

เมื่อ	M_0	คือ	ความชื้นเริ่มต้น (ร้อยละฐานแห้ง)
	M_t	คือ	ความชื้นที่เวลาใด ๆ (ร้อยละฐานแห้ง)
	M_e	คือ	ความชื้นสมดุล (ร้อยละฐานแห้ง)

การวิเคราะห์หาสมการอบแห้งที่เหมาะสมของการอบแห้งโพลีเมอร์ผงมหาชนก ทำได้โดยนำค่าอัตราส่วนความชื้นที่เวลาใด ๆ จากการทดลองมาเปรียบเทียบกับสมการอบแห้งที่ใช้สำหรับทำนาย ค่าความชื้นซึ่งอยู่ในรูปแบบสมการอบแห้งกึ่งทฤษฎี (Semi-theoretical drying equation) โดยใช้โปรแกรมทางสถิติในการประมาณค่าพารามิเตอร์แบบของจำลองรูปแบบสมการพื้นฐานที่ใช้ทำนายการอบแห้งชั้นบางมีรายละเอียดดังแสดงไว้ในตาราง 3 ซึ่งการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสมการอบแห้งใช้เทคนิควิเคราะห์การถดถอยไม่เชิงเส้น (Nonlinear regression) ซึ่งมีดัชนีบ่งชี้ความสามารถในการทำนายของสมการ คือ สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square error, RMSE) โดยที่ R^2 มีค่าสูงแสดงถึงคุณภาพของรูปแบบสมการที่มีความเหมาะสมในการทำนาย ในขณะที่ χ^2 และค่า RMSE

เป็นพารามิเตอร์ทางสถิติที่ใช้บ่งบอกความผิดพลาดในการทำนายค่าของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งที่มีความแม่นยำในการทำนายที่เหมาะสม ควรจะมีค่า R^2 สูงแต่มีค่า χ^2 และค่า RMSE ต่ำ มีความสัมพันธ์ดังสมการ 11 และ 12

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_{obs,i} - V_{pre,i})^2}$$

(11)

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(V_{obs,i} - V_{pre,i})^2}{N - Z}$$

(12)

เมื่อ	V_{obs}	คือ	ค่าอัตราความชื้นจากการทดลอง
	V_{pre}	คือ	ค่าความชื้นที่ทำนายได้จากสมการ
	N	คือ	จำนวนค่าสังเกต
	Z	คือ	จำนวนค่าคงที่ในแบบจำลอง

ตาราง 3 รูปแบบสมการเอมพิริคัลที่ใช้ทำนายการอบแห้งวัสดุชั้นบาง [76]

สมการ	ชื่อสมการ	รูปแบบสมการ
1	Lewis	$MR = e^{-kt}$
2	Page	$MR = e^{-kt^n}$
3	Henderson and Pabis	$MR = ae^{(-kt)}$
4	Two term (exponential)	$MR = ae^{(-kt)} + (1-a)e^{(-kat)}$
5	Wang and Singh	$MR = 1+at+bt^2$
6	Logarithmic	$MR = ae^{(-kt)} + c$
7	Approximate of diffusion	$MR = ae^{(-kt)} + (1-a)e^{(-kt)}$
8	Verma <i>et al.</i>	$MR = ae^{(-kt)} + (1-a)e^{(-gt)}$
9	Two term (4 parameters)	$MR = ae^{(-k_0t)} + be^{(-k_1t)}$
10	Midilli <i>et al.</i>	$MR = ae^{(-kt^n)} + bt$

3.4.1.2 การวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น

สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (D_{eff}) และค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) สมการกึ่งทฤษฎี (Semi-theoretical equation) ซึ่งจะมีรูปแบบความสัมพันธ์ในรูปกฎข้อที่สองของ

ฟิค (Fick's second law) สามารถใช้ในการหาอัตราส่วนความชื้น ดังแสดงในสมการ 13 สำหรับวัสดุที่มีชั้นบาง

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\pi^2 \frac{D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (13)$$

เมื่อ D_{eff} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (ตารางเมตรต่อวินาที)
 L คือ ความหนาครึ่งหนึ่งของโพน (เมตร)

สัมประสิทธิ์แพร่ความชื้นประสิทธิผล (D_{eff}) เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิที่โพนมะม่วงมหาชนกดูดซับพลังงาน มีความสัมพันธ์ตามรูปแบบของสมการอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) ถูกใช้ในการวิเคราะห์หาค่าพลังงานกระตุ้น (Activation energy for diffusion, E_a) ซึ่งบ่งบอกค่าความร้อนแฝงในการเปลี่ยนสถานะของมวลความชื้นในโพนมะม่วงมหาชนก (Latent heat of vaporization) ในระหว่างกระบวนการอบแห้งโดยมีรูปแบบสมการดังแสดงในสมการ 14

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (14)$$

เมื่อ D_0 คือ ปัจจัยก่อนเลขชี้กำลัง (ตารางเมตรต่อวินาที)
 E_a คือ พลังงานกระตุ้น (กิโลจูลต่อโมล)
 R คือ ค่าคงที่ของก๊าซซึ่งมีค่าเท่ากับ 8.314 กิโลจูลต่อโมล
 T คือ อุณหภูมิของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง (เคลวิน)

3.4.2 การศึกษาสภาวะอบแห้งแบบโพนแมทรวมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟที่เหมาะสม

เนื่องจากแต่ปัจจัยการอบแห้งต่างส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกัน ดังนั้นการหาสภาวะที่ดีที่สุดหรือสภาวะที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งสำคัญในการออกแบบสภาวะ วิทยานิพนธ์นี้ใช้วิธีผลตอบสนองพื้นผิว (Response surface method, RSM) ในการหาสภาวะที่เหมาะสมโดยพิจารณา 2 ปัจจัย คือ อุณหภูมิอบแห้ง (55 65 และ 75 องศาเซลเซียส) และกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟ (300 450 และ 600 วัตต์) ในขณะที่ผลตอบสนองที่ศึกษา ประกอบด้วย ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ค่าการใช้พลังงานจำเพาะ และค่าการเปลี่ยนแปลงสี

สมการความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยและผลตอบสนองเป็นแบบสมการโพลีโนเมียลอันดับสอง (Second-order polynomial equation) ดังนี้

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^n a_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n a_{ij} x_i x_j \quad (15)$$

ในสมการ 10 สัมประสิทธิ์ a_0 คือ ค่าคงที่ a_i และ a_{ij} Linear และ Quadratic effect ตามลำดับ ในขณะที่ a_{ij} คือ Interaction effect ส่วน x_i ($n = 2$) คือ ค่าจริงของแฟคเตอร์ที่ i ซึ่งสมการดังกล่าวนี้จะแสดงการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวตอบสนองของตัวแปรต้น ได้แก่ อุณหภูมิความร้อน (T) และกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟ (MW) ในขณะที่ตัวแปรตาม คือ ผลตอบสนองทั้งหมดดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น

ผลตอบสนองที่ประมาณค่าจากสมการ 15 ถูกนำมาเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของค่า Scale free value (d_i) ซึ่งเรียกว่าค่าการออกแบบ (Desirability) ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 โดยที่ค่า 0 แสดงผลตอบสนอง 1 หรือมากกว่า 1 ผลตอบสนองที่อยู่นอกขีดจำกัดที่ยอมรับได้ ในขณะที่ค่า 1 แทนสถานะในอุดมคติ ฟังก์ชันของ Desirability ($d_i(Y_i)$) ที่ใช้มีความแตกต่างกันโดยการศึกษาจะใช้ค่าผลตอบสนองค่าการเปลี่ยนแปลงสีและค่าการใช้พลังงานจำเพาะต่ำที่สุด ในขณะที่สัมประสิทธิ์การแปรผันค่ามากที่สุด ดังนั้นค่า Desirability รวมที่ต้องการจึงเป็นการผสมผสานของแต่ละผลตอบสนองดังสมการต่อไปนี้

$$D = (d_1(Y_1)d_2(Y_2)\dots d_k(Y_k))^{1/k} \quad (16)$$

โดยที่ k คือ จำนวนของผลตอบสนอง

3.5 การศึกษาผลของการควบคุมอุณหภูมิของวัสดุและกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟในระหว่างกระบวนการอบแห้งแบบโพรแมทร่วมกับไมโครเวฟแบบขั้นตอน

สำหรับการศึกษาในหัวข้อนี้จะใช้สภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมที่ได้จากหัวข้อที่ 3.4 เป็นสภาวะอ้างอิงในการศึกษาผลของการควบคุมอุณหภูมิของวัสดุและกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟในระหว่างกระบวนการอบแห้งแบบโพรแมทร่วมกับไมโครเวฟแบบขั้นตอนโดยใช้ชุดควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟที่สามารถปรับกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟได้อย่างต่อเนื่อง 2 ระดับ คือ ระดับต่ำและระดับสูง สำหรับกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟระดับสูงจะใช้กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟที่เหมาะสมได้จากหัวข้อที่ 3.4 กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟระดับต่ำจะใช้กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟระดับต่ำ 4 ระดับ การทำงานของกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟทั้งสองระดับจะถูกควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ที่พัฒนาขึ้น โดยที่มีการควบคุมอุณหภูมิตัวอย่างโพรแมทให้มีค่าคงที่ (ใช้อุณหภูมิที่เหมาะสมได้จากหัวข้อที่ 3.4) อุณหภูมิจะถูกควบคุมแบบป้อนกลับในรอบ 1 วินาที

เมื่ออุณหภูมิของตัวอย่างโพรแมทต่ำกว่าอุณหภูมิที่ตั้งไว้ ไมโครคอนโทรลเลอร์จะสั่งให้ชุดควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟปรับกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟในระดับสูง แต่เมื่ออุณหภูมิของตัวอย่างโพรแมทสูงกว่าอุณหภูมิที่ตั้งไว้ไมโครคอนโทรลเลอร์จะสั่งให้ชุดควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟปรับกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟในระดับต่ำ ค่าอุณหภูมิและอัตราการใช้กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟจะถูกบันทึกออนไลน์ในแต่ละวินาที บันทึกค่าน้ำหนักตัวอย่างตลอด

ระยะเวลาการอบแห้งแล้วนำมาประมาณค่าความชื้น โดยความชื้นสุดท้ายของโพนมะม่วงอบแห้งที่ได้มีค่าตามเป้าหมายที่ตั้งไว้ คือ ประมาณร้อยละ 7 ฐานเปียก

จากนั้นเก็บตัวอย่างที่สภาวะการอบแห้งแบบขั้นตอนต่างๆ ในถุงออลูมิเนียมฟอยด์เพื่อรอการวิเคราะห์ คุณภาพต่าง ๆ ได้แก่ ความชื้น (MC (%wb)) ปริมาณน้ำอิสระ (a_w) ค่าดัชนีสีน้ำตาล (Browning Index, BI) ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (D_{eff}) ค่าการใช้พลังงานจำเพาะ (SEC) และพิจารณาหาสภาวะการอบแห้งแบบโพนแม่ทรม่วมกับไมโครเวฟแบบขั้นตอนที่เหมาะสมที่ทำให้ค่าความผิดพลาดของอุณหภูมิที่ควบคุมมีค่าน้อยที่สุดในรูปแบบของค่า RMSE เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังวัตต์ไมโครเวฟกับเวลาการอบแห้งในหัวข้อต่อไป

3.6 การศึกษาฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟสำหรับควบคุมอุณหภูมิของโพนมะม่วงระหว่างการอบแห้ง

สำหรับการศึกษาในหัวข้อนี้จะใช้สภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมที่ได้จากหัวข้อที่ 3.5 เป็นสภาวะอ้างอิงในการศึกษาฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟสำหรับควบคุมอุณหภูมิของโพนมะม่วงโดยไม่ใช้เซนเซอร์วัดอุณหภูมิระหว่างการอบแห้งโดยใช้ชุดควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟที่สามารถปรับกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟได้อย่างต่อเนื่องตามฟังก์ชันซึ่งถูกควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ที่พัฒนาขึ้น

ทำการเฉลี่ยค่าอัตราการใช้กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟที่ได้บันทึกไว้ในระหว่างการอบแห้งของสภาวะนั้นทุก ๆ 4 นาที เพื่อลดการแกว่งของค่าที่บันทึกไว้ พล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟกับเวลาของตัวอย่างโพน จากนั้นหาสมการความสัมพันธ์ดังกล่าวโดยใช้ Gaussian curve-fitting จะได้

$$PW = f(t) \quad (17)$$

โดยที่ PW คือ กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟ (วัตต์)
t คือ เวลาในการอบแห้ง (นาที)

อบแห้งที่สภาวะการอบแห้งต่างๆ จนกระทั่งได้ความชื้นประมาณร้อยละ 7 ฐานเปียก ทำการบันทึกค่าน้ำหนักโพนมะม่วงในระหว่างการอบแห้งทุก ๆ 1 วินาที เพื่อหาจลนศาสตร์การอบแห้งเปรียบเทียบกับจลนศาสตร์การอบแห้งของสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมที่ได้จากหัวข้อที่ 3.4

จากนั้นเก็บตัวอย่าง ในถุงออลูมิเนียมฟอยด์เพื่อรอการวิเคราะห์คุณภาพต่าง ๆ (ดังหัวข้อ 3.3) ได้แก่ ลักษณะโครงสร้างภายในตัวอย่างโพน ความชื้น (MC (%wb)) ปริมาณน้ำอิสระ (a_w) ค่าดัชนีสีน้ำตาล (Browning Index, BI) ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (D_{eff}) ค่าการใช้พลังงานจำเพาะ (SEC) ค่าความผิดพลาดของอุณหภูมิ (RMSE) ความหนาโพน และคุณสมบัติด้านเนื้อสัมผัส ได้แก่ ค่าความแข็งและค่าความกรอบ

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

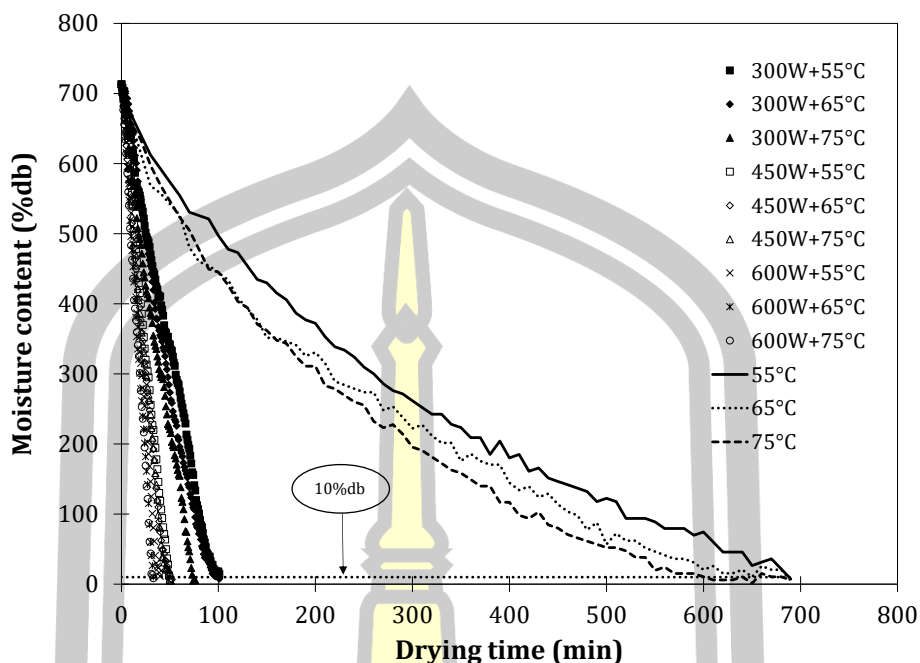
วิทยานิพนธ์นี้ได้แบ่งผลการศึกษาออกเป็น 3 ส่วน คือ ผลของการศึกษาคุณลักษณะการอบแห้งและสภาวะอบแห้งแบบโฟมแม่ทรมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟที่เหมาะสม ผลของการควบคุมอุณหภูมิโดยการให้ความร้อนเสริมด้วยไมโครเวฟแบบขั้นตอน และผลของฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟสำหรับควบคุมอุณหภูมิของโฟมแม่ทรมระหว่างการอบแห้ง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

4.1 ผลของการศึกษาคุณลักษณะการอบแห้งและสภาวะอบแห้งแบบโฟมแม่ทรมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟที่เหมาะสม

4.1.1 จลนศาสตร์การอบแห้ง

หัวข้อนี้นำเสนอผลของการอบแห้งโฟมแม่ทรมภายใต้สภาวะต่าง ๆ ซึ่งจะเปรียบเทียบกับจลนศาสตร์การอบแห้งระหว่างวิธีการพาความร้อนร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟกับวิธีการพาความร้อนแบบธรรมดาตามที่แสดงในรูป 6 จากผลการทดลอง พบว่า อัตราส่วนความชื้น (MR) ลดลงตามระยะเวลาการอบแห้งในทุกสภาวะการทดลองซึ่งเป็นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่พบได้ในการอบแห้งวัสดุทางการเกษตรและอาหารทั่วไป เวลาที่ใช้ในการลดความชื้นลงจากร้อยละ 700 ฐานแห้ง เหลือร้อยละ 10 ฐานแห้ง โดยใช้สภาวะอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวอยู่ในช่วง 600-700 นาที ในขณะที่เวลาในการลดลงของความชื้นด้วยวิธีการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟอยู่ในช่วง 30-100 นาที ซึ่งใช้เวลาสั้นกว่าวิธีการอบแห้งแบบลมร้อนแบบธรรมดาเป็นผลมาจากการให้ความร้อนเชิงปริมาตรที่เพิ่มขึ้นของไมโครเวฟ ช่วยทำให้ความชื้นภายในเคลื่อนตัวจากโครงสร้างภายในของโฟมไปยังพื้นผิวได้เร็วขึ้น

พจนัน ปณุกิตโต ชีเว

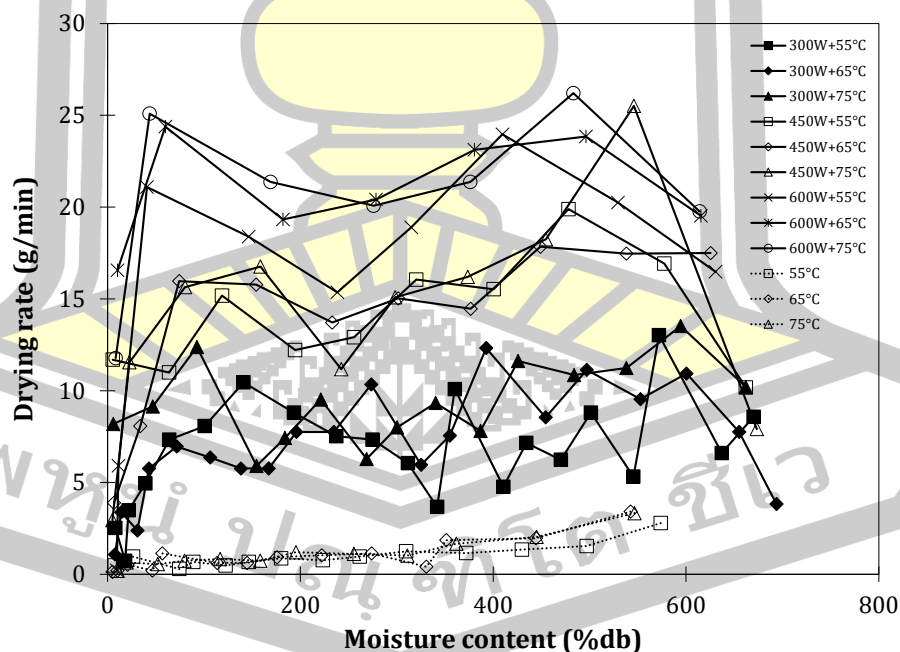


ภาพประกอบ 6 จลนศาสตร์การอบแห้งของโคมเนื้อมะม่วงที่สภาวะการอบแห้งต่างกัน

การเพิ่มประสิทธิภาพของจลนศาสตร์การอบแห้งของเนื้อมะม่วงที่ผ่านกระบวนการอบแห้งด้วยโคมแม่ทรมร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟสอดคล้องกับผลการศึกษาวิจัยต่าง ๆ ที่เน้นที่วัสดุและเงื่อนไขที่แตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น Qadri และ Srivastava [77] อธิบายว่าการให้ความร้อนเชิงปริมาตรด้วยไมโครเวฟช่วยทำให้ลดระยะเวลาการอบแห้งของเนื้อมะเขือเทศ ในขณะที่ยังคงคุณค่าทางโภชนาการและคุณสมบัติทางประสาทสัมผัสที่จำเป็นไว้ นักวิจัยดังกล่าวยังได้ข้อสรุปผลการวิจัยที่คล้ายกันใภายหลังเมื่อศึกษาการอบแห้งเนื้อฝรั่ง ในทำนองเดียวกัน Gao et al. [51] ได้ปรับปรุงสภาพพลังงานไมโครเวฟและสารก่อโคมให้เหมาะสมที่สุดเพื่อแสดงให้เห็นว่าไมโครเวฟช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของผลบลูเบอร์รี่แห้งได้อย่างมีนัยสำคัญ ผลการศึกษาวิจัยเหล่านี้สอดคล้องกับผลการศึกษาวิจัยได้จากหัวข้อนี้เนื่องจากการตั้งค่าพลังงานไมโครเวฟสัมพันธ์กับอัตราการอบแห้ง นอกจากนี้ยังได้ศึกษาการอบแห้งด้วยไมโครเวฟกับเนื้อผลไม้ชนิดอื่น ๆ รวมถึงเนื้อมะม่วงใน Chaux-Gutiérrez et al. [78] ซึ่งศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์การทำงานต่อจลนศาสตร์การอบแห้งและคุณค่าทางโภชนาการ พบว่า พลังงานไมโครเวฟช่วยลดเวลาในการอบแห้ง Varol et al. [79] และ Süfer et al. [54] ได้ศึกษาการอบแห้งส้มจัดและส้มซ่า ตามลำดับ การศึกษาทั้งสองนี้แสดงให้เห็นว่ากระบวนการอบแห้งใช้เวลาอันน้อยลงและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานในขณะที่รักษาคุณสมบัติสีและเนื้อสัมผัสไว้ Yüksel [59] ยังได้นำวิธีการอบแห้งแบบผสมผสานนี้ไปใช้กับโยเกิร์ต ซึ่งได้แนะนำว่าวิธีการนี้มีศักยภาพในการนำไปประยุกต์ใช้กับวัสดุอื่น ๆ ที่หลากหลายนอกเหนือจากเนื้อผลไม้ได้

อัตราการอบแห้งที่ปรับปรุงขึ้นโดยการอบแห้งแบบโคมแม่ทรมร่วมกับไมโครเวฟนั้นสามารถอธิบายเพิ่มเติมได้จากกราฟอัตราการอบแห้งที่แสดงไว้ในรูป 7 ซึ่งแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าอัตราการอบแห้งของวิธีการแบบผสมผสานมีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับการอบแห้งด้วยลมร้อนอย่างเดียว การ

เพิ่มขึ้นของอัตราการอบแห้งดังกล่าวสามารถอธิบายได้จากคลื่นไมโครเวฟที่ให้ความร้อนเชิงปริมาตรสามารถทะลุผ่านแผ่นโพนีอ้อมะม่วงและเข้าถึงได้อย่างสม่ำเสมอและรวดเร็วขึ้น กระบวนการให้ความร้อนที่รวดเร็วนี้นำมาซึ่งการระเหยของน้ำบนโครงสร้างด้านในของแผ่นโพนีอ้อมะม่วงมีประสิทธิภาพมากขึ้น ส่งผลให้ความชื้นเคลื่อนตัวไปที่พื้นผิวได้เร็วขึ้น อัตราการอบแห้งที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพของเทคโนโลยีไมโครเวฟในการอบแห้งแบบโพนีอ้อมะม่วง ผลการวิจัยที่เกี่ยวกับการเพิ่มอัตราการอบแห้งที่มากขึ้นซึ่งทำได้โดยใช้การอบแห้งแบบโพนีอ้อมะม่วงร่วมกับไมโครเวฟนี้ สอดคล้องกับผลการวิจัยของ Yüksel และ Pandiselvam [80], Qadri และ Srivastava [77] และ Islam et al. [81] Qadri และ Srivastava [77] รายงานว่า การใช้การอบแห้งแบบโพนีอ้อมะม่วงร่วมกับไมโครเวฟสำหรับเนื้อมะเขือเทศช่วยเพิ่มอัตราการอบแห้งได้อย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับวิธีการดั้งเดิม นอกจากนี้ยังพบว่า การเพิ่มระดับพลังงานไมโครเวฟช่วยลดเวลาการอบแห้งลงประมาณ 15-16 เท่า เมื่อเทียบกับการอบแห้งแบบโพนีอ้อมะม่วงอย่างเดียว ในทำนองเดียวกัน Yüksel และ Pandiselvam [80] พบว่า ระดับพลังงานไมโครเวฟส่งผลกระทบบอย่างมีนัยสำคัญต่ออัตราการอบแห้ง โดยระดับพลังงานที่สูงขึ้นส่งผลให้เวลาในการอบแห้งเร็วขึ้นและการแพร่กระจายความชื้นดีขึ้นสำหรับโพนีอ้อมะม่วง นอกจากนี้ Islam et al. [81] ยังได้ศึกษาจลนศาสตร์การอบแห้งของการอบแห้งแบบโพนีอ้อมะม่วงร่วมกับไมโครเวฟสำหรับน้ำขุ่น ซึ่งเน้นย้ำถึงข้อดีของการอบแห้งด้วยไมโครเวฟในแง่ของประสิทธิภาพการใช้พลังงานและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ดังนั้น อัตราการอบแห้งที่เพิ่มขึ้นจึงเผยให้เห็นประสิทธิภาพของการอบแห้งแบบโพนีอ้อมะม่วงร่วมกับไมโครเวฟสำหรับเนื้อมะม่วงโพนีอ้อมะม่วงในการศึกษา



ภาพประกอบ 7 กราฟอัตราการอบแห้งที่สภาวะการอบแห้งที่แตกต่างกัน

หัวข้อนี้ยังได้ทำการศึกษาความสม่ำเสมอของปริมาณความชื้นและลักษณะโครงสร้างเชิงปริมาตรในโฟมเนื้อเมฆว่องอบแห้ง ดังแสดงในตาราง 4 เกี่ยวกับค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาณความชื้นและความหนาได้จากการวัดที่ตำแหน่งต่าง ๆ จำนวน 5 จุด ซึ่งค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ต่ำบ่งชี้ถึงความสม่ำเสมอสูง ซึ่งหมายความว่าความร้อนจากไมโครเวฟที่เกิดขึ้นทั่วเนื้อวัสดุจะมีความสม่ำเสมอ ผลการศึกษาของการศึกษานี้สอดคล้องกับรายงานของ Chen et al. [82] ซึ่งได้ทำการศึกษาทดลองเกี่ยวกับการอบแห้งแอปเปิลด้วยไมโครเวฟกำลังสูง จากงานวิจัยดังกล่าวนี้ พบว่าการอบแห้งด้วยไมโครเวฟช่วยปรับปรุงความสม่ำเสมอของการกระจายความชื้นได้อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากผลของการให้ความร้อนเชิงปริมาตร ซึ่งช่วยให้ความร้อนแทรกซึมได้อย่างรวดเร็วและสม่ำเสมอทั่วทั้งวัตถุดิบ การให้ความร้อนที่สม่ำเสมอนี้ทำให้ปริมาณความชื้นสม่ำเสมอทั่วชิ้นแอปเปิลอบแห้ง นอกจากนี้ผลการศึกษาของ Chen et al. [82] ยังเน้นย้ำถึงประสิทธิภาพของการอบแห้งด้วยไมโครเวฟในการทำให้เกิดความสม่ำเสมอของโครงสร้าง

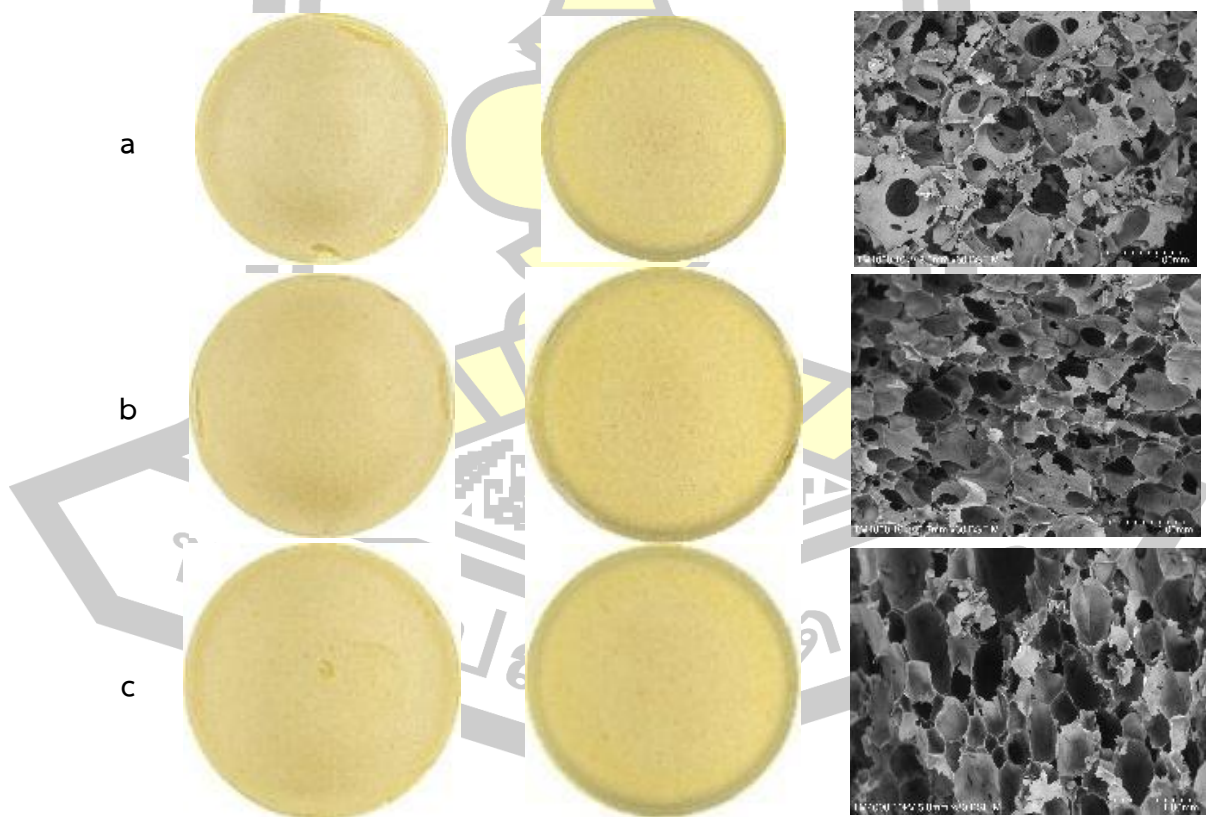
ตาราง 4 ค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาณความชื้นและความหนาของโฟมเมฆว่องที่สภาวะการอบแห้งแตกต่างกัน

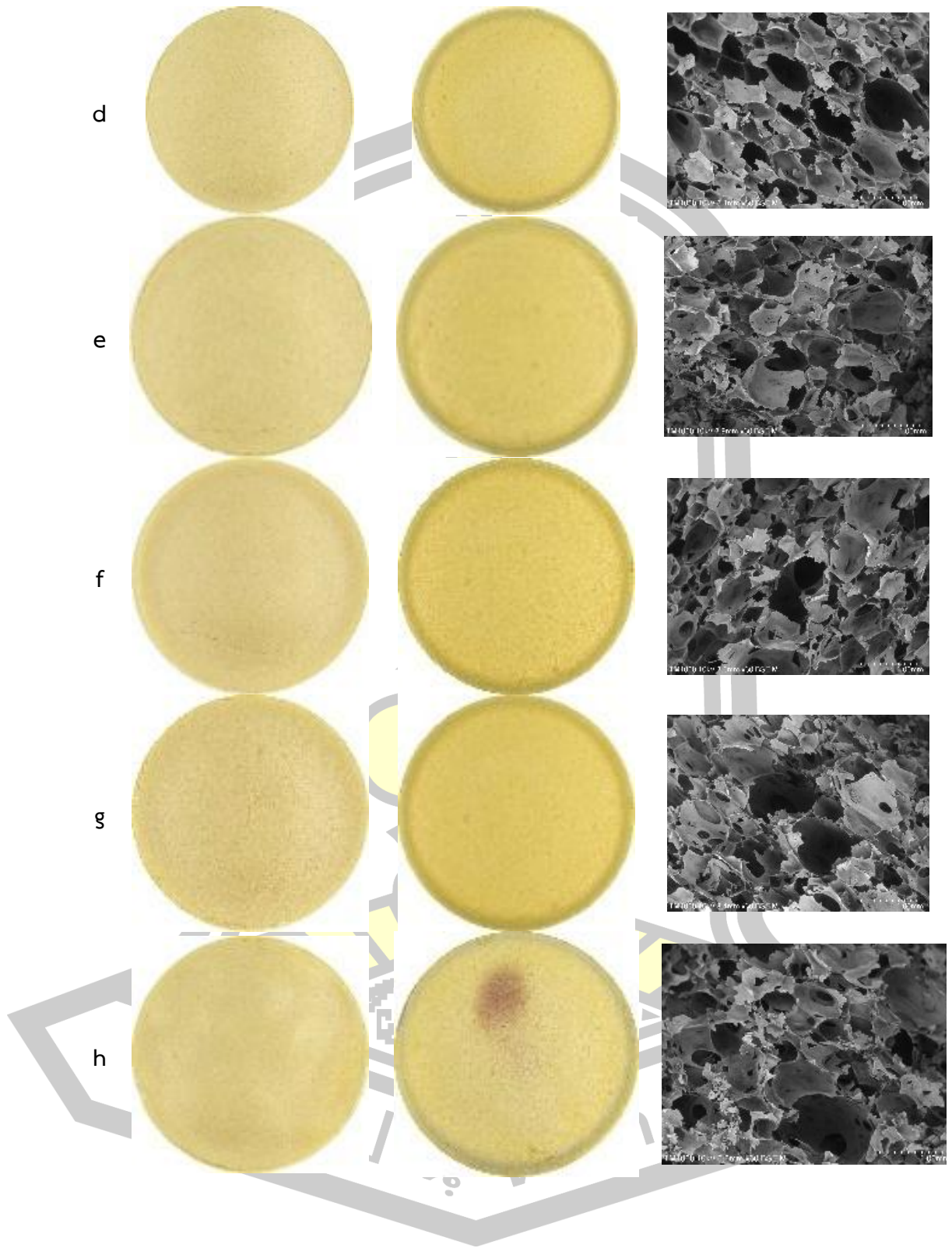
MW (W)	T (°C)	MC (%db)		Thickness (mm)	
		Mean value	Deviation	Mean value	Deviation
300	55	6.00	0.59	11.8	0.6
300	65	7.03	0.14	11.7	0.8
300	75	9.59	0.53	12.6	1.3
450	55	7.79	0.66	13.4	1.0
450	65	6.48	0.64	15.0	0.8
450	75	6.45	1.00	19.8	0.9
600	55	6.94	1.50	20.2	1.6
600	65	6.84	1.12	20.9	1.4
600	75	6.55	0.47	21.7	2.4

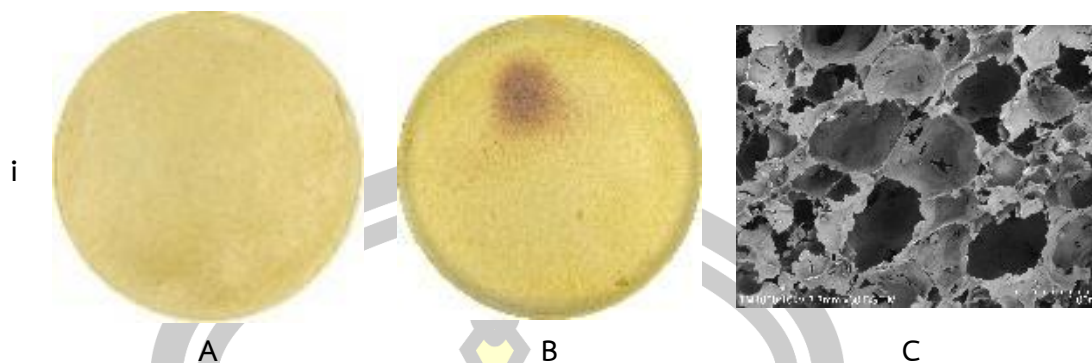
เมื่อพิจารณาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาณความชื้นที่แสดงในตาราง 4 พบว่า ความสม่ำเสมอมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟเพิ่มขึ้น แต่ผลกระทบดังกล่าวที่ส่งผลจากอิทธิพลของอุณหภูมิความร้อนไม่สามารถสังเกตได้อย่างชัดเจน ตัวอย่างเช่น ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานร้อยละ 0.14 ฐานแห้ง จากสภาวะการอบแห้งที่ใช้กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟ 300 วัตต์ และอุณหภูมิความร้อน 65 องศาเซลเซียส บ่งชี้ว่ากระบวนการอบแห้งมีความสม่ำเสมอสูง ในขณะที่ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานร้อยละ 1.50 ฐานแห้ง จากสภาวะการอบแห้งที่ใช้กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟ 600 วัตต์ และอุณหภูมิความร้อน 55 องศาเซลเซียส บ่งชี้ว่ากระบวนการอบแห้งมีความสม่ำเสมอน้อยกว่า ความผันผวนดังกล่าวอาจเกิดจากการกระจายความร้อนที่ไม่สม่ำเสมอเมื่อใช้

กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟสูง ส่งผลให้ความชื้นมีการไล่ระดับ (Moisture gradient) ทั่วทั้งแผ่นโพน

การวัดความหนาในตาราง 4 เผยให้เห็นของการเสียรูปของโพนที่ได้รับผลกระทบจากสภาวะการอบแห้ง โพนเนื้อมะม่วงที่อบแห้งด้วยกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟ 600 วัตต์ และอุณหภูมิลมร้อน 75 องศาเซลเซียส ให้ความหนาสูงสุดที่ 21.7 มิลลิเมตร ซึ่งสูงกว่าค่าเริ่มต้นที่ 20 มิลลิเมตร ซึ่งอาจเกิดจากผลกระทบจากการพองตัว (Puffing effect) ที่เกิดจากพลังงานไมโครเวฟสูง ในทางตรงกันข้าม ความหนาเฉลี่ยต่ำสุดประมาณ 12 มิลลิเมตร ได้มาจากการตั้งค่ากำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟระดับต่ำ โดยส่วนใหญ่ คือ 300 วัตต์ ในกรณีนี้การพองตัวเกิดขึ้นน้อยลงเนื่องจากได้เกิดความร้อนที่ต่ำกว่า และอาจเกิดการยุบตัวของโพนมากขึ้นเนื่องจากระยะเวลาการอบแห้งที่ยาวนาน การเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นและความหนาทั่วโพนเนื้อมะม่วงที่ผ่านการอบแห้งภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ แสดงให้เห็นว่า ระดับพลังงานไมโครเวฟที่สูงขึ้นทำให้การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น และด้วยเหตุนี้ประสิทธิภาพการอบแห้งจึงเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ความไม่สม่ำเสมอของกระบวนการอบแห้งก็เห็นได้ชัดเจนเช่นกัน การเปรียบเทียบกับ Chauz-Gutiérrez et al [78] และ Yüksel [59] ยืนยันถึงการกระจายความร้อนที่ไม่สม่ำเสมอเมื่อใช้พลังงานไมโครเวฟสูง ข้อสังเกตเหล่านี้ชี้ให้เห็นว่าการอบแห้งแบบโพนแมทร่วมกับไมโครเวฟต้องควบคุมความเข้มของคลื่นไมโครเวฟและอุณหภูมิของวัสดุอย่างแม่นยำเพื่อป้องกันการสูญเสียคุณภาพของผลิตภัณฑ์ดังกล่าว







ภาพประกอบ 8 ภาพโฟมเนื้อมะม่วงอบแห้งและภาพ SEM ที่อบแห้งภายใต้สภาวะที่แตกต่างกัน โดย a) 300W+55°C, b) 300W+65°C, c) 300W+75°C, d) 450W+55°C, e) 450W+65°C, f) 450W+75°C, g) 600W+55°C, h) 600W+65°C and i) 600W+75°C; A: ด้านบนของโฟม , B: ด้านล่างของโฟม และ C: ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (กำลังขยาย $\times 30$ ที่ 10 kV)

รูป 8 แสดงผลกระทบของกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟและอุณหภูมิความร้อนที่ต่างกันต่อลักษณะที่ปรากฏและสัญญาณวิทยาของโฟมแห้ง โดยแสดงภาพด้านหน้าและด้านล่างในคอลัมน์ A และ B ตามลำดับ ส่วนภาพ SEM แสดงอยู่ในคอลัมน์ C ทั้งด้านหน้าและด้านล่างของโฟมแห้งซึ่งมีความสำคัญเนื่องจากช่วยให้เข้าใจถึงการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพที่เกิดจากสภาวะการอบแห้งบางประการได้

ภาพด้านหน้าแสดงความแตกต่างของสีเพียงเล็กน้อย ในขณะที่ภาพด้านล่างแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะเมื่อใช้กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟระดับสูงที่ 600 วัตต์ พบว่ามีจุดไหม้ซึ่งยืนยันถึงการกระจายความร้อนที่ไม่สม่ำเสมอหรือความร้อนสูงเกินไปเฉพาะที่เมื่อใช้กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟระดับสูง ผลการทดลองดังกล่าวนี้สอดคล้องกับข้อมูลเชิงปริมาณที่กล่าวถึงก่อนหน้านี้ในตาราง 4

Raj และ Dash [83] ได้รายงานว่าการเปลี่ยนแปลงสีสูงสุดของตัวอย่างแก้วมังกรเมื่อใช้ไมโครเวฟกำลังสูง 600 วัตต์ เนื่องจากเกิด Browning index ที่ไม่ได้เกิดจากการทำงานของเอนไซม์ (Non-enzymatic browning) ผลการวิจัยของ Poogungploy et al. [63] ยังแสดงให้เห็นด้วยว่าการใช้ไมโครเวฟกำลังสูงส่งผลให้พื้นผิวของถั่วแมคคาเดเมียร้อนจนเกินไป ซึ่งยืนยันว่าการอบด้วยไมโครเวฟร่วมกับการควบคุมอุณหภูมิของวัสดุเป็นวิธีแก้ปัญหาการเกิดความร้อนสูงเฉพาะจุดได้ และส่งผลให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ดีขึ้น ดังนั้นการอบด้วยไมโครเวฟที่ใช้ร่วมกับการปล่อยคลื่นไมโครเวฟแบบพัลส์และการควบคุมอุณหภูมิของวัสดุจึงสามารถเพิ่มความสม่ำเสมอและลดการไหม้เกรียมได้

รูป 8C ยังแสดงให้เห็นโครงสร้างโฟมแห้งที่ได้รับผลกระทบจากสภาวะการอบแห้งอีกด้วย พบว่า ขนาดรูพรุนของโฟมแห้งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อใช้กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟสูง เมื่อใช้พลังงานไมโครเวฟสูงทำให้เกิดอัตราการระเหยสูง ความชื้นในโฟมจะเคลื่อนตัวไปที่พื้นผิวผ่านแรงคาพิลลารี (Capillary force) ได้เร็วขึ้นจนยุบตัวได้ จึงรักษาโครงสร้างของโฟมไว้ได้ ในทางกลับกัน

เมื่อใช้พลังงานไมโครเวฟต่ำ โฟมอาจยุบตัวได้ ส่งผลให้โครงสร้างโฟมมีขนาดรูพรุนเล็กและแน่น ใกล้ชิดกัน ดังที่เห็นในรูป 8C (a) การสังเกตนี้สอดคล้องกับความหนาที่ลดลงเมื่อใช้กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟ 300 วัตต์ ตามที่แสดงไว้ในตาราง 4

4.1.2 แบบจำลองการอบแห้ง

เนื่องจากแบบจำลองการอบแห้งที่แตกต่างกันอาจมีความเหมาะสมกับวิธีการอบแห้ง สภาพการอบแห้ง และวัสดุที่แตกต่างกัน ดังนั้นหัวข้อนี้จึงได้ศึกษา วิเคราะห์สมการการอบแห้งเพื่อให้เหมาะสมกับวิธีการอบแห้งแบบโฟมแม่ทรร่วมกับไมโครเวฟของเนื้อมะม่วง ตาราง 5 แสดงถึงการสรุปค่าพารามิเตอร์ทางสถิติทั้งหมด รวมทั้ง R^2 RMSE และ χ^2 โดยเฉลี่ยสำหรับแต่ละสถานะการอบแห้ง จากตารางสังเกตได้ว่า R^2 ที่ได้จากแบบจำลองการอบแห้งทั้งหมดสูงกว่าร้อยละ 90 ในทุกสถานะการอบแห้ง โดยอยู่ในช่วงร้อยละ 91.54 - 99.92 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความแม่นยำสูงในการทำนายปริมาณความชื้นของวัสดุ ในบรรดาแบบจำลองการอบแห้งทั้งหมดที่ทดสอบนั้น แบบจำลองของ Midilli ถือเป็นตัวเลือกที่ดีที่สุด เนื่องจากให้ R^2 สูงสุด และค่าความผิดพลาดของ RMSE และ χ^2 ต่ำสุด ดังนั้นแบบจำลองการอบแห้ง Midilli ร่วมกับพารามิเตอร์ทั้งหมดสำหรับแต่ละเงื่อนไขการอบแห้งตามที่สรุปไว้ในตาราง 6 จึงสามารถอธิบายพฤติกรรมของการอบแห้งของเนื้อมะม่วงในกระบวนการอบแห้งแบบโฟมแม่ทรร่วมกับไมโครเวฟได้อย่างเหมาะสม

แบบจำลอง Midilli มีความถูกต้องสูงในการทำนายพฤติกรรมของการอบแห้งวัสดุชีวภาพและสามารถอธิบายจลนพลศาสตร์ที่ซับซ้อนซึ่งเกี่ยวข้องกับกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลได้อย่างแม่นยำ จึงเหมาะสมที่สุดสำหรับการวิเคราะห์ในวิทยานิพนธ์นี้ ผลดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Qadri [84] ที่สรุปว่า แบบจำลอง Midilli เหมาะสมที่สุดในการอธิบายลักษณะการอบแห้งเนื้อฝรั่งที่ผ่านพลังงานไมโครเวฟแตกต่างกัน นอกจากนี้ Yüksel และ Pandiselvam [80] แสดงให้เห็นว่าแบบจำลอง Midilli อธิบายพฤติกรรมของการอบแห้งของแผ่นโพลีเมอร์ร่วมกับกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟได้อย่างเหมาะสม

ตาราง 5 พารามิเตอร์ทางสถิติของแบบจำลองการอบแห้งที่ได้จากสถานะการอบแห้งที่แตกต่างกัน

Models	Statistical parameters		
	R^2	RMSE	χ^2
Lewis	91.54—94.84	0.0646—0.0918	0.0042—0.0087
Page	97.81—99.55	0.0211—0.0449	0.0005—0.0021
Henderson & Pabis	93.76—96.20	0.0570—0.0788	0.0033—0.0066
Two term (2 parameters)	92.20—98.13	0.0536—0.0917	0.0030—0.0088
Wang & Singh	98.78—99.85	0.0109—0.0368	0.0001—0.0014
Logarithmic	98.95—99.90	0.0087—0.0341	0.0001—0.0012
Approximate of diffusion	91.54—94.87	0.0646—0.0918	0.0043—0.0089

Verma et al.	91.54—99.88	0.0095—0.0918	0.0001—0.0092
Two term (4 parameters)	93.76—96.20	0.0570—0.0788	0.0034—0.0070
Midilli et al.	99.43—99.92	0.0085—0.0241	0.0001—0.0006

ตาราง 6 พารามิเตอร์ของแบบจำลอง Midilli ที่สภาวะการอบแห้งแตกต่างกัน

MW (W)	T (°C)	Model parameters			
		a	b	k	n
300	55	0.992697	0.005263	1.127763	-0.003755
300	65	1.012998	0.004127	1.352223	-0.001305
300	75	1.020146	0.022428	0.704980	-0.008242
450	55	1.015223	0.009677	1.242391	-0.005613
450	65	0.990529	0.012610	1.213454	-0.004710
450	75	1.018591	0.012005	1.245101	-0.004494
600	55	0.978851	0.006426	1.585083	-0.001564
600	65	1.014010	0.011681	1.113584	-0.016906
600	75	1.002476	0.013643	1.196749	-0.011965

4.1.3 วิธีการตอบสนองพื้นผิวและการเพิ่มประสิทธิภาพ

นอกจากการวิเคราะห์จลนพลศาสตร์การอบแห้งแล้ว การศึกษาต่อไปยังใช้ระเบียบวิธีพื้นผิวตอบสนอง (RSM) เพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยการอบแห้งและหาสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับโพนเนื้อมะม่วงด้วยปัจจัยการอบแห้งสองประการ คือ อุณหภูมิการอบแห้ง และกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟ ผลการตอบสนองของปัจจัยเหล่านี้ ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายที่มีประสิทธิภาพ (D_{eff}) การใช้พลังงานจำเพาะ (SEC) และความแตกต่างของสี (ΔE) แสดงอยู่ในตาราง 7

ตาราง 7 ปัจจัยการอบแห้งและผลตอบสนอง

Factors		Responses		
MW	T	D_{eff}	SEC	ΔE
300	55	5.41	13.14	3.73
300	65	6.21	17.21	4.14
300	75	6.99	18.99	4.37
450	55	10.54	8.96	4.34
450	65	12.47	11.82	4.44
450	75	12.63	12.28	6.78
600	55	15.03	5.83	6.89
600	65	16.19	8.42	7.37
600	75	18.43	8.95	7.94

ตาราง 7 แสดงค่าผลตอบสนองที่สภาวะการอบแห้งแตกต่างกัน โดยที่ MW คือ กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟ (วัตต์) T คือ อุณหภูมิลมร้อน (องศาเซลเซียส) D_{eff} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล ($\times 10^{-6}$ ตารางเมตรต่อวินาที) SEC คือ ค่าการใช้พลังงานจำเพาะ (กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อกิโลกรัม) และ ΔE คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงสี

ตาราง 7 แสดงให้เห็นว่าค่า D_{eff} เพิ่มขึ้นตามสภาวะการอบแห้งที่ใช้กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟสูงขึ้นในทุกอุณหภูมิลมร้อนที่ทดสอบ ซึ่งบ่งชี้ถึงการกำจัดความชื้นที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีพลังงานไมโครเวฟสูงขึ้น ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 55 องศาเซลเซียส ค่า D_{eff} เพิ่มขึ้นจาก 5.41×10^{-6} ตารางเมตรต่อวินาที (ที่กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟ 300 วัตต์) เป็น 15.03×10^{-6} ตารางเมตรต่อวินาที (ที่กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟ 600 วัตต์) ค่า D_{eff} ที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีพลังงานไมโครเวฟสูงขึ้นนั้นมาจากปริมาณพลังงานไมโครเวฟที่มากขึ้นซึ่งดูดซับโดยตัวอย่างโพม ทำให้ความชื้นแพร่กระจายจากด้านในไปยังพื้นผิวของโพมเร็วขึ้น ผลการทดลองดังกล่าวนี้ได้รับการยืนยันจากผลการศึกษาโดย Yüksel และ Pandiselvam [80] ซึ่งระบุว่ากำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าการแพร่ความชื้นของโพมคิเฟอร์มีประสิทธิภาพมากขึ้น ผลการทดลองที่คล้ายกันนี้พบในเทคนิคการอบแห้งด้วยไมโครเวฟอื่น ๆ และวัสดุอาหารต่าง ๆ ตัวอย่างเช่น การอบแห้งด้วยลมร้อนแบบพาความร้อนสำหรับขึ้นแอปเปิล [85] และการอบแห้งด้วยไมโครเวฟแบบใช้เครื่องดูดสูญญากาศสำหรับส้มโอ [86] อย่างไรก็ตาม อิทธิพลของอุณหภูมิลมร้อนต่อค่า D_{eff} นั้นน้อยกว่ากำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟ

ในทางกลับกัน ค่า SEC ลดลงอย่างมากเมื่อพลังงานไมโครเวฟเพิ่มขึ้น ซึ่งหมายความว่า การใช้การตั้งค่าพลังงานที่สูงขึ้นจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน ตัวอย่างเช่น ที่สภาวะการอบแห้งด้วยอุณหภูมิลมร้อน 55 องศาเซลเซียส ค่า SEC ลดลงจาก 5.83 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อกิโลกรัม ที่ระดับกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟ 600 วัตต์ เป็น 13.14 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อกิโลกรัม ระดับกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟ 300 วัตต์

ในส่วนของความแตกต่างของสี (ΔE) พบแนวโน้มเชิงบวกเมื่อใช้กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟที่สูงขึ้น โดยเฉพาะที่ 600 วัตต์ ซึ่งมีสาเหตุเกิดจากการกระจายความร้อนที่ไม่สม่ำเสมอและ

เกิดความร้อนสูงเกินไปดังที่ได้อธิบายไว้ก่อนหน้านี้ การเปลี่ยนแปลงสีนี้อาจเชื่อมโยงกับการเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลแบบไม่ใช้เอนไซม์หรือแม้แต่การไหม้เกรียมของผลิตภัณฑ์ ซึ่งเห็นได้จากจุดไหม้ที่แสดงในรูป 8 ข้อสังเกตเหล่านี้สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Taşova et al. [87], Kumar et al. [88] และ Jiang et al. [89] ซึ่งบ่งชี้ว่าแม้ว่าประสิทธิภาพในการอบแห้งจะดีขึ้นและการใช้พลังงานจะลดลงเมื่อใช้ไมโครเวฟกำลังสูง แต่จำเป็นต้องคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงสีเพื่อรักษาลักษณะปรากฏของผลิตภัณฑ์เอาไว้

ตาราง 8 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของแบบจำลองสหสัมพันธ์ของผลตอบสนอง

Source	Estimate coefficients		
	D_e	SEC	ΔE
Model (p value)	0.001 ^b	0.0006 ^b	0.0542 ^{ns}
Intercept			
(a_0)	11.96	11.77	4.95 ^b
Linear terms			
(a_1) MW	5.17 ^b	-4.36 ^b	1.66 ^{ns}
(a_2) T	1.18 ^a	2.05 ^b	0.69 ^{ns}
Interaction terms			
(a_{12}) (MW*T)	0.45 ^{ns}	-0.68 ^a	0.10 ^{ns}
Quadratic terms			
(a_{11}) MW ²	-0.50 ^{ns}	1.07 ^a	0.55 ^{ns}
(a_{22}) T ²	-0.12 ^{ns}	-1.12 ^a	0.36 ^{ns}
F value			
Model	137.70	189.09	8.49
MW	649.29	738.80	34.58
T	33.69	163.31	5.95
MW*T	3.35	12.09	0.088
MW ²	2.05	14.85	1.28
T ²	0.11	16.42	0.54
R ²	0.9957	0.9968	0.9340
Adjusted R ²	0.9884	0.9916	0.8239
Predicted R ²	0.9634	0.9616	0.3220
Adequate Precision	31.28	39.96	8.32
C.V. (%)	4.31	3.35	12.45
Std. Dev.	0.50	0.39	0.69

ในตาราง 8 แสดงผลการวิเคราะห์ ANOVA สำหรับสมการสหสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยการอบแห้งกับผลตอบสนอง นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นการตรวจสอบความถูกต้องทางสถิติของแบบจำลองเพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์การอบแห้งและผลตอบสนอง จากตาราง 8 พบว่า สมการความสัมพันธ์ของ D_{eff} ที่มีค่า F เท่ากับ 137.70 และค่า $p < 0.05$ แสดงให้เห็นว่าสมการดังกล่าวมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เมื่อพิจารณาตัวแปรเดี่ยวทั้งหมด (T และ MW) จะเห็นได้ว่าตัวแปรเดี่ยวทั้งหมดมีความสัมพันธ์กับผลตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่เทอมของปฏิสัมพันธ์ ($T \times MW$) และเทอมกำลังสอง (T^2 และ MW^2) ไม่มีความสัมพันธ์กับผลตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ จากตาราง 8 ยังพบว่า ค่า R^2 ที่ทำนายได้ (0.9634) กับและค่า R^2 ที่ปรับแล้ว (0.9884) มีค่าใกล้เคียงกัน และค่าความแม่นยำที่เพียงพอ (Adequate precision) มีค่าเท่ากับ 31.28 ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์ที่ต้องการคือ 4 แสดงให้เห็นว่าสมการความสัมพันธ์ของ D_{eff} สามารถนำไปใช้ในการทำนายความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยการอบแห้งทั้งสองปัจจัยกับผลตอบสนอง D_{eff} ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อพิจารณาอิทธิพลของปัจจัยการอบแห้งต่อค่า D_{eff} พบว่าปัจจัยของกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟมีอิทธิพลว่าอุณหภูมิลมร้อน ซึ่งพิจารณาจากค่า F เท่ากับ 649.29 และ 33.69 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาจากค่า SEC ดังแสดงในตาราง 8 พบว่า สมการสหสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยการอบแห้งและค่าผลตอบสนอง SEC มีความสัมพันธ์แบบกำลังสองอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99 ($p < 0.01$) และค่า F เท่ากับ 189.09 นอกจากนี้เทอมของแบบจำลองทั้งหมดมีความสัมพันธ์กับค่า SEC อย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่า R^2 ที่ทำนายได้และที่ได้จากปรับค่าแล้วมีค่าใกล้เคียงกัน และมีค่าความแม่นยำที่เพียงพอเท่ากับ 39.96 เมื่อพิจารณาค่า F จะเห็นได้ว่าปัจจัยของกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟที่มีค่า F เท่ากับ 738.80 ส่งผลต่อค่า SEC มากกว่าปัจจัยของอุณหภูมิลมร้อนที่มีค่า F เพียง 163.31

นอกจากนี้ ตาราง 8 แสดงให้เห็นว่าสมการความสัมพันธ์ของปัจจัยการอบแห้งทั้งสองกับการเปลี่ยนแปลงของสี (ΔE) ไม่มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ถึงแม้ว่าค่า R^2 จะมีค่าสูงถึง 0.93 แต่ค่า R^2 ที่ทำนายได้และที่ได้จากปรับค่าแล้วกลับมีค่าที่แตกต่างกันมาก แสดงให้เห็นว่าการสร้างสมการสหสัมพันธ์มีปัญหาในการปรับค่ามากเกินไป อย่างไรก็ตามความน่าเชื่อถือของแบบจำลองสามารถยืนยันได้ด้วยค่าความแม่นยำที่เพียงพอเท่ากับ 8.32 ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์ที่ต้องการคือ 4 เมื่อพิจารณาค่า F จะเห็นได้ว่าปัจจัยของกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟที่มีค่า F เท่ากับ 34.58 ส่งผลต่อค่า ΔE มากกว่าปัจจัยของอุณหภูมิลมร้อนที่มีค่า F เพียง 5.95 จากการสรุปข้อมูลที่นำเสนอในตาราง 8 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองกำลังสองสามารถใช้เป็นเครื่องมือในการนำทางการออกแบบและการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการได้อย่างเพียงพอ

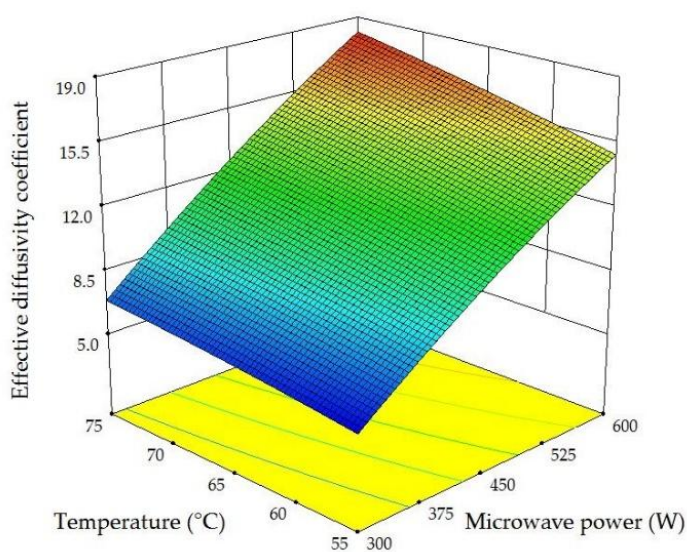
การวิเคราะห์หาสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมโดยใช้ระเบียบวิธีพื้นผิวการตอบสนองให้ผลลัพธ์เป็นสมการสหสัมพันธ์กำลังสองที่อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยการอบแห้งและผลตอบสนองได้อย่างมีประสิทธิภาพ แบบจำลองต่าง ๆ นำเสนอต่อไปนี้

$$D_{eff} = -11.88 + 0.035(MW) + 0.135(T) + 3.03 \times 10^{-4}(MW)(T) - 2.24 \times 10^{-5}(MW)^2 - 0.0012(T)^2$$

$$SEC = -39.68 - 0.042(MW) + 1.87(T) - 4.55 \times 10^{-4}(MW)(T) + 4.76 \times 10^{-5}(MW)^2 - 0.0112(T)^2$$

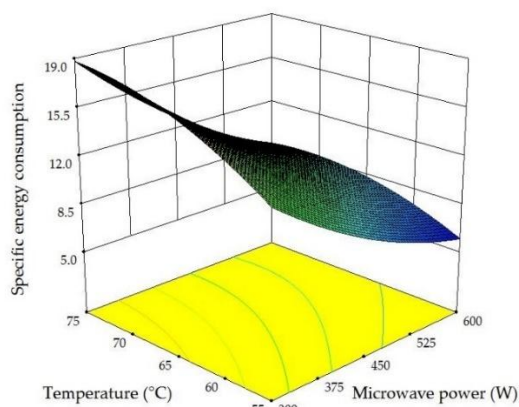
$$\Delta E = 17.61 - 0.016(MW) - 0.428(T) + 6.83 \times 10^{-5}(MW)(T) + 2.46 \times 10^{-5}(MW)^2 + 0.0036(T)^2$$

จากการใช้สมการสหพันธ์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยการอบแห้งและผลตอบสนองทั้งหมด สามารถแสดงในรูปกราฟ 3 มิติ เพื่อแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ต่อผลตอบสนองได้ ดังแสดงในรูป 9-11



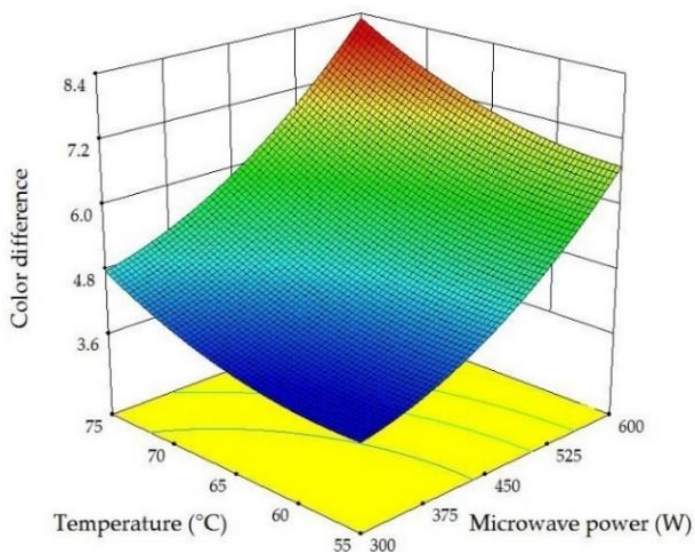
ภาพประกอบ 9 กราฟ 3 มิติแสดงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (D_{eff}) ที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิอบแห้งและกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟ

รูป 9 แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่ากำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟมีอิทธิพลเชิงบวกต่อค่า D_{eff} โดยแสดงให้เห็นว่าความชื้นเคลื่อนตัวเร็วขึ้นจากภายในวัสดุที่เป็นโพรไปยังพื้นผิวของวัสดุที่ระดับไมโครเวฟที่สูงขึ้น ประสิทธิภาพการอบแห้งที่เพิ่มขึ้นนี้เกิดจากความร้อนภายในที่เพิ่มขึ้นในเนื้อมะม่วงที่เป็นโพรพร้อมกับพลังงานไมโครเวฟที่เพิ่มขึ้น ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Poogungploy et al. [63], Jiang et al. [82] และ Kumar et al. [81] อย่างไรก็ตาม ควรคำนึงถึงการปรับการตั้งค่าไมโครเวฟให้เหมาะสม เนื่องจากพลังงานส่วนเกินอาจทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ลดลง Raj และ Dash [76] แนะนำว่าพลังงานที่ลดลงหรือเป็นระยะ ๆ อาจช่วยปรับสมดุลประสิทธิภาพการอบแห้งในขณะที่หลีกเลี่ยงความร้อนเกินไป ส่งผลให้คุณภาพมีแนวโน้มที่ดี อย่างไรก็ตาม ตามที่แสดงในรูป 9 อุณหภูมิของอากาศร้อนส่งผลต่อค่า D_{eff} เล็กน้อย เนื่องจากอุณหภูมิจะค่อย ๆ สูงขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น คำอธิบายของแนวโน้มเชิงบวกนี้อธิบายได้จากบทบาทของพลังงานความร้อนที่สูงขึ้นในการเร่งการเคลื่อนตัวของความชื้น [88, 90, 91]



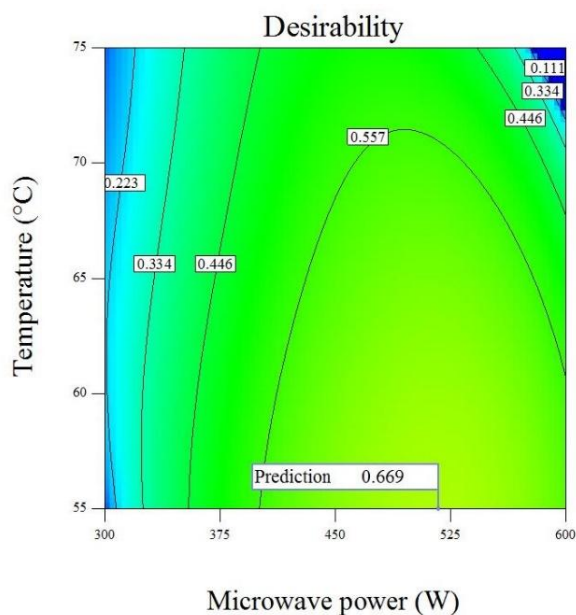
ภาพประกอบ 10 กราฟ 3 มิติแสดงค่าการใช้พลังงานจำเพาะ (SEC) ที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิอบแห้ง และกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟ

รูป 10 แสดงกราฟ 3 มิติของค่า SEC ในปัจจัยการอบแห้งของกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟและอุณหภูมิลมร้อน พบว่า กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟส่งผลต่อค่า SEC อย่างมาก ดังจะเห็นได้จากกราฟที่ชัน ค่า SEC จะลดลงเมื่อระดับไมโครเวฟสูงขึ้น ค่า SEC ต่ำสุดพบที่สภาวะอบแห้งด้วยอุณหภูมิลมร้อน 55 องศาเซลเซียส ร่วมกับกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟที่ 600 วัตต์ ซึ่งบ่งชี้ว่าการอบแห้งที่สภาวะนี้มีประสิทธิภาพด้านพลังงานสูงสุด ผลการทดลองดังกล่าวนี้สามารถอธิบายได้จากพลังงานแม่เหล็กที่ถูกดูดซับโดยวัสดุโพลีที่มีความชื้นมากขึ้นส่งผลให้ระยะเวลาการอบแห้งสั้นลง และส่งผลให้ใช้พลังงานรวมน้อยลง ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Zaki และ Ismail [92] และ Kumar et al. [88] เมื่อพิจารณาผลกระทบของอุณหภูมิลมร้อนแสดงดังรูป 10 พบว่า อิทธิพลของปัจจัยอุณหภูมิลมร้อนต่อค่า SEC เป็นแบบผกผันเช่นเดียวกับกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟ นั่นคือ ค่า SEC มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิลมร้อนเพิ่มขึ้น สรุปได้ว่าพลังงานความร้อนที่สูงขึ้นไม่เพียงส่งผลให้ระยะเวลาการอบแห้งสั้นลงเท่านั้น แต่ยังส่งผลให้ใช้พลังงานน้อยลง [81,84]



ภาพประกอบ 11 กราฟ 3 มิติแสดงค่าการเปลี่ยนแปลงสี (ΔE) ที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิอบแห้งและกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟ

การเปลี่ยนแปลงสี (ΔE) ถือเป็นผลตอบสนองที่สำคัญเช่นกัน ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าพารามิเตอร์การอบแห้งส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์อย่างไร กราฟ 3 มิติในรูป 11 แสดงแนวโน้มผกผันของปัจจัยทั้งหมด พบว่า สีของโพลีเมอร์เม็ดเปลี่ยนไปลงเมื่อได้รับกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟและอุณหภูมิความร้อนที่สูงขึ้น หากใช้พลังงานไมโครเวฟในระดับที่สูงขึ้น ความร้อนภายในที่มากขึ้นอาจส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลที่ไม่ใช่เอนไซม์หรืออาจถึงขั้นไหม้เกรียมอันเกิดจากการให้ความร้อนมากเกินไป การเสื่อมสภาพของสีนี้ยังพบได้ในงานวิจัยของ Zaki et al. [93] และ Taşova et al. [87] นอกจากนี้ Poogungploy et al. [63] รายงานว่า พลังงานไมโครเวฟที่เพิ่มขึ้นจะลดค่าความสว่างของผลิตภัณฑ์ได้อย่างมาก เมื่อใช้ร่วมกับการควบคุมอุณหภูมิที่แม่นยำ [87] หรือวิธีอื่น ๆ เช่น การอบแห้งร่วมกับคลื่นอัลตราโซนิก [91] อาจช่วยแก้ปัญหานี้ให้ดีขึ้นได้ อย่างไรก็ตาม รูป 11 แสดงให้เห็นปัจจัยที่มีอิทธิพลน้อยกว่าเมื่อเทียบกับอุณหภูมิความร้อน ความแตกต่างของสีจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อใช้อุณหภูมิความร้อนสูงขึ้น อาจเกิดจากปฏิกิริยา Maillard หรือการทำให้เป็นคาราเมลที่เกิดจากพลังงานความร้อนที่สูงขึ้น [81,82] Biswas et al. [94] และ Sarpong et al. [95] อธิบายว่าผลไม้ที่มีน้ำตาลสูงมีแนวโน้มที่จะเป็นสีน้ำตาล



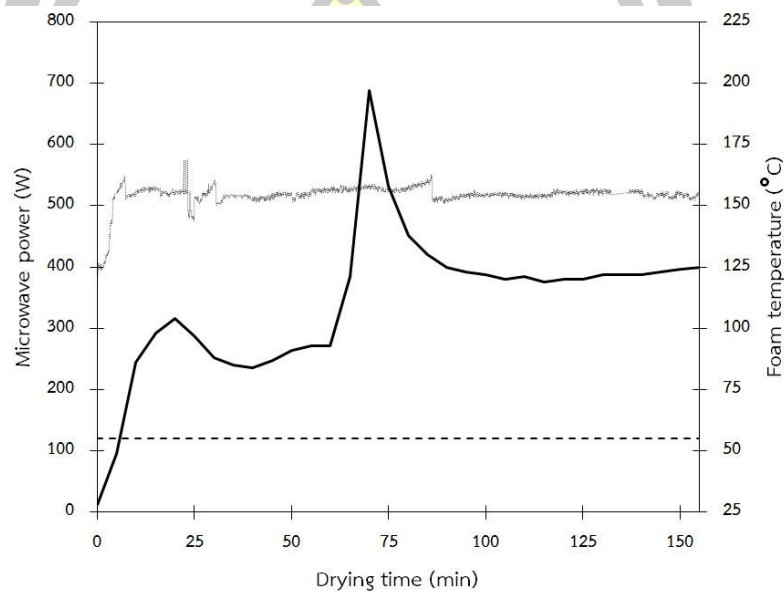
ภาพประกอบ 12 ฟังก์ชันการออกแบบกระบวนการ (Desirability function)

ผลการวิเคราะห์หาสภาวะการอบแห้งแบบโหมแมทร่วมกับไมโครเวฟที่เหมาะสม โดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง พบว่า กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟและอุณหภูมิความร้อนส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (D_{eff}) การใช้พลังงานจำเพาะ (SEC) และความแตกต่างของสี (ΔE) ในรูปแบบต่าง ๆ จากรูป 12 ซึ่งแสดงกราฟค่าการออกแบบกระบวนการ (Desirability) พบว่า สภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมที่สุดโดยพิจารณาตามเกณฑ์ของค่า D_{eff} สูงสุด และค่า SEC และ ΔE ต่ำสุด ซึ่งสอดคล้องกับค่า Desirability สูงสุดที่ 0.669 คือ การอบแห้งโหมแมทที่มีความหนาภายใต้ อุณหภูมิความร้อน 55 องศาเซลเซียส ร่วมกับกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟ 520 วัตต์

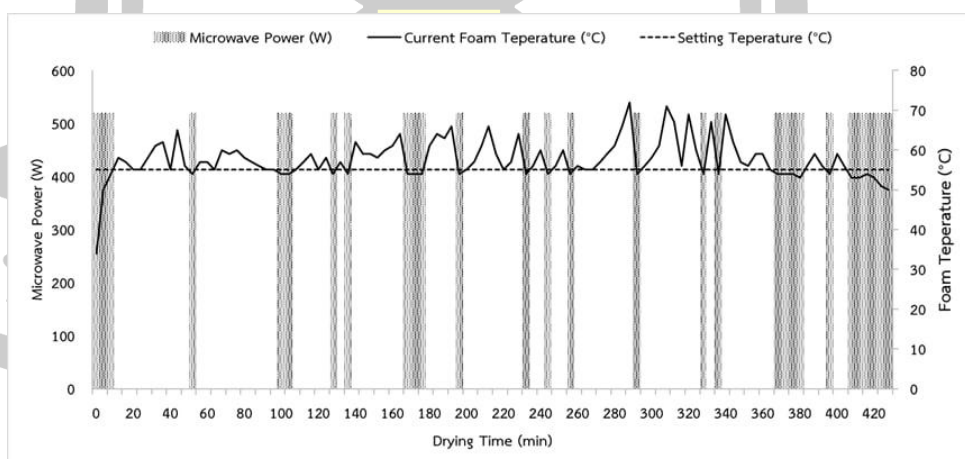
4.2 ผลของการควบคุมอุณหภูมิของวัสดุและกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟในระหว่างกระบวนการอบแห้งแบบโหมแมทร่วมกับไมโครเวฟแบบขั้นตอน

ในหัวข้อที่ 4.1 พบว่า เงื่อนไขสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับอบแห้งโหมแมทคือ การใช้อุณหภูมิต่ำกว่า 55 องศาเซลเซียส ร่วมกับการให้ความร้อนเสริมด้วยไมโครเวฟที่ กำลังวัตต์เท่ากับ 520 วัตต์ อย่างไรก็ตาม สภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมดังกล่าวคำนึงถึงประสิทธิภาพการอบแห้งเท่านั้น ซึ่งการใช้กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟอยู่ที่ 520 วัตต์ ตลอดระยะเวลาการอบแห้งส่งผลให้เกิดอุณหภูมิตัวอย่างที่สูงเกินไปหรือเกิดการไหม้ของวัสดุ จากรูป 13 จะเห็นได้ว่า อุณหภูมิสูงสุดของโหมแมทมีค่าสูงถึง 200 องศาเซลเซียส ที่เวลาอบแห้งประมาณ 75 นาที และหลังจากนั้นก็มียุณหภูมิลดลงมาที่ระดับ 125 องศาเซลเซียส ตลอดจนถึงสิ้นสุดกระบวนการอบแห้ง การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิโหมแมทในระหว่างกระบวนการอบแห้งสามารถอธิบายได้ดังนี้ เนื่องจากในช่วงสุดท้ายของการอบแห้ง น้ำหนักของวัสดุลดลงอย่างมากจากการระเหยของน้ำ ทำให้

ความเข้มข้นของกำลังวัตต์ (วัตต์ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนัก) มีค่ามากขึ้น ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงนำระดับอุณหภูมิ และกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟที่เหมาะสมมาใช้เป็นสภาวะเริ่มต้นสำหรับการควบคุมอุณหภูมิของตัวอย่าง (55 องศาเซลเซียส) และทำการปรับกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟอย่างต่อเนื่อง ระหว่างการอบแห้งเพื่อควบคุมอุณหภูมิของวัสดุ สำหรับการควบคุมอุณหภูมิของโฟมมะม่วงนั้นได้ให้ความร้อนเสริมด้วยไมโครเวฟแบบขั้นตอนที่แตกต่างกัน ได้แก่ 520/0 520/100 520/200 และ 520/300 วัตต์ ดังแสดงในรูป 14 - 17

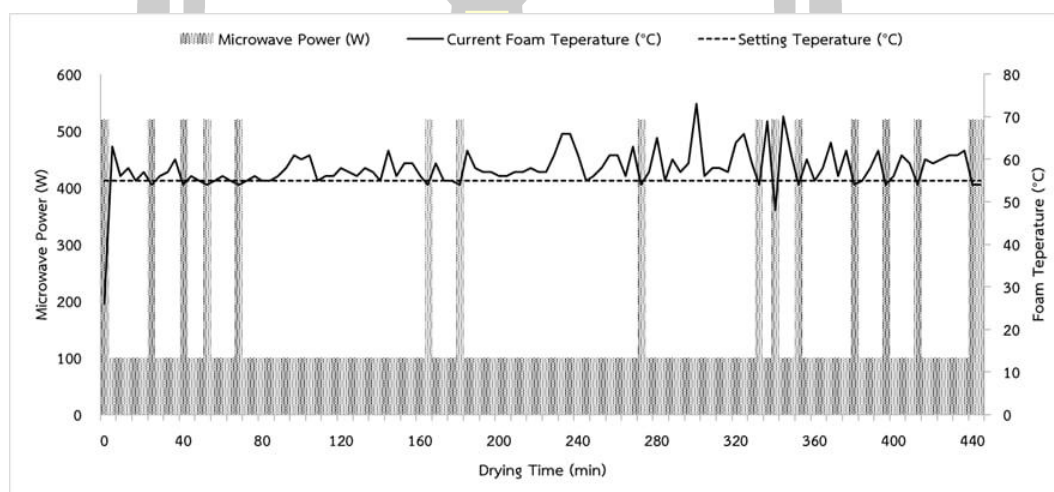


ภาพประกอบ 13 กราฟแสดงกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟและอุณหภูมิที่สภาวะการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟคงที่เท่ากับ 520 วัตต์



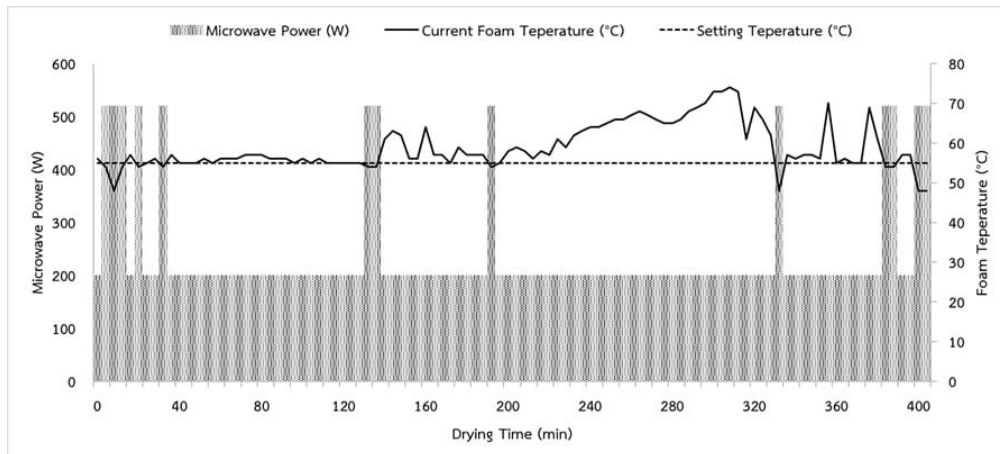
ภาพประกอบ 14 กราฟแสดงกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟและอุณหภูมิที่สภาวะการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟแบบ 520/0 วัตต์

รูป 14 แสดงกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟค่าสูง (520 วัตต์) และกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟค่าต่ำ (0 วัตต์) ที่ใช้ในระหว่างกระบวนการอบแห้งโฟมมะม่วง โดยควบคุมอุณหภูมิของโฟมมะม่วงเท่ากับ 55 องศาเซลเซียส โดยเส้นทึบหนาแสดงอุณหภูมิของโฟมมะม่วงระหว่างการอบแห้ง เส้นประหนาแสดงอุณหภูมิควบคุมที่ตั้งไว้เท่ากับ 55 องศาเซลเซียส และเส้นประบางแสดงกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟที่ใช้ในกระบวนการ จากรูป 14 พบว่า อุณหภูมิของโฟมมะม่วงอยู่ในช่วงระหว่าง 55 – 65 องศาเซลเซียส โดยในช่วงแรกของการอบแห้งค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของโฟมและอุณหภูมิควบคุมมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อระยะเวลาอบแห้งผ่านไปในระยะสุดท้าย ค่าความแตกต่างมีค่ามากขึ้น สามารถอธิบายได้ว่าในช่วงสุดท้ายของการอบแห้ง โฟมมะม่วงมีน้ำหนักลดลง เนื่องจากการระเหยของน้ำ จึงทำให้เกิดความชื้นของคลื่นไมโครเวฟมากขึ้น ส่งผลให้อัตราการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นในขณะที่อัตราการลดอุณหภูมิลงเมื่อใช้กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟค่าต่ำมีอัตราที่ต่ำกว่า



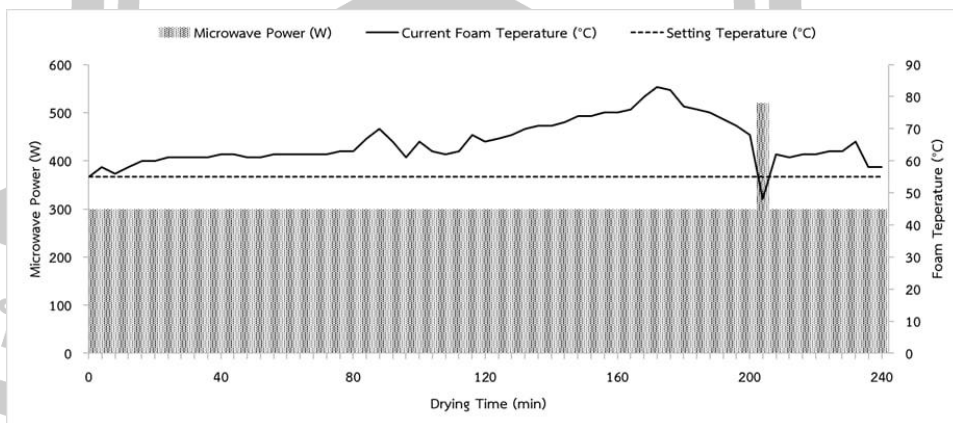
ภาพประกอบ 15 กราฟแสดงกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟและอุณหภูมิที่สภาวะการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟแบบ 520/100 วัตต์

รูป 15 แสดงอุณหภูมิของโฟมมะม่วงภายใต้สภาวะการอบแห้งโดยให้ความร้อนเสริมด้วยไมโครเวฟแบบขั้นตอน 520/100 วัตต์ นั่นคือ ใช้กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟค่าสูงเท่ากับ 520 วัตต์ และกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟค่าต่ำเท่ากับ 100 วัตต์ เพื่อควบคุมอุณหภูมิของโฟมมะม่วงให้มีค่าเท่ากับ 55 องศาเซลเซียส จากรูป 15 พบว่า อุณหภูมิของโฟมมะม่วงมีการแกว่งอยู่ในช่วง 55 – 75 องศาเซลเซียส เช่นเดียวกันกับการใช้โหมดให้ความร้อนแบบ 520/0 วัตต์ ดังแสดงในรูป 14 ในช่วงแรกของการอบแห้งมีการแกว่งของอุณหภูมิที่ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิจริงและอุณหภูมิที่ตั้งไว้ต่ำกว่าช่วงสุดท้ายของการอบแห้ง แต่อย่างไรก็ตามการใช้กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟค่าต่ำในโหมดการให้ความร้อนนี้ พบว่า ที่กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟ 100 วัตต์ ยังมีการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟอยู่ ดังนั้นจึงทำให้การแกว่งของอุณหภูมิมิค่าสูงกว่าการใช้โหมด 520/0 วัตต์



ภาพประกอบ 16 กราฟแสดงกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟและอุณหภูมิที่สภาวะการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟแบบ 520/200 วัตต์

รูป 16 แสดงอุณหภูมิของโฟมมะม่วงในระหว่างการอบแห้งโดยใช้การให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟแบบขั้นตอน 520/200 วัตต์ พบว่า อุณหภูมิของโฟมมะม่วงมีค่าอยู่ในช่วง 55 ถึง 75 องศาเซลเซียส โดยมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่ตั้งไว้ในช่วงแรกของการอบแห้ง ในขณะที่ช่วงตั้งแต่ 200 นาที เป็นต้นไป กลับพบว่าอุณหภูมิมีค่าสูงขึ้นเรื่อย ๆ โดยไม่มีการย้อนกลับมาที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส ผลการทดลองดังกล่าวนี้สามารถอธิบายได้ว่า การใช้กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ต่ำกว่า 200 วัตต์ ในช่วงท้ายของการอบแห้ง เมื่ออุณหภูมิของโฟมมะม่วงมีค่าสูงกว่าค่าที่ตั้งไว้ (55 องศาเซลเซียส) ความเข้มของคลื่นไมโครเวฟมีค่าสูงขึ้นจนไม่สามารถลดอุณหภูมิลงได้ จึงทำให้อุณหภูมิในช่วงนี้สูงขึ้นจนมีค่าสูงสุดที่ประมาณ 75 องศาเซลเซียส



ภาพประกอบ 17 กราฟแสดงกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟและอุณหภูมิที่สภาวะการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟแบบ 520/300 วัตต์

รูป 17 แสดงอุณหภูมิของโฟมมะม่วงระหว่างการอบแห้งโดยใช้ความร้อนเสริมจากไมโครเวฟแบบขั้นตอน ที่สภาวะการให้ความร้อนนี้ใช้กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 520 วัตต์ สลับกับ 300 วัตต์

เพื่อควบคุมอุณหภูมิของโพนัมะม่วงให้มีค่าเท่ากับ 55 องศาเซลเซียส จากรูป 17 พบว่า อุณหภูมิของโพนัมะม่วงมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 60 ถึง 85 องศาเซลเซียส โดยมีค่าสูงกว่าค่าที่ตั้งไว้ตลอดระยะเวลาการอบแห้ง สามารถอธิบายได้ว่าการใช้กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟค่าต่ำที่ 300 วัตต์ เมื่ออุณหภูมิมีค่าสูงกว่า 55 องศาเซลเซียส ไม่สามารถลดอุณหภูมิของโพนัมะม่วงลงได้ เนื่องจากค่าพลังงานคลื่นไมโครเวฟที่ระดับ 300 วัตต์ มีค่ามากพอที่จะทำให้วัสดุเกิดความร้อนจนมีอุณหภูมิสูงกว่า 55 องศาเซลเซียส ดังนั้น จึงสามารถสรุปได้ว่าการใช้โหมดการให้ความร้อนแบบขั้นตอนที่ กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟค่าต่ำเท่ากับ 300 วัตต์ ไม่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้เพื่อควบคุมอุณหภูมิของโพนัมะม่วงที่ 55 องศาเซลเซียส

ตาราง 9 แสดงคุณสมบัติทางเคมีกายภาพ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล ค่าความผิดพลาดของอุณหภูมิ และค่าการใช้พลังงานที่สภาวะการทดลองแบบขั้นตอนที่แตกต่างกัน พบว่า ค่าความชื้นสุดท้ายของโพนัมะม่วงอบแห้งที่ได้มีค่าตามเป้าหมายที่ตั้งไว้ คือ ประมาณร้อยละ 7 และค่าความชื้นของโพนัมะม่วงอบแห้งที่ผ่านสภาวะการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟที่แตกต่างกันมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าปริมาณน้ำอิสระมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเช่นเดียวกันโดยมีค่าอยู่ระหว่าง 0.253 – 0.268 ซึ่งอยู่ในระดับที่ปลอดภัยในการเก็บรักษา (<0.6)

ในกรณีที่ความเข้มของคลื่นไมโครเวฟมีค่ามากเกินไปโดยเฉพาะในช่วงสุดท้ายของการอบแห้ง อุณหภูมิของโพนัมะม่วงมีค่าสูงมากหรืออาจเกิดการไหม้ ซึ่งทำให้เกิดสีน้ำตาลของวัสดุ ดังนั้น การศึกษานี้ใช้ค่าดัชนีสีน้ำตาล (Browning index; BI) เพื่อแสดงผลกระทบที่เกิดจากการใช้ไมโครเวฟที่แตกต่างกัน จากตาราง 9 พบว่า ค่าดัชนี BI มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อใช้โหมดการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟที่แตกต่างกัน โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 29.27 ถึง 39.74 ที่สภาวะ 520/0 วัตต์ มีค่า BI ต่ำสุด ในขณะที่สภาวะการให้ความร้อนแบบ 520/300 วัตต์ ค่า BI มีค่ามากที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อใช้กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟค่าต่ำที่มากขึ้นจาก 0 วัตต์ ถึง 300 วัตต์ ค่า BI มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

ประสิทธิภาพการอบแห้งโดยใช้โหมดการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟแบบขั้นตอนที่แตกต่างกัน แสดงในรูปแบบของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (Effective diffusivity coefficient; D_e) และค่าการใช้พลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption; SEC) จากตาราง 9 พบว่า ค่า D_e มีค่าแตกต่างกันเมื่อใช้โหมดการให้ความร้อนแบบขั้นตอนที่แตกต่างกันโดยมีค่าอยู่ระหว่าง 1.94×10^{-6} ถึง 3.45×10^{-6} ตารางเมตรต่อวินาที เมื่อใช้กำลังวัตต์ค่าต่ำเพิ่มขึ้นค่า D_e มีค่าสูงขึ้น นั่นคือ ประสิทธิภาพการแพร่ของน้ำจากภายในไปยังพื้นผิวของโพนัมะม่วงมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟค่าต่ำเพิ่มขึ้น ยกตัวอย่างเช่น การเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟจาก 520 วัตต์ เป็น 300 วัตต์ ที่กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟต่ำเท่ากับ 300 วัตต์ โพนัมะม่วงยังคงดูดซับคลื่นไมโครเวฟและให้ความร้อนกับวัสดุอยู่ ในขณะที่การใช้กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟต่ำที่มีค่าต่ำกว่า (ที่ 100 หรือ 200 วัตต์) อัตราการให้ความร้อนเชิงปริมาตรและการระเหยของน้ำที่เกิดจากคลื่นไมโครเวฟมีค่าต่ำกว่าหรือมีหยุดการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟที่ 0 วัตต์ จึงทำให้ค่า D_e มีค่าต่ำกว่า นอกจากค่า D_e แล้ว ตาราง 9 ยังแสดงค่าประสิทธิภาพการใช้พลังงาน (SEC) ซึ่งบ่งบอกถึงค่าการใช้พลังงาน (เมกะจูล) ที่ทำให้ปริมาณน้ำในโพนัมะม่วง 1 กิโลกรัม ระเหยออกไป จากตาราง 9

พบว่า ค่า SEC มีค่าแตกต่างกันเมื่อใช้โหมดการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟแบบขั้นตอนที่แตกต่างกัน โดยมีค่าอยู่ 108.94 ถึง 160.05 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ที่โหมดการให้ความร้อนแบบ 520/300 วัตต์ ใช้พลังงานรวมในการระเหยน้ำในโพนัมะม่วง 1 กิโลกรัม น้อยที่สุด ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยที่สภาวะการให้ความร้อนที่ก่ำงไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟสูงเท่ากับ 520 วัตต์ สลับกับการใช้ก่ำงไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟต่ำเท่ากับ 300 วัตต์ ใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่าสภาวะอื่น ๆ ที่ทำการศึกษา

ตาราง 9 คุณสมบัติทางเคมีกายภาพ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล ค่าความผิดพลาดของอุณหภูมิ และค่าการใช้พลังงานที่สภาวะการทดลองแบบขั้นตอนที่แตกต่างกัน

	สภาวะการทดลอง			
	520/0 W	520/100 W	520/200 W	520/300 W
MC (%wb) ^{ns}	7.87±0.94	7.41±0.44	7.64±0.59	7.73±0.70
a _w ^{ns}	0.256±0.019	0.268±0.019	0.253±0.022	0.258±0.011
ค่าดัชนีสีน้ำตาล	29.27±1.11 ^c	32.16±1.09 ^b	33.07±0.46 ^b	39.74±0.37 ^a
D _e (×10 ⁻⁶ m ² /s)	1.96±0.17 ^c	1.94±0.22 ^c	2.51±0.21 ^b	3.45±0.25 ^a
SEC (MJ/kg)	122.79±6.74 ^{ab}	160.05±23.52 ^a	140.92±32.82 ^{ab}	108.94±24.55 ^b
ค่าความผิดพลาดของอุณหภูมิ (RMSE)	5.19±0.20 ^d	6.06±0.45 ^c	7.30±0.06 ^b	13.36±0.10 ^a

เนื่องจากการศึกษานี้ใช้โหมดการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟเป็นแบบขั้นตอนที่ใช้ค่าก่ำงไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟสูง (520 วัตต์) และใช้ค่าก่ำงไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟต่ำ (0-300 วัตต์) เพื่อควบคุมอุณหภูมิของโพนัมะม่วงให้อยู่ในระดับที่ต้องการ คือ 55 องศาเซลเซียส จึงทำให้อุณหภูมิของโพนัมะม่วงมีความคลาดเคลื่อนจากค่าที่ตั้งไว้ ตาราง 9 แสดงค่าความผิดพลาดของอุณหภูมิซึ่งแสดงในรูปแบบของค่า RMSE เพื่อหาสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมที่ทำให้ค่าความผิดพลาดของอุณหภูมิต่ำที่สุด พบว่า ค่า RMSE มีค่าอยู่ระหว่าง 5.19 ถึง 13.36 โดยมีค่าต่ำสุดที่โหมดการให้ความร้อนแบบ 520/0 วัตต์ ในขณะที่มีค่า RMSE สูงสุดเมื่อใช้โหมดการให้ความร้อนแบบ 520/300 วัตต์ เมื่อพิจารณาผลของการใช้โหมดการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟแบบขั้นตอนที่แตกต่างกัน พบว่า ค่า RMSE มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ นั่นหมายความว่า การใช้ก่ำงไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟค่าต่ำที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิมากขึ้น จากตาราง 9 สามารถสรุปได้ว่า สภาวะการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟที่เหมาะสมเมื่อพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิโพนัมะม่วงในระหว่างการอบแห้ง คือ การใช้ก่ำงไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟค่าสูงเท่ากับ 520 วัตต์ และก่ำงไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟค่าต่ำเท่ากับ 0 วัตต์ ดังนั้นจึง

นำโหมตการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟแบบ 520/0 วัตต์ ไปใช้เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟกับเวลาการอบแห้งในหัวข้อต่อไป

4.3 ผลของฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟสำหรับควบคุมอุณหภูมิของโพนัมะม่วงระหว่างการอบแห้ง

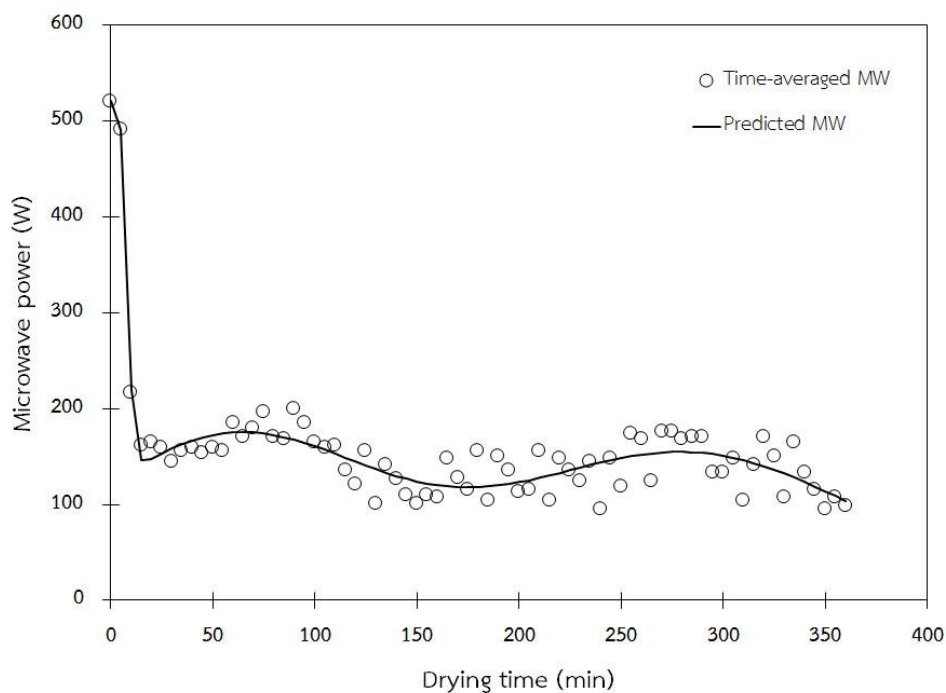
จากการศึกษาการใช้กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟแบบขั้นตอนสำหรับควบคุมอุณหภูมิของโพนัมะม่วงในระหว่างการอบแห้งในหัวข้อที่ผ่านมา พบว่า การใช้กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟค่าสูงที่ 520 วัตต์ และใช้กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟค่าต่ำที่ 0 วัตต์ เป็นโหมตการให้ความร้อนที่เหมาะสมที่สุดเมื่อพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิ (RMSE) ดังนั้น จึงได้นำค่ากำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟที่ใช้ตลอดระยะเวลาการอบแห้งมาความสัมพันธ์กับเวลาอบแห้งเพื่อนำไปประยุกต์ในการควบคุมอุณหภูมิของโพนัมะม่วงโดยไม่ใช้เซนเซอร์วัดอุณหภูมิต่อไป

รูป 18 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าเฉลี่ยของกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟที่ใช้ทุก ๆ 4 นาที (กราฟจุด) และกราฟฟังก์ชัน (กราฟเส้น) ซึ่งได้จากวิธีการเชิงตัวเลขตั้งสมการ 13 จากผลการทดลอง พบว่า กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟมีค่าแปรผันตลอดระยะเวลาการอบแห้ง

$$MW = a_1 e^{-\left(\frac{t+a_2}{a_3}\right)^2} + a_4 e^{-\left(\frac{t+a_5}{a_6}\right)^2} + a_7 e^{-\left(\frac{t+a_8}{a_9}\right)^2} \quad (13)$$

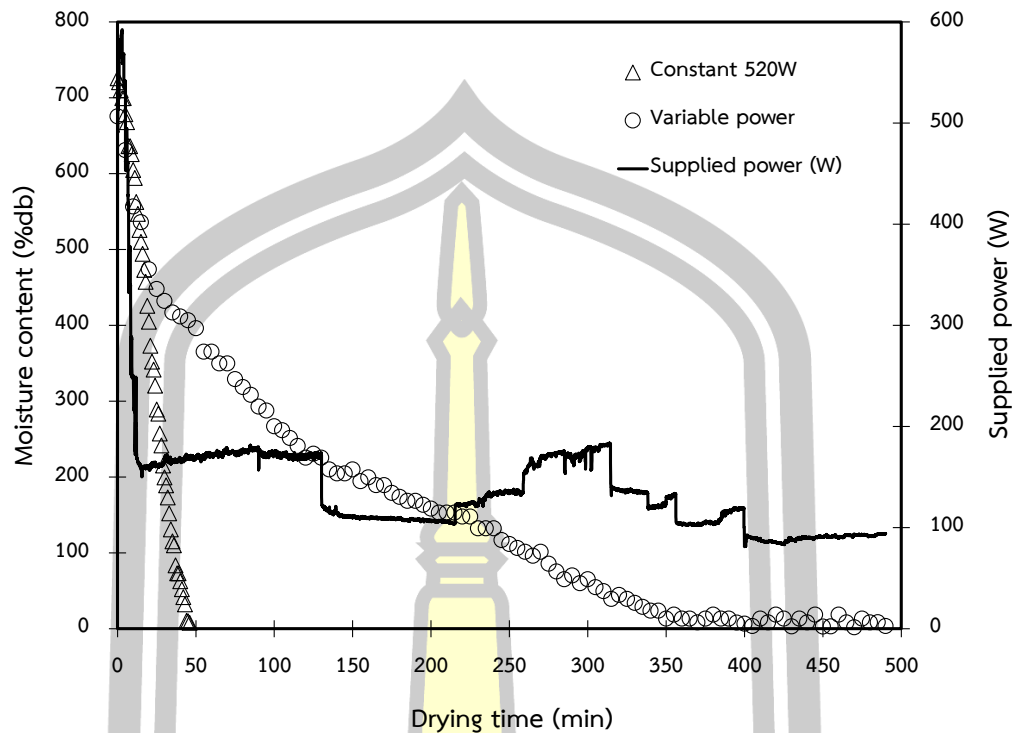
โดยที่ค่าคงที่ $a_1 = 153.625$, $a_2 = -281.528$, $a_3 = 124.515$, $a_4 = 168.875$, $a_5 = -58.550$, $a_6 = 100.298$, $a_7 = 452.226$, $a_8 = -2.143$ และ $a_9 = 6.068$

พูนุ ปณ ทิโต ชีเว



ภาพประกอบ 18 กราฟแสดงกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟที่เป็นฟังก์ชันกับเวลาอบแห้ง

เมื่อนำสมการความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟและเวลาอบแห้งดังสมการ 13 ไปใช้ตั้งค่ากำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟระหว่างการอบแห้ง เพื่อควบคุมอุณหภูมิของโพนัมมะม่วงโดยไม่ใช้เซนเซอร์วัดอุณหภูมิในระหว่างการอบแห้ง จากรูป 19 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบจลนศาสตร์การอบแห้งระหว่างการใช้กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟคงที่ที่ 520 วัตต์ และการใช้กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟแบบแปรผันตามสมการ 13 พบว่า การใช้ฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟในการควบคุมอุณหภูมิของโพนัมมะม่วงใช้เวลานานกว่าการใช้กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟคงที่ 520 วัตต์ ตลอดระยะเวลาอบแห้งถึงเกือบ 10 เท่า ในช่วง 25 นาทีแรก จะเห็นได้ว่าความชื้นของโพนัมมะม่วงลดลงอย่างรวดเร็วจากประมาณร้อยละ 70 ถึง 45 ฐานแห้ง เนื่องจากในช่วง 25 นาทีแรกนี้ใช้กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟที่ค่าสูงประมาณ 200-520 วัตต์ จึงทำให้เกิดความร้อนสูงและอัตราการระเหยน้ำในวัสดุสูง หลังจากช่วงแรกของการอบแห้งนี้ จะเห็นได้ว่าค่ากำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟที่ใช้มีค่าแปรผันอยู่ในช่วงประมาณ 100 ถึง 200 วัตต์ ซึ่งให้อัตราการเกิดความชื้นปริมาตรต่ำกว่าจึงส่งผลให้อัตราการระเหยน้ำและอัตราการลดลงของความชื้นต่ำกว่า ดังนั้นจากผลทดลองในรูป 19 จึงสามารถสรุปได้ว่า ถึงแม้การใช้กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟแบบแปรผันสามารถควบคุมอุณหภูมิโพนัมมะม่วงเพื่อลดการเกิดอุณหภูมิสูงเกินไป หรือเกิดการไหม้ แต่เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการอบแห้งโดยเฉพาะระยะเวลาในการอบแห้งแล้ว การใช้เวลาในการอบแห้งมากเกินไปอาจเป็นปัจจัยที่ไม่เหมาะสมในทางปฏิบัติจริง ดังนั้นการพิจารณาความเหมาะสมของสภาวะการอบแห้งอาจจำเป็นต้องพิจารณาปัจจัยอื่น ๆ ร่วมด้วย เช่น คุณภาพของโพนัมมะม่วงอบแห้งที่ได้ หรือประสิทธิภาพการใช้พลังงาน เป็นต้น



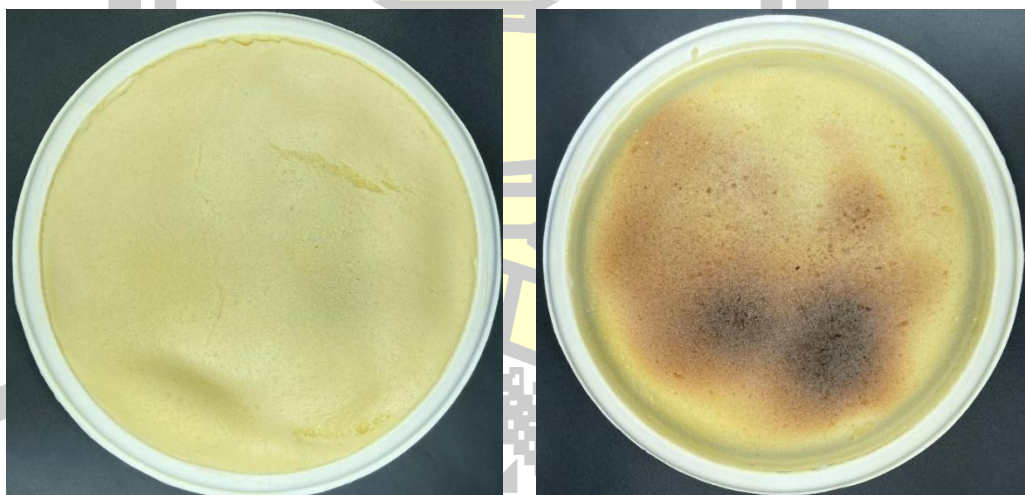
ภาพประกอบ 19 เปรียบเทียบจลนศาสตร์ความชื้นระหว่างการใช้กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟคงที่และการปรับกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟตามอุณหภูมิของวัสดุ

ตาราง 10 เปรียบเทียบคุณสมบัติทางเคมีกายภาพ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล และค่าการใช้พลังงานระหว่างสภาวะการทดลองแบบกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟคงที่และกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟแปรผัน

	สภาวะการทดลอง	
	กำลังวัตต์คงที่ (520W)	กำลังวัตต์แปรผัน
ค่าความชื้น (%wb) ^{ns}	9.83±0.75	9.92±0.21
a _w ^{ns}	0.386±0.001	0.372±0.013
ค่าความผิดพลาดของอุณหภูมิ (RMSE)	64.49±1.96 ^a	7.36±2.43 ^b
ค่าดัชนีน้ำตาล	63.95±0.26 ^a	28.09±0.44 ^b
ความหนาโฟม (มิลลิเมตร) ^{ns}	19.20±1.50	17.80±0.40
เนื้อสัมผัส		
ค่าความแข็ง (นิวตัน) ^{ns}	124.67±34.50	152.18±15.98
ค่าความกรอบ (-)	39.78±5.67 ^b	71.78±8.94 ^a
D _e (×10 ⁻⁶ m ² /s)	12.94±2.47 ^a	1.65±0.16 ^b
SEC (MJ/kg)	87.64±11.59 ^b	251.81±29.41 ^a

ตาราง 10 การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางเคมีกายภาพ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล และค่าการใช้พลังงานระหว่างสภาวะการทดลองแบบกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟคงที่ที่ 520 วัตต์ และกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟแปรผัน จากตาราง 10 พบว่า ค่าความชื้นสุดท้ายและค่า ปริมาณน้ำอิสระของตัวอย่างโพนัมมะม่วงอบแห้งที่ได้จากสภาวะการอบแห้งทั้งสองมีค่าไม่แตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยค่าความชื้นและปริมาณอิสระของโพนัมมะม่วงอบแห้งที่ได้จากการใช้ กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟคงที่มีค่าเท่ากับร้อยละ 9.83 และ 0.386 ฐานแห้ง ตามลำดับ ในขณะที่โพนัมมะม่วงอบแห้งที่ได้จากการใช้กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟแบบแปรผันมีค่าร้อยละ 9.92 และ 0.372 ฐานแห้ง ตามลำดับ

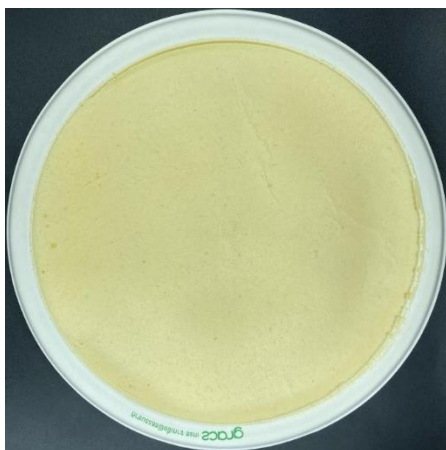
ประสิทธิภาพในการควบคุมอุณหภูมิสามารถพิจารณาได้จากค่าความคลาดเคลื่อน RMSE จากตาราง 10 พบว่า ค่า RMSE ของสภาวะการอบแห้งแบบใช้กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟคงที่มีค่า 64.49 ซึ่งมีค่าสูงกว่าการใช้กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟแบบแปรผันมาก (RMSE = 7.36) ซึ่งสามารถอธิบายได้จากค่าความเข้มไมโครเวฟมีค่าเพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลาการอบแห้งจึงทำให้ อุณหภูมิมีค่าสูงเกินไปหรืออาจเกิดการไหม้ของเนื้อโพนัมมะม่วง ดังแสดงได้จากค่าดัชนีสีน้ำตาล (BI) ในตาราง 10 พบว่า ค่า BI ของโพนัมมะม่วงอบแห้งที่ได้จากการใช้กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟ คงที่มีค่าสูงกว่าการใช้กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟแบบแปรผันอย่างมีนัยสำคัญ ค่า BI ที่มากกว่า นี้เกิดจากสาเหตุของอุณหภูมิวัสดุที่สูงเกินไป ซึ่งอาจทำให้เกิดสีน้ำตาลจากความร้อนหรือเกิดการไหม้ ของโพนัมมะม่วงดังแสดงในรูป 20



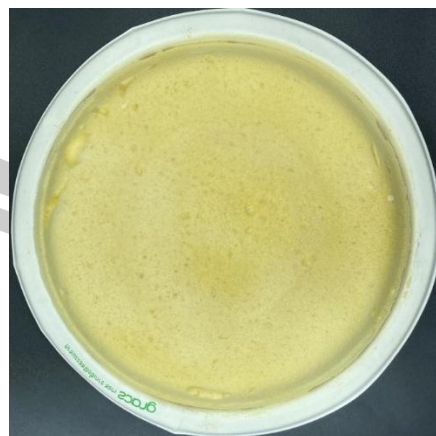
(ก)

(ข)

พจน ปรณ ทิโต ชิว



(ค)



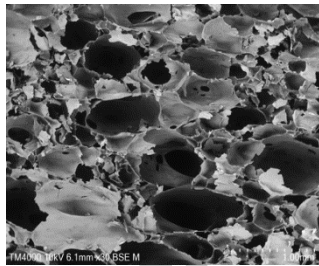
(ง)

ภาพประกอบ 20 เปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของโพนมะม่วงอบแห้งที่ผ่านสภาวะการอบที่ (ก) ใช้กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟคงที่ 520 วัตต์ (ด้านบน) (ข) ใช้กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟคงที่ 520 วัตต์ (ด้านล่าง) (ค) ปรับกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟ (ด้านบน) และ (ง) ปรับกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟ (ด้านล่าง)

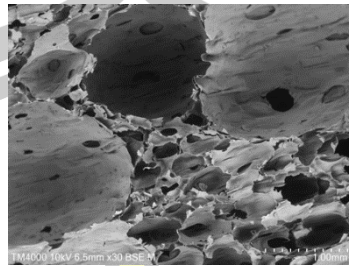
การเกิดอุณหภูมิที่สูงเกินไปอาจส่งผลทำให้เกิดการพองตัวของโพน จากตาราง 10 พบว่า ความหนาของโพนมะม่วงอบแห้งภายใต้สภาวะการใช้กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟคงที่ที่ 520 วัตต์ มีความหนาเฉลี่ยตลอดเส้นผ่านศูนย์กลางของโพนเท่ากับ 19.20 ± 1.50 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับโพนมะม่วงอบแห้งที่สภาวะการใช้กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟแบบแปรผัน (17.80 ± 0.40 มิลลิเมตร) อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ซึ่งแสดงถึงความไม่สม่ำเสมอของความหนาโพนที่อาจเกิดจากการพองตัว พบว่า ค่า SD ของตัวอย่างโพนอบแห้งที่ใช้กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟคงที่มีค่ามากกว่าการใช้กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟแบบแปรผัน จากผลการสังเกตนี้สามารถอธิบายได้ว่า การใช้กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟคงที่ที่ 520 วัตต์ ตลอดระยะเวลาอบแห้ง ทำให้เกิดอุณหภูมิที่สูงเกินไปจนทำให้เกิดการพองตัวของโพน ในขณะที่การใช้กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟแบบแปรผันใช้กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟที่ไม่สูงมากนักและไม่ส่งผลต่อการพองตัวของโพนในระหว่างการอบแห้ง

นอกจากนี้ตาราง 10 ยังแสดงค่าเนื้อสัมผัสของโพนมะม่วงอบแห้งโดยพิจารณาค่าความแข็งและค่าความกรอบ พบว่า ค่าความแข็งของโพนมะม่วงอบแห้งที่ได้จากสภาวะทั้งสองมีค่าไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่าเท่ากับ 124.67 ± 34.50 นิวตัน และ 152.18 ± 15.98 นิวตัน สำหรับโพนที่อบแห้งภายใต้สภาวะกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟคงที่และกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟแบบแปรผัน ตามลำดับ แต่เมื่อพิจารณาค่าความกรอบซึ่งวัดจากจำนวนแรงสูงสุด (peak) ที่นับได้กลับพบว่า โพนที่อบแห้งโดยใช้กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟคงที่มีจำนวนพีคเท่ากับ 39.78 ± 5.67 น้อยกว่าโพนที่อบแห้งโดยใช้กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟแบบแปรผัน (71.78 ± 8.94) จำนวนพีคที่มากกว่าในกรณีใช้กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟแบบแปรผันนี้สามารถอธิบายได้จากความสม่ำเสมอของรูพรุนที่เกิดขึ้นในโพน (ดังแสดงในรูป 21 ก-จ) ในขณะที่การใช้กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับ

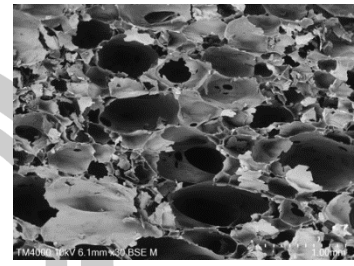
ไมโครเวฟคงที่ทำให้เกิดการฟองตัวภายในโฟมทำให้โครงสร้างโฟมมีรูพรุนที่ใหญ่กว่าและไม่สม่ำเสมอ (ดังแสดงในรูป 21 ก-ค)



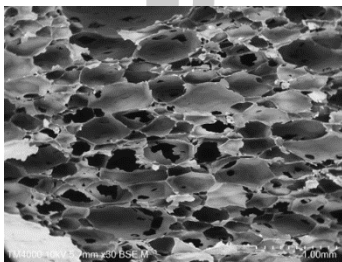
(ก)



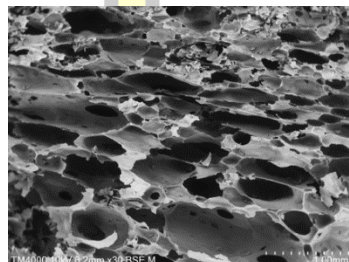
(ข)



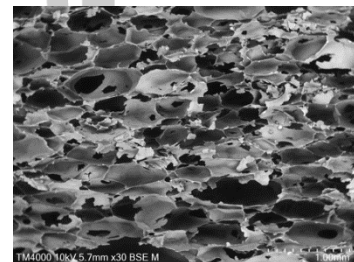
(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)

ภาพประกอบ 21 ภาพ SEM ของโฟมมะม่วงอบแห้งที่ผ่านกระบวนการอบแห้งภายใต้กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟคงที่ 520 วัตต์ ที่ตำแหน่ง (ก) ซ้าย (ข) กลาง (ค) ขวา และภายใต้กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟแปรผันที่ตำแหน่ง (ง) ซ้าย (จ) กลาง (ฉ) ขวา

พหุ ประถมศึกษา ชีวะ

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองจากบทที่ผ่านมา บทนี้จะกล่าวถึงข้อสรุปและข้อเสนอแนะของการทดลอง ซึ่งได้แก่ การศึกษาคุณลักษณะการอบแห้งและสภาวะอบแห้งแบบโฟมแมทร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟที่เหมาะสม การศึกษาผลของการควบคุมอุณหภูมิของวัสดุและกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟในระหว่างกระบวนการอบแห้งแบบโฟมแมทร่วมกับไมโครเวฟแบบขั้นตอน และการศึกษาฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟสำหรับควบคุมอุณหภูมิของโฟมมะม่วงระหว่างการอบแห้ง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

5.1 สรุปผลการศึกษา

5.1.1 การศึกษาคุณลักษณะการอบแห้งและสภาวะอบแห้งแบบโฟมแมทร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟที่เหมาะสม

จากการศึกษาจลนศาสตร์การอบแห้ง พบว่า การใช้การอบแห้งร่วมกับไมโครเวฟช่วยลดเวลาการอบแห้งลงเหลือ 30–100 นาที ซึ่งเป็นผลจากกลไกการให้ความร้อนเชิงปริมาตรที่ช่วยเร่งการเคลื่อนที่ของความชื้นออกจากภายในสู่พื้นผิว อย่างไรก็ตามการใช้กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟสูงอาจทำให้ความสม่ำเสมอของความชื้นลดลง เนื่องจากการกระจายความร้อนที่ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งจะต้องคำนึงถึงการปรับกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟให้เหมาะสม เพื่อไม่ให้เกิดปัญหาดังกล่าว ผลการศึกษา SEM ยังแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโฟมจากการใช้พลังงานไมโครเวฟที่สูงเกินไป

ในส่วนของการศึกษาแบบจำลองการอบแห้ง พบว่า แบบจำลองของ Midilli et al. สามารถอธิบายพฤติกรรมการอบแห้งได้ดีที่สุด โดยมีค่า R^2 สูงถึง 99.43–99.92 ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการคาดการณ์จลนศาสตร์การอบแห้งได้อย่างแม่นยำ นอกจากนี้ยังมีการใช้วิธีการ Response Surface Methodology (RSM) ในการศึกษาอิทธิพลของกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟ (MW) และอุณหภูมิลมร้อน (T) ต่อผลตอบสนองต่าง ๆ ได้แก่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (D_{eff}) การใช้พลังงานจำเพาะ (SEC) และการเปลี่ยนแปลงสี (ΔE) พบว่า กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟมีผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (D_{eff}) และพลังงานจำเพาะ (SEC) มากกว่าอุณหภูมิของลมร้อน การหาสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมที่สุดโดยพิจารณาตามเกณฑ์ของค่า D_{eff} สูงสุด และค่า SEC และ ΔE ต่ำสุด จากวิธีการออกแบบกระบวนการโดยใช้ฟังก์ชัน Desirability คือ สภาวะการอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิลมร้อน 55 องศาเซลเซียส ร่วมกับกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟ 520 วัตต์

จากสภาวะดังกล่าวจึงนำไปศึกษาต่อในการควบคุมอุณหภูมิของวัสดุและกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟในระหว่างกระบวนการอบแห้งแบบโพรแมทร่วมกับไมโครเวฟต่อไป

5.1.2 สรุปผลการศึกษาผลของการควบคุมอุณหภูมิของวัสดุและกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟในระหว่างกระบวนการอบแห้งแบบโพรแมทร่วมกับไมโครเวฟ

สภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมจากการศึกษาที่ผ่านมา คือ การใช้อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 55 องศาเซลเซียส ร่วมกับการให้ความร้อนเสริมด้วยไมโครเวฟที่กำลังวัตต์เท่ากับ 520 วัตต์ ได้คำนึงถึงประสิทธิภาพการอบแห้งเท่านั้น อย่างไรก็ตามการใช้กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟคงที่ 520 วัตต์ ตลอดระยะเวลาการอบแห้งส่งผลให้เกิดอุณหภูมิของโพรแมทสูงเกินไปจนทำให้เกิดการไหม้เนื่องจากความเข้มข้นของกำลังวัตต์มีค่าเพิ่มมากขึ้น ดังนั้น จึงใช้วิธีปรับกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟแบบขั้นตอนเพื่อควบคุมอุณหภูมิของโพรแมทสูงที่ 55 องศาเซลเซียส โดยทดลองโหมตการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟแบบ 520/0 520/100 520/200 และ 520/300 วัตต์

ผลของค่าอุณหภูมิของโพรแมทสูงระหว่างการอบแห้งโดยใช้ความร้อนเสริมจากไมโครเวฟแบบขั้นตอนของโหมตการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟแบบ 520/0 วัตต์ พบว่า อุณหภูมิของโพรแมทสูงอยู่ระหว่าง 55-65 องศาเซลเซียส ในช่วงสุดท้ายของการอบแห้งนั้น อุณหภูมิของโพรแมทสูงกลับสูงขึ้นเนื่องจากน้ำหนักโพรแมทลดลงจากการระเหยของน้ำ อุณหภูมิของโพรแมทสูงแกว่งมากกว่าเดิมสำหรับโหมตการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟแบบ 520/100 วัตต์ เพราะยังมีความร้อนจากการใช้กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟที่ 100 วัตต์ โหมตการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟแบบ 520/200 วัตต์ พบว่า อุณหภูมิของโพรแมทสูงเริ่มใกล้เคียงกับค่าอุณหภูมิที่ตั้งไว้ แต่ในช่วงท้ายสูงขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงประมาณ 75 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของโพรแมทสูงสูงกว่า 55 องศาเซลเซียส ตลอดเวลาในโหมตการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟแบบ 520/300 วัตต์ ดังนั้นกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟค่าต่ำที่สูงเกินไป เช่น 200 และ 300 วัตต์ ทำให้ไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิของโพรแมทได้ตามที่ต้องการ

ผลของการวิเคราะห์คุณภาพของแต่ละสภาวะการอบแห้งที่แตกต่างกัน พบว่า ค่าความชื้นสุดท้ายและปริมาณน้ำอิสระไม่มีความแตกต่างระหว่างโหมตการให้ความร้อนต่าง ๆ โดยค่าความชื้นสุดท้ายประมาณร้อยละ 7 ฐานแห้ง และปริมาณน้ำอิสระอยู่ในระดับปลอดภัย (<0.6) ค่าดัชนีสีน้ำตาล (BI) แตกต่างกันตามโหมตการให้ความร้อน โดยโหมตการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟแบบ 520/0 วัตต์ มีค่า BI ต่ำสุด และโหมตการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟแบบ 520/300 วัตต์ มีค่าสูงสุด ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (D_e) และค่าการใช้พลังงานจำเพาะ (SEC) แตกต่างกันเมื่อใช้โหมตการให้ความร้อนต่างกัน โดยโหมตการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟแบบ 520/300 วัตต์ มีค่า SEC ต่ำสุด ค่า RMSE ซึ่งแสดงความผิดพลาดของอุณหภูมิมีน้อยที่สุดในโหมตการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟแบบ 520/0 วัตต์ และมากที่สุดใช้ในโหมตการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟแบบ 520/300 วัตต์

สภาวะการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟที่เหมาะสมเมื่อพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิโพรแมทสูงในระหว่างกระบวนการอบแห้ง คือ การใช้กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟค่าสูงเท่ากับ

520 วัตต์ และกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟค่าต่ำเท่ากับ 0 วัตต์ ดังนั้นจึงนำโหมตการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟนี้ไปใช้ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟกับเวลาการอบแห้งในขั้นตอนถัดไป

5.1.3 สรุปผลการศึกษาฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟสำหรับควบคุมอุณหภูมิของโพนัมมะม่วงระหว่างการอบแห้ง

จากการศึกษาในหัวข้อที่ผ่านมา พบว่า การใช้กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟค่าสูงที่ 520 วัตต์ และใช้กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟค่าต่ำที่ 0 วัตต์ เป็นโหมตการให้ความร้อนที่เหมาะสมที่สุดเมื่อพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิ (RMSE) ดังนั้น จึงได้นำค่ากำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟที่ใช้ตลอดระยะเวลาการอบแห้งมาความสัมพันธ์กับเวลาอบแห้งเพื่อนำไปประยุกต์ในการควบคุมอุณหภูมิของโพนัมมะม่วงโดยไม่ใช้เซนเซอร์วัดอุณหภูมิต่อไป

การเปรียบเทียบจลนศาสตร์การอบแห้ง พบว่า การใช้ฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟแบบขั้นตอนใช้เวลานานกว่าการใช้กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟคงที่ 520 วัตต์ ถึงเกือบ 10 เท่า ในช่วง 25 นาทีแรก ความชื้นลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากใช้กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟสูง (200-520 วัตต์) หลังจากนั้นกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟแบบขั้นตอนในช่วง 100-200 วัตต์ ทำให้อัตราการระเหยน้ำลดลง ส่งผลให้ระยะเวลาในการอบแห้งยาวนานขึ้น แม้การใช้กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟแบบขั้นตอนจะช่วยควบคุมอุณหภูมิและลดความเสี่ยงการไหม้ แต่ประสิทธิภาพการอบแห้งต่ำเนื่องจากใช้เวลานานเกินไป ซึ่งอาจไม่เหมาะสมในทางปฏิบัติ ดังนั้นการเลือกสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมควรพิจารณาปัจจัยอื่น ๆ เช่น คุณภาพของโพนัมมะม่วงอบแห้งและประสิทธิภาพการใช้พลังงานร่วมด้วย

ผลของการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางเคมีกายภาพและประสิทธิภาพการใช้พลังงานระหว่างการใช้อำนาจไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟคงที่ที่ 520 วัตต์และกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟแบบขั้นตอน พบว่า ค่าความชื้นและปริมาณน้ำอิสระไม่มีความแตกต่าง แต่การใช้อำนาจไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟแบบขั้นตอนสามารถควบคุมอุณหภูมิได้ดีกว่า (RMSE ต่ำกว่า) ลดการเกิดสีน้ำตาลและการไหม้ของโพนัมมะม่วง นอกจากนี้ยังช่วยลดการฟองตัวและทำให้ความหนาสม่ำเสมอ ส่งผลให้โพนัมมะม่วงอบแห้งมีค่าความกรอบสูงกว่าเนื่องจากรูพรุนที่สม่ำเสมอ แม้ว่าจะใช้เวลาในการอบแห้งนานกว่าการใช้อำนาจไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟคงที่ก็ตาม

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรศึกษาปัจจัยอื่น ๆ ที่อาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพของโฟมมะม่วง เช่น ความชื้นของวัสดุ เริ่มต้น ความเร็วการเคลื่อนที่ของอากาศในกระบวนการอบแห้ง และปัจจัยทางเคมีที่อาจเกิดขึ้น ระหว่างการอบแห้ง เพื่อให้สามารถปรับกระบวนการให้เหมาะสมกับวัสดุต่าง ๆ ได้ดียิ่งขึ้น

5.2.2 ควรพิจารณาการปรับพารามิเตอร์อื่น ๆ เช่น ความถี่ในการสลับกำลังไฟฟ้าที่ป้อน ให้กับไมโครเวฟ และการปรับอุณหภูมิให้เหมาะสมในแต่ละขั้นตอน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต และลดต้นทุนพลังงาน

5.2.3 ประยุกต์ใช้ในระดับภาคอุตสาหกรรม เพื่อทำความเข้าใจถึงข้อจำกัดต่าง ๆ ที่อาจ เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตที่มีขนาดใหญ่กว่า และการควบคุมกระบวนการที่เหมาะสมในการผลิตเชิง พาณิชย์



บรรณานุกรม

- [1] สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, “สินค้าเกษตรมะม่วง,” 2566. <https://mis-app.oae.go.th/product/มะม่วง> (accessed Mar. 08, 2024).
- [2] V. Chandrasekar, G. John Swamy, K. Kuppasamy, and S. Asokapandian, “Effect of foaming agent concentration and drying temperature on physiochemical and antimicrobial properties of foam mat dried powder,” *Asian J. Dairy Food Res.*, vol. 34, Jan. 2015, doi: 10.5958/0976-0563.2015.00008.1.
- [3] A. Sangamithra, S. Venkatachalam, S. G. John, and K. Kuppaswamy, “Foam Mat Drying of Food Materials: A Review,” *J. Food Process. Preserv.*, vol. 39, no. 6, pp. 3165–3174, Dec. 2015, doi: <https://doi.org/10.1111/jfpp.12421>.
- [4] X.-Z. Zheng, C.-H. Liu, and H. Zhou, “Optimization of Parameters for Microwave-Assisted Foam Mat Drying of Blackcurrant Pulp,” *Dry. Technol.*, vol. 29, no. 2, pp. 230–238, Jan. 2011, doi: 10.1080/07373937.2010.484112.
- [5] A. Muthukumar, C. Ratti, and V. G. S. Raghavan, “Foam-Mat Freeze Drying of Egg White and Mathematical Modeling Part I Optimization of Egg White Foam Stability,” *Dry. Technol.*, vol. 26, no. 4, pp. 508–512, Mar. 2008, doi: 10.1080/07373930801929581.
- [6] Z. Hardy and V. A. Jideani, “Foam-mat drying technology: A review,” *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, vol. 57, no. 12, pp. 2560–2572, Aug. 2017, doi: 10.1080/10408398.2015.1020359.
- [7] O. S. Qadri and A. K. Srivastava, “Prototype continuous microwave foam-mat dryer: design and fabrication,” *J. Food Sci. Technol.*, vol. 58, no. 9, pp. 3357–3367, 2021, doi: 10.1007/s13197-020-04907-3.
- [8] S. Nejatdarabi, K. Parastouei, and M. Fathi, “Development of ajwain (*Trachyspermum ammi*) seed essence powder using foam-mat drying technique: a comparison on the effect of guar gum, basil seed gum, and the combination of them,” *J. Food Meas. Charact.*, vol. 17, no. 1, pp. 75–86, 2023, doi: 10.1007/s11694-022-01597-7.
- [9] T. Kudra and C. Ratti, “Foam-mat drying: Energy and cost analyses,” *Can. Biosyst. Eng.*, vol. 48, Jan. 2006.
- [10] O. S. Qadri and A. K. Srivastava, “Microwave-Assisted Foam Mat Drying of Guava Pulp: Drying Kinetics and Effect on Quality Attributes,” *J. Food Process Eng.*, vol. 40, no. 1, p. e12295, Feb. 2017, doi: <https://doi.org/10.1111/jfpe.12295>.
- [11] O. Qadri and A. Srivastava, “Effect of microwave power on foam-mat drying of tomato pulp,” *Agric. Eng. Int.*, vol. 16, Aug. 2014.

- [12] T. Funebo and T. Ohlsson, "Microwave-assisted air dehydration of apple and mushroom," *J. Food Eng.*, vol. 38, no. 3, pp. 353–367, 1998, doi: [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(98\)00131-9](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(98)00131-9).
- [13] R. Garcia, F. Leal, and C. Rolz, "Drying of bananas using microwave and air ovens," *Int. J. Food Sci. Technol.*, vol. 23, no. 1, pp. 73–80, Feb. 1988, doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1988.tb00552.x>.
- [14] M. Bouraoui, P. Richard, and T. Durance, "MICROWAVE and CONVECTIVE DRYING of POTATO SLICES," *J. Food Process Eng.*, vol. 17, no. 3, pp. 353–363, Sep. 1994, doi: <https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.1994.tb00343.x>.
- [15] K. Venkatachalapathy and G. S. V Raghavan, "Microwave Drying of Osmotically Dehydrated Blueberries," *J. Microw. Power Electromagn. Energy*, vol. 33, no. 2, pp. 95–102, Jan. 1998, doi: 10.1080/08327823.1998.11688365.
- [16] H. S. Ramaswamy and F. Nsonzi, "CONVECTIVE-AIR DRYING KINETICS OF OSMOTICALLY PRE-TREATED BLUEBERRIES," *Dry. Technol.*, vol. 16, no. 3–5, pp. 743–759, Jan. 1998, doi: 10.1080/07373939808917433.
- [17] C. A. Vrieling, S. Sánchez-Pedreño, and J. Grasman, "Thermal runaway in microwave heating: a mathematical analysis," *Appl. Math. Model.*, vol. 26, no. 11, pp. 1029–1038, 2002, doi: [https://doi.org/10.1016/S0307-904X\(02\)00058-6](https://doi.org/10.1016/S0307-904X(02)00058-6).
- [18] ระวี เสฐฐักดิ์ and เปรมปรี ญ สงขลา, "มหาชนก มะม่วงเพื่ออุตสาหกรรมส่งออกและแปรรูป," *วารสารเคหะเกษตร*, vol. 3, 2542.
- [19] USDA Agricultural Research Service, "Composition of Foods Raw, Processed, Prepared USDA National Nutrient Database for Standard Reference, Release 21," 2008. https://www.ars.usda.gov/arsuserfiles/80400535/data/sr21/sr21_doc.pdf (accessed Mar. 12, 2024).
- [20] A. S. Mujumdar, "An overview of innovation in industrial drying: current status and R&D needs," *Transp. Porous Media*, vol. 66, no. 1, pp. 3–18, 2007, doi: 10.1007/s11242-006-9018-y.
- [21] นิธิยา รัตนานนท์, *หลักการแปรรูปอาหารเบื้องต้น*. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์, 2544.
- [22] J. A. Moses, T. Norton, K. Alagusundaram, and B. K. Tiwari, "Novel Drying Techniques for the Food Industry," *Food Eng. Rev.*, vol. 6, no. 3, pp. 43–55, 2014, doi: 10.1007/s12393-014-9078-7.
- [23] S. M. Oliveira, T. R. S. Brandão, and C. L. M. Silva, "Influence of Drying Processes and Pretreatments on Nutritional and Bioactive Characteristics of Dried Vegetables: A Review," *Food Eng. Rev.*, vol. 8, no. 2, pp. 134–163, 2016, doi: 10.1007/s12393-015-9124-0.

- [24] S. M. Jafari, V. Ghanbari, M. Ganje, and D. Dehnad, "Modeling the Drying Kinetics of Green Bell Pepper in a Heat Pump Assisted Fluidized Bed Dryer," *J. Food Qual.*, vol. 39, no. 2, pp. 98–108, Apr. 2016, doi: <https://doi.org/10.1111/jfq.12180>.
- [25] H. Feng, Y. Yin, and J. Tang, "Microwave Drying of Food and Agricultural Materials: Basics and Heat and Mass Transfer Modeling," *Food Eng. Rev.*, vol. 4, no. 2, pp. 89–106, 2012, doi: 10.1007/s12393-012-9048-x.
- [26] D. M. Kadam, R. A. Wilson, S. Kaur, and Manisha, "Influence of Foam Mat Drying on Quality of Tomato Powder," *Int. J. Food Prop.*, vol. 15, no. 1, pp. 211–220, Jan. 2012, doi: 10.1080/10942911003763701.
- [27] L. Indrawati, Z. Wang, G. Narsimhan, and J. Gonzalez, "Effect of processing parameters on foam formation using a continuous system with a mechanical whipper," *J. Food Eng.*, vol. 88, no. 1, pp. 65–74, 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.01.015>.
- [28] R. Thuwapanichayanan, S. Prachayawarakorn, and S. Soponronnarit, "Effects of foaming agents and foam density on drying characteristics and textural property of banana foams," *LWT*, vol. 47, no. 2, pp. 348–357, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.01.030>.
- [29] A. Muthukumar, C. Ratti, and V. G. S. Raghavan, "Foam-Mat Freeze Drying of Egg White—Mathematical Modeling Part II: Freeze Drying and Modeling," *Dry. Technol.*, vol. 26, no. 4, pp. 513–518, Mar. 2008, doi: 10.1080/07373930801929615.
- [30] S. Darniadi, P. Ho, and B. S. Murray, "Comparison of blueberry powder produced via foam-mat freeze-drying versus spray-drying: evaluation of foam and powder properties," *J. Sci. Food Agric.*, vol. 98, no. 5, pp. 2002–2010, Mar. 2018, doi: <https://doi.org/10.1002/jsfa.8685>.
- [31] X. Zheng *et al.*, "Microwave Energy Absorption Behavior of Foamed Berry Puree Under Microwave Drying Conditions," *Dry. Technol.*, vol. 31, no. 7, pp. 785–794, May 2013, doi: 10.1080/07373937.2012.761635.
- [32] R. Thuwapanichayanan, S. Prachayawarakorn, and S. Soponronnarit, "Drying characteristics and quality of banana foam mat," *J. Food Eng.*, vol. 86, no. 4, pp. 573–583, 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.11.008>.
- [33] D. J. Walsh, K. Russell, and R. J. FitzGerald, "Stabilisation of sodium caseinate hydrolysate foams," *Food Res. Int.*, vol. 41, no. 1, pp. 43–52, 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2007.09.003>.
- [34] E. A. Foegeding, "Food Biophysics of Protein Gels: A Challenge of Nano and

- Macroscopic Proportions,” *Food Biophys.*, vol. 1, no. 1, pp. 41–50, 2006, doi: 10.1007/s11483-005-9003-y.
- [35] P. P. Shameena Beegum *et al.*, “Foam mat drying technique in coconut milk: Effect of additives on foaming and powder properties and its economic analysis,” *J. Food Process. Preserv.*, vol. 46, no. 11, p. e17122, Nov. 2022, doi: <https://doi.org/10.1111/jfpp.17122>.
- [36] S. K. Bag, P. P. Srivastav, and H. N. Mishra, “Optimization of Process Parameters for Foaming of Bael (*Aegle marmelos* L.) Fruit Pulp,” *Food Bioprocess Technol.*, vol. 4, no. 8, pp. 1450–1458, 2011, doi: 10.1007/s11947-009-0243-6.
- [37] O. S. Qadri, A. K. Srivastava, and B. Yousuf, “Trends in foam mat drying of foods: Special emphasis on hybrid foam mat drying technology,” *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, vol. 60, no. 10, pp. 1667–1676, May 2020, doi: 10.1080/10408398.2019.1588221.
- [38] C. Ratti and T. Kudra, “Drying of Foamed Biological Materials: Opportunities and Challenges,” *Dry. Technol.*, vol. 24, no. 9, pp. 1101–1108, Sep. 2006, doi: 10.1080/07373930600778213.
- [39] C. K. Sankat and F. Castaigne, “Foaming and drying behaviour of ripe bananas,” *LWT - Food Sci. Technol.*, vol. 37, no. 5, pp. 517–525, 2004, doi: [https://doi.org/10.1016/S0023-6438\(03\)00132-4](https://doi.org/10.1016/S0023-6438(03)00132-4).
- [40] O. A. Akintoye and A. O. Oguntunde, “PRELIMINARY INVESTIGATION ON THE EFFECT OF FOAM STABILIZERS ON THE PHYSICAL CHARACTERISTICS AND RECONSTITUTION PROPERTIES OF FOAM-MAT DRIED SOYMILK,” *Dry. Technol.*, vol. 9, no. 1, pp. 245–262, Jan. 1991, doi: 10.1080/07373939108916651.
- [41] A. A. Karim and C. C. Wai, “Foam-mat drying of starfruit (*Averrhoa carambola* L.) purée. Stability and air drying characteristics,” *Food Chem.*, vol. 64, no. 3, pp. 337–343, 1999, doi: [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(98\)00119-8](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(98)00119-8).
- [42] P. P. Lewick, “Mechanisms concerned in foam-mat drying of tomato paste,” *Trans. Agric. Acad. Warsaw*, vol. 55, pp. 1–67, 1975.
- [43] R. D. COOKE, G. R. BREAG, C. E. M. FERBER, P. R. BEST, and J. JONES, “Studies of mango processing,” *Int. J. Food Sci. Technol.*, vol. 11, no. 5, pp. 463–473, Oct. 1976, doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1976.tb00746.x>.
- [44] E. J. Vernon-Carter, G. Espinosa-Paredes, C. I. Beristain, and H. Romero-Tehuizil, “Effect of foaming agents on the stability, rheological properties, drying kinetics and flavour retention of tamarind foam-mats,” *Food Res. Int.*, vol. 34, no. 7, pp. 587–598, 2001, doi: [https://doi.org/10.1016/S0963-9969\(01\)00076-X](https://doi.org/10.1016/S0963-9969(01)00076-X).
- [45] N. Raharitsifa and C. Ratti, “Foam-mat freeze-drying of apple juice part 1:

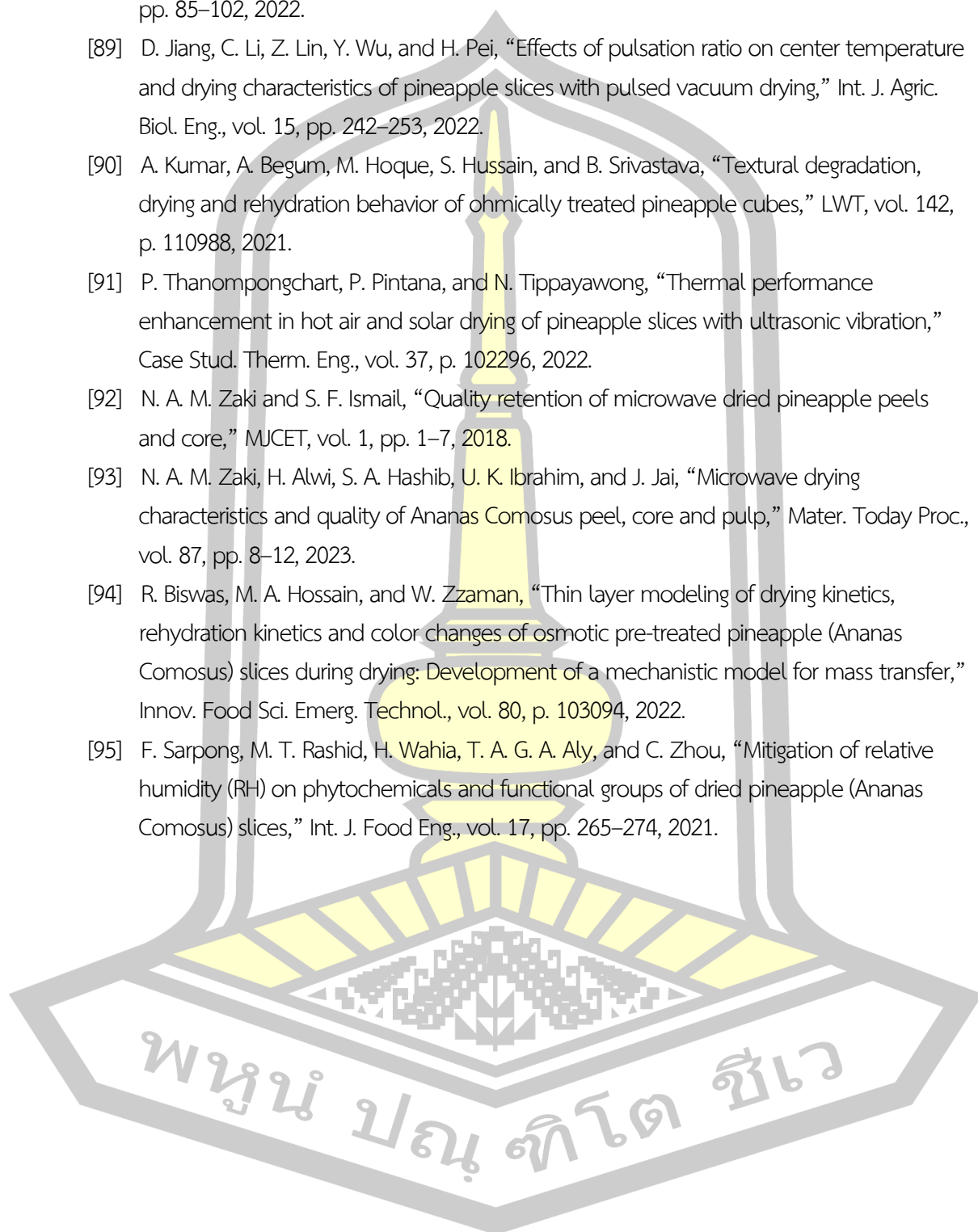
- Experimental data and ann simulations,” *J. Food Process Eng.*, vol. 33, pp. 268–283, Jul. 2009, doi: 10.1111/j.1745-4530.2009.00400.x.
- [46] D. Izquierdo-López, J. Goulet, and C. Ratti, “Foam-Mat Freeze-Drying of *Bifidobacterium longum* RO175: Viability and Refrigerated Storage Stability,” *J. Food Sci.*, vol. 82, no. 1, pp. 90–96, Jan. 2017, doi: <https://doi.org/10.1111/1750-3841.13571>.
- [47] T. Seerangurayar, A. Manickavasagan, A. M. Al-Ismaïli, and Y. A. Al-Mulla, “Effect of carrier agents on physicochemical properties of foam-mat freeze-dried date powder,” *Dry. Technol.*, vol. 36, no. 11, pp. 1292–1303, Aug. 2018, doi: 10.1080/07373937.2017.1400557.
- [48] M. Maskan, “Kinetics of colour change of kiwifruits during hot air and microwave drying,” *J. Food Eng.*, vol. 48, no. 2, pp. 169–175, 2001, doi: [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00154-0](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00154-0).
- [49] G. P. Sharma and S. Prasad, “Drying of garlic (*Allium sativum*) cloves by microwave-hot air combination,” *J. Food Eng.*, vol. 50, no. 2, pp. 99–105, 2001, doi: [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00200-4](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00200-4).
- [50] I. A. Ozkan, B. Akbudak, and N. Akbudak, “Microwave drying characteristics of spinach,” *J. Food Eng.*, vol. 78, no. 2, pp. 577–583, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.10.026>.
- [51] R. Gao, L. Xue, Y. Zhang, Y. Liu, L. Shen, and X. Zheng, “Production of blueberry pulp powder by microwave-assisted foam-mat drying: Effects of formulations of foaming agents on drying characteristics and physicochemical properties,” *LWT*, vol. 154, p. 112811, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112811>.
- [52] M. Ozcelik, S. Ambros, A. Heigl, E. Dachmann, and U. Kulozik, “Impact of hydrocolloid addition and microwave processing condition on drying behavior of foamed raspberry puree,” *J. Food Eng.*, vol. 240, pp. 83–91, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.07.001>.
- [53] N. Sujinda, J. Varith, R. Shamsudin, S. Jaturonglumlert, and S. Chamnan, “Development of a closed-loop control system for microwave freeze-drying of carrot slices using a dynamic microwave logic control,” *J. Food Eng.*, vol. 302, p. 110559, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110559>.
- [54] Ö. Süfer, R. Pandiselvam, and Y. Y. Kaya, “Drying kinetics, powder properties, and bioactive components of bitter orange (*Citrus aurantium* L.) dried by microwave-assisted foam-mat approach,” *Biomass Convers. Biorefinery*, vol. 14, no. 1, pp. 1275–1287, 2024, doi: 10.1007/s13399-023-04477-2.
- [55] M. Ershadfarkar, S. Dadashi, J. Deghannya, and M. Khakbaz Heshmati, “Effect of

- combined convective hot air and far-infrared radiation on physic-chemical aspects of black raspberry powder produced by foam mat method,” *Heliyon*, vol. 9, no. 8, p. e19166, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19166>.
- [56] L. Chai, L. Qiang, L. Cheng-hai, and Z. Xian-zhe, “Process Parameter Study on Microwave-assisted Foam-mat Drying Properties of Corn Soaking Water,” *J. Northeast Agric. Univ. (English Ed.)*, vol. 23, no. 2, pp. 65–77, 2016, doi: [https://doi.org/10.1016/S1006-8104\(16\)30049-6](https://doi.org/10.1016/S1006-8104(16)30049-6).
- [57] Á. H. Moreno, Á. J. Aguirre, R. Hernández Maqueda, G. Jiménez Jiménez, and C. Torres Miño, “Effect of temperature on the microwave drying process and the viability of amaranth seeds,” *Biosyst. Eng.*, vol. 215, pp. 49–66, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.12.019>.
- [58] J. Zhang, M. Li, Z. Ding, J. Cheng, S. Yang, and X. Liu, “Microwave airflow drying of pecans at variable microwave power,” *J. Food Process Eng.*, vol. 42, no. 1, p. e12946, Feb. 2019, doi: <https://doi.org/10.1111/jfpe.12946>.
- [59] A. N. Yüksel, “Development of yoghurt powder using microwave-assisted foam-mat drying,” *J. Food Sci. Technol.*, vol. 58, no. 7, pp. 2834–2841, 2021, doi: [10.1007/s13197-021-05035-2](https://doi.org/10.1007/s13197-021-05035-2).
- [60] O. S. Qadri, K. Osama, and A. K. Srivastava, “Foam mat drying of papaya using microwaves: Machine learning modeling,” *J. Food Process Eng.*, vol. 43, no. 6, p. e13394, Jun. 2020, doi: <https://doi.org/10.1111/jfpe.13394>.
- [61] U. Shivhare, G. Raghavan, and R. Bosisio, “Drying of Corn Using Variable Microwave Power with a Surface Wave Applicator,” *J. Microw. Power Electromagn. Energy*, vol. 26, no. 1, pp. 38–44, Jan. 1991, doi: [10.1080/08327823.1991.11688137](https://doi.org/10.1080/08327823.1991.11688137).
- [62] R. Wang, D. Zhao, Y. Gao, Q. Xu, L. Wu, and Z. Li, “Power control in microwave drying of green turnip,” *Dry. Technol.*, vol. 40, no. 10, pp. 2153–2163, Jul. 2022, doi: [10.1080/07373937.2021.1927073](https://doi.org/10.1080/07373937.2021.1927073).
- [63] P. Poogungploy, N. Poomsa-ad, and L. Wiset, “Control of microwave assisted macadamia drying,” *J. Microw. Power Electromagn. Energy*, vol. 52, no. 1, pp. 60–72, Jan. 2018, doi: [10.1080/08327823.2017.1421872](https://doi.org/10.1080/08327823.2017.1421872).
- [64] S. Rezaei, N. Behroozi-Khazaei, and H. Darvishi, “Microwave power adjusting during potato slice drying process using machine vision,” *Comput. Electron. Agric.*, vol. 160, pp. 40–50, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.03.013>.
- [65] G. Cuccurullo, L. Giordano, A. Metallo, and L. Cinquanta, “Drying rate control in microwave assisted processing of sliced apples,” *Biosyst. Eng.*, vol. 170, pp. 24–

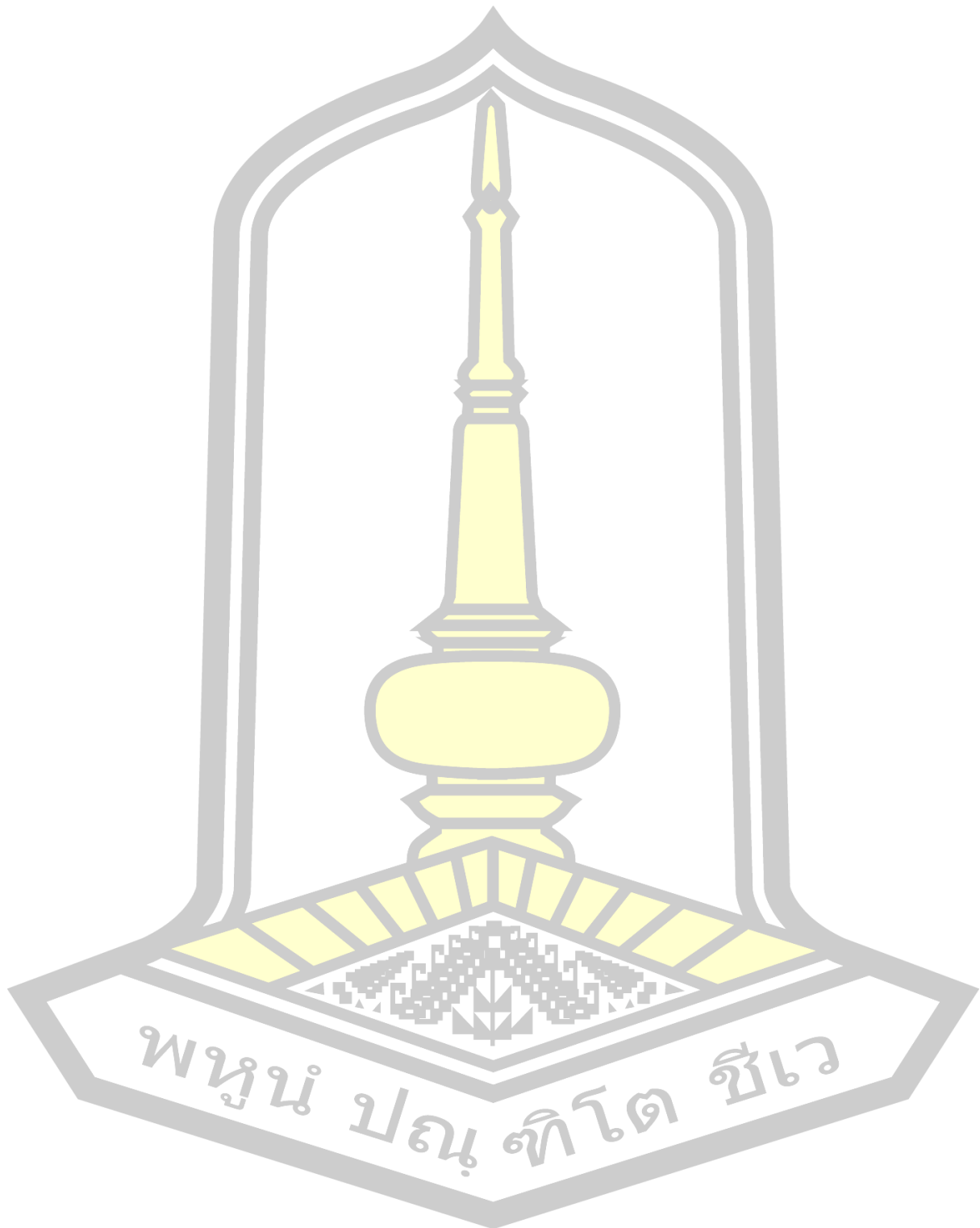
- 30, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.03.010>.
- [66] S. R. Sedani, I. L. Pardeshi, and A. R. Dorkar, "Study on the effect of stepwise decreasing microwave power drying (SDMPD) of moth bean sprouts on its quality," *Legum. Sci.*, vol. 3, no. 4, p. e84, Dec. 2021, doi: <https://doi.org/10.1002/leg3.84>.
- [67] F. Zhang, A. Hu, R. Song, and L. Li, "Optimization of hot-air microwave combined drying control system based on air outlet temperature and humidity monitoring," *Int. J. Agric. Biol. Eng.*, vol. 14, pp. 255–261, Jul. 2021, doi: [10.25165/j.ijabe.20211404.6366](https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20211404.6366).
- [68] S. Asokapandian, S. Venkatachalam, K. Kuppasamy, and G. John Swamy, "Foam-mat drying of muskmelon," *International Journal of Food Engineering*, vol. 11, 2015. <https://doi.org/10.1515/ijfe-2014-0139>.
- [69] R. Salahi, M. Mohebbi, and M. Taghizadeh, "Foam-mat drying of cantaloupe (*Cucumis melo*): Optimization of foaming parameters and investigating drying characteristics," *Journal of Food Processing and Preservation*, vol. 39, 2015.
- [70] H. Wang, W. Guo, C. Zheng, D. Wang, and H. Zhan, "Effect of temperature on foaming ability and foam stability of typical surfactants used for foaming agent," *Journal of Surfactants and Detergents*, vol. 20, no. 3, pp. 553-560, Mar. 2017, doi: [10.1007/s11743-017-1953-9](https://doi.org/10.1007/s11743-017-1953-9).
- [71] P. Kandasamy, N. Varadharaju, S. Kalemullah, and D. Maladhi, "Optimization of process parameters for foam-mat drying of papaya pulp," *J. Food Sci. Technol.*, vol. 51, no. 10, pp. 2526–2534, 2014.
- [72] S. Akiokato, Y. Tanaka, and S. Nakano, "Title of the article," *Journal Name*, vol. Volume, no. Issue, pp. page numbers, Year. doi: <https://doi.org/xxx>
- [73] J. F. Zayas, "Foaming Properties of Proteins," in *Functionality of Proteins in Food*, J. F. Zayas, Ed., Springer Berlin Heidelberg, 1997, pp. 260-309.
- [74] J. Dehghannya, M. Pourahmad, B. Ghanbarzadeh, and H. Ghaffari, "Heat and mass transfer enhancement during foam-mat drying process of lime juice: Impact of convective hot air temperature," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 135, pp. 30–43, 2019. doi: [10.1016/j.ijthermalsci.2018.07.023](https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2018.07.023).
- [75] AOAC, *Official Methods of Analysis*, 16th ed. Washington, DC, 1995. doi: [10.1016/s0021-9673\(01\)83549-4](https://doi.org/10.1016/s0021-9673(01)83549-4).
- [76] W. Duangkhamchan and J. Laohavanich, "Feasibility of Using a Multistage Drying Method Including Infrared Heating, Tempering and Sun Drying for Wet Paddy," *Adv. Mater. Res.*, vol. 931–932, pp. 1497–1501, May 2014, doi: [10.4028/www.scientific.net/AMR.931-932.1497](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.931-932.1497).

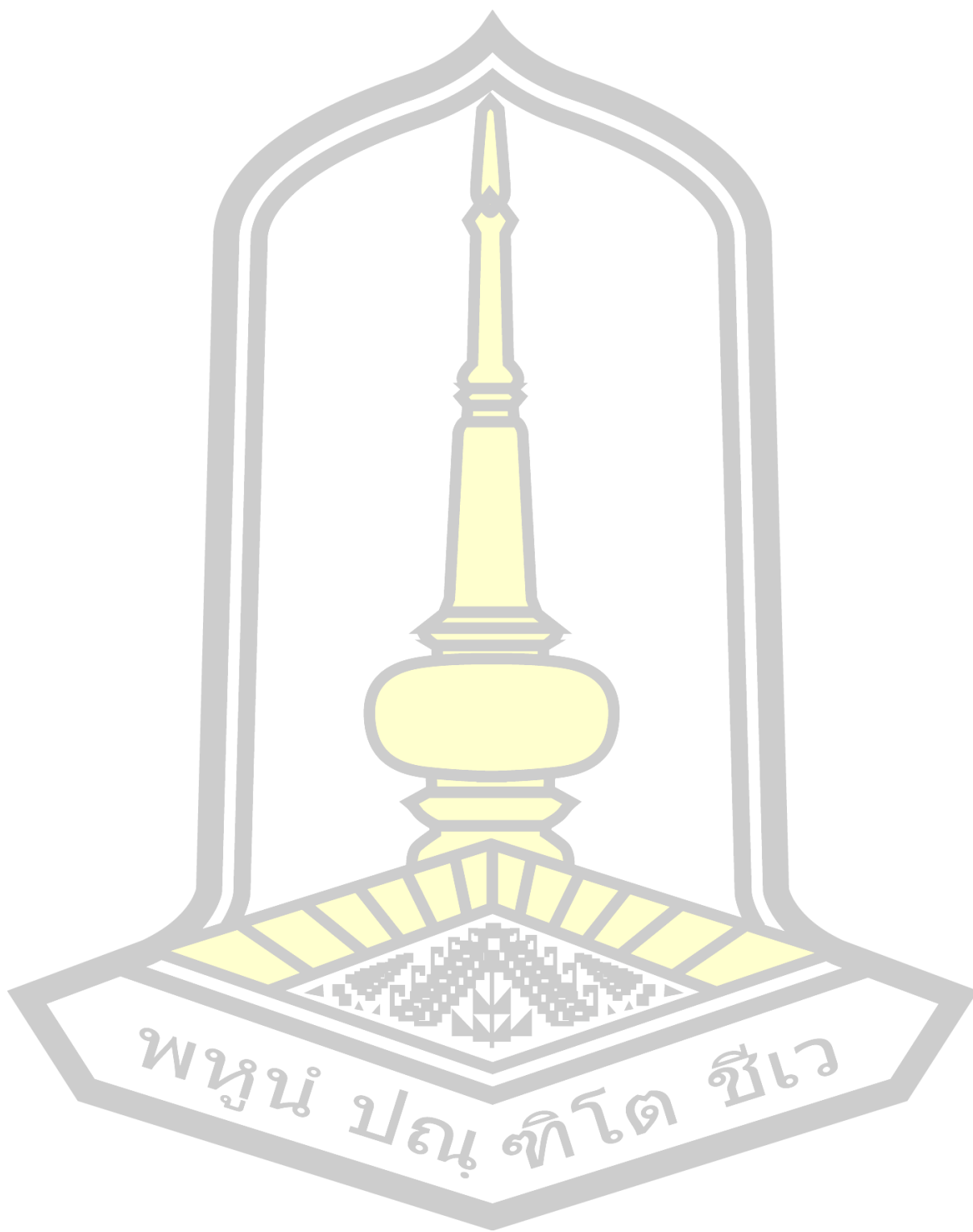
- [77] O. S. Qadri and A. K. Srivastava, "Effect of microwave power on foam-mat drying of tomato pulp," *Agric. Eng. Int.: CIGR J.*, vol. 16, pp. 238–244, 2014.
- [78] A. M. Chaux-Gutiérrez, A. B. Santos, D. M. Granda-Restrepo, and M. A. Mauro, "Foam mat drying of mango: Effect of processing parameters on the drying kinetic and product quality," *Drying Technol.*, vol. 35, pp. 631–641, 2017.
- [79] H. T. Varol, S. Karaaslan, R. Külcü, and D. S. Sivri, "Microwave-assisted foam mat drying of kumquat puree and investigation of some parameters," *BIO Web Conf.*, vol. 85, 2024. *Proc. 3rd Int. Conf. Res. Agric. Food Technol.*, Adana, Turkey. Available: <https://doi.org/10.1051/bioconf/20248501029>.
- [80] A. N. Yüksel, "Development of yoghurt powder using microwave-assisted foam-mat drying," *J. Food Sci. Technol.*, vol. 58, pp. 2834–2841, 2021.
- [81] M. Z. Islam, M. I. Jahan, K. Monalisa, R. Rana, and M. M. Hoque, "Impact of maltodextrin, egg white protein addition and microwave-assisted foam mat drying on drying kinetics, microstructures, physicochemical and quality attributes of jackfruit juice powder," *LWT*, vol. 200, p. 116158, 2024.
- [82] A. Chen, G. E. Achkar, B. Liu, and R. Bennacer, "Experimental study on moisture kinetics and microstructure evolution in apples during high power microwave drying process," *J. Food Eng.*, vol. 292, p. 110362, 2021.
- [83] G. V. S. B. Raj and K. K. Dash, "Effect of intermittent microwave convective drying on physicochemical properties of dragon fruit," *Food Sci. Biotechnol.*, vol. 31, pp. 549–560, 2022.
- [84] O. S. Qadri, "Microwave drying of foamed tomato pulp: Optimization and mass transfer modelling," *J. Food Process Preserv.*, vol. 46, p. e15954, 2022.
- [85] M. Zarein, S. H. Samadi, and B. Ghobadian, "Investigation of microwave dryer effect on energy efficiency during drying of apple slices," *J. Saudi Soc. Agric. Sci.*, vol. 14, no. 1, pp. 41–47, 2015.
- [86] H. L. Nguyen and T. Q. Le, "Drying kinetics and effective moisture diffusivity of pomelo albedo under vacuum-assisted microwave drying and its semi-product," *J. Food Process Eng.*, vol. 45, no. 3, p. e13968, 2022.
- [87] M. Taşova, H. Polatçı, and S. K. Dursun, "Comparison of the performance of a modified temperature-controlled microwave dryer to improve heat-mass transfer, increase energy efficiency and preserve quality characteristics of shad (*Alosa Fallax Nilotica*)," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 144, p. 106772, 2023.
- [88] A. Kumar, P. Kandasamy, I. Chakraborty, and L. Hangshing, "Analysis of energy consumption, heat and mass transfer, drying kinetics and effective moisture diffusivity

- during foam-mat drying of mango in a convective hot-air dryer,” *Biosyst. Eng.*, vol. 219, pp. 85–102, 2022.
- [89] D. Jiang, C. Li, Z. Lin, Y. Wu, and H. Pei, “Effects of pulsation ratio on center temperature and drying characteristics of pineapple slices with pulsed vacuum drying,” *Int. J. Agric. Biol. Eng.*, vol. 15, pp. 242–253, 2022.
- [90] A. Kumar, A. Begum, M. Hoque, S. Hussain, and B. Srivastava, “Textural degradation, drying and rehydration behavior of ohmically treated pineapple cubes,” *LWT*, vol. 142, p. 110988, 2021.
- [91] P. Thanompongchart, P. Pintana, and N. Tippayawong, “Thermal performance enhancement in hot air and solar drying of pineapple slices with ultrasonic vibration,” *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 37, p. 102296, 2022.
- [92] N. A. M. Zaki and S. F. Ismail, “Quality retention of microwave dried pineapple peels and core,” *MJCET*, vol. 1, pp. 1–7, 2018.
- [93] N. A. M. Zaki, H. Alwi, S. A. Hashib, U. K. Ibrahim, and J. Jai, “Microwave drying characteristics and quality of Ananas Comosus peel, core and pulp,” *Mater. Today Proc.*, vol. 87, pp. 8–12, 2023.
- [94] R. Biswas, M. A. Hossain, and W. Zzaman, “Thin layer modeling of drying kinetics, rehydration kinetics and color changes of osmotic pre-treated pineapple (Ananas Comosus) slices during drying: Development of a mechanistic model for mass transfer,” *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, vol. 80, p. 103094, 2022.
- [95] F. Sarpong, M. T. Rashid, H. Wahia, T. A. G. A. Aly, and C. Zhou, “Mitigation of relative humidity (RH) on phytochemicals and functional groups of dried pineapple (Ananas Comosus) slices,” *Int. J. Food Eng.*, vol. 17, pp. 265–274, 2021.



บรรณานุกรม





พหุณฺ์ ปณฺุ ทิตฺ สวี

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	จตุพล สายจันทา
วันเกิด	25 พฤศจิกายน 2534
สถานที่เกิด	อุบลราชธานี
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	355/81 หมู่1 ตำบล ท่าสองคอน อำเภอ เมือง จังหวัด มหาสารคาม 44000
ตำแหน่งหน้าที่การงาน	นักวิชาการศึกษา
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2558 ระดับปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต เทคโนโลยีเครื่องจักรกล เกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม

พูนัน ปณฺ ทิโต ชีเว