



การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบขั้นตอนสำหรับการเตรียมถั่วแดงหุงสุกเร็ว

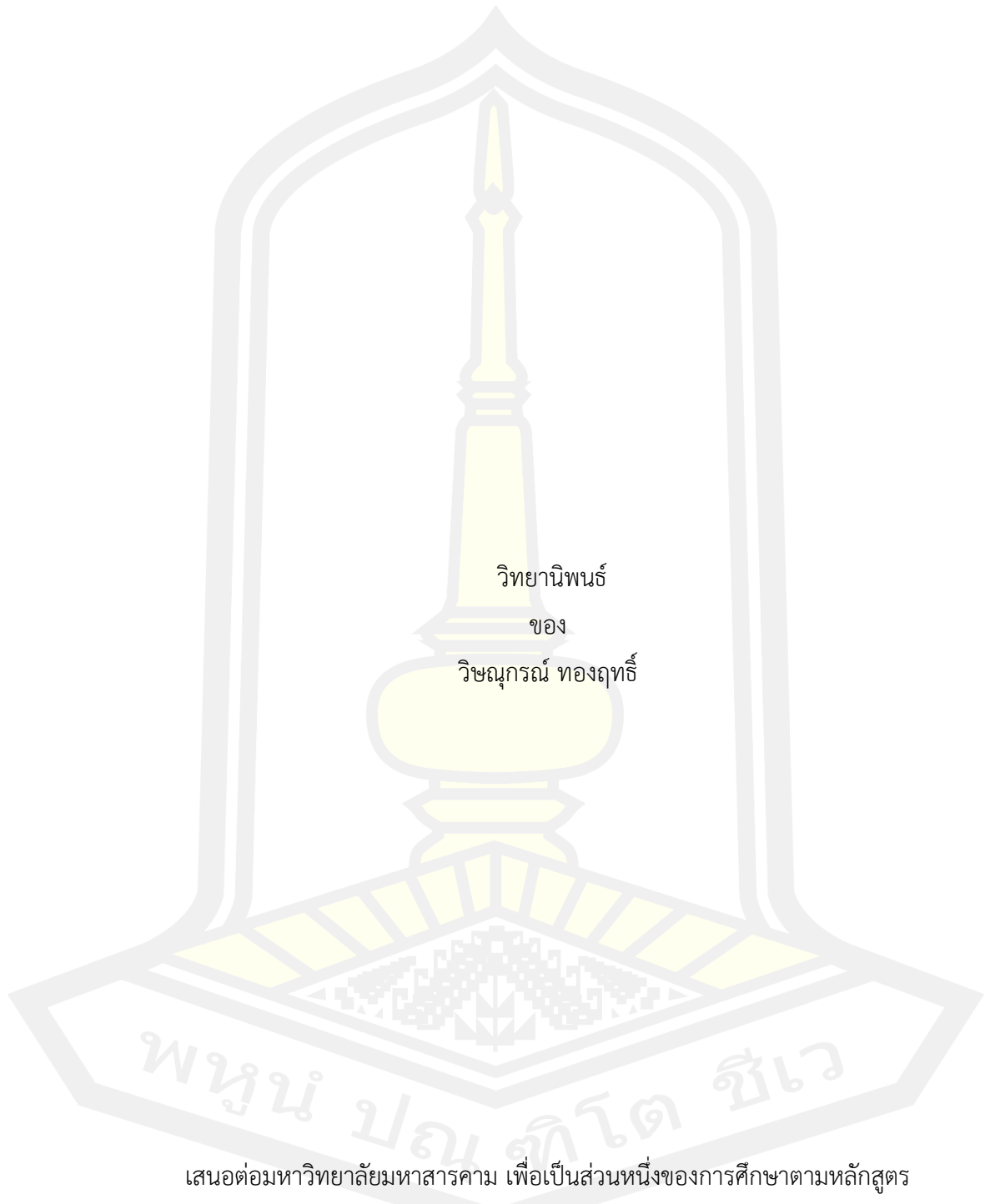
วิทยานิพนธ์
ของ
วิษณุกรณ์ ทองฤทธิ

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

มกราคม 2566

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบขั้นตอนสำหรับการเตรียมถั่วแดงหุงสุกเร็ว

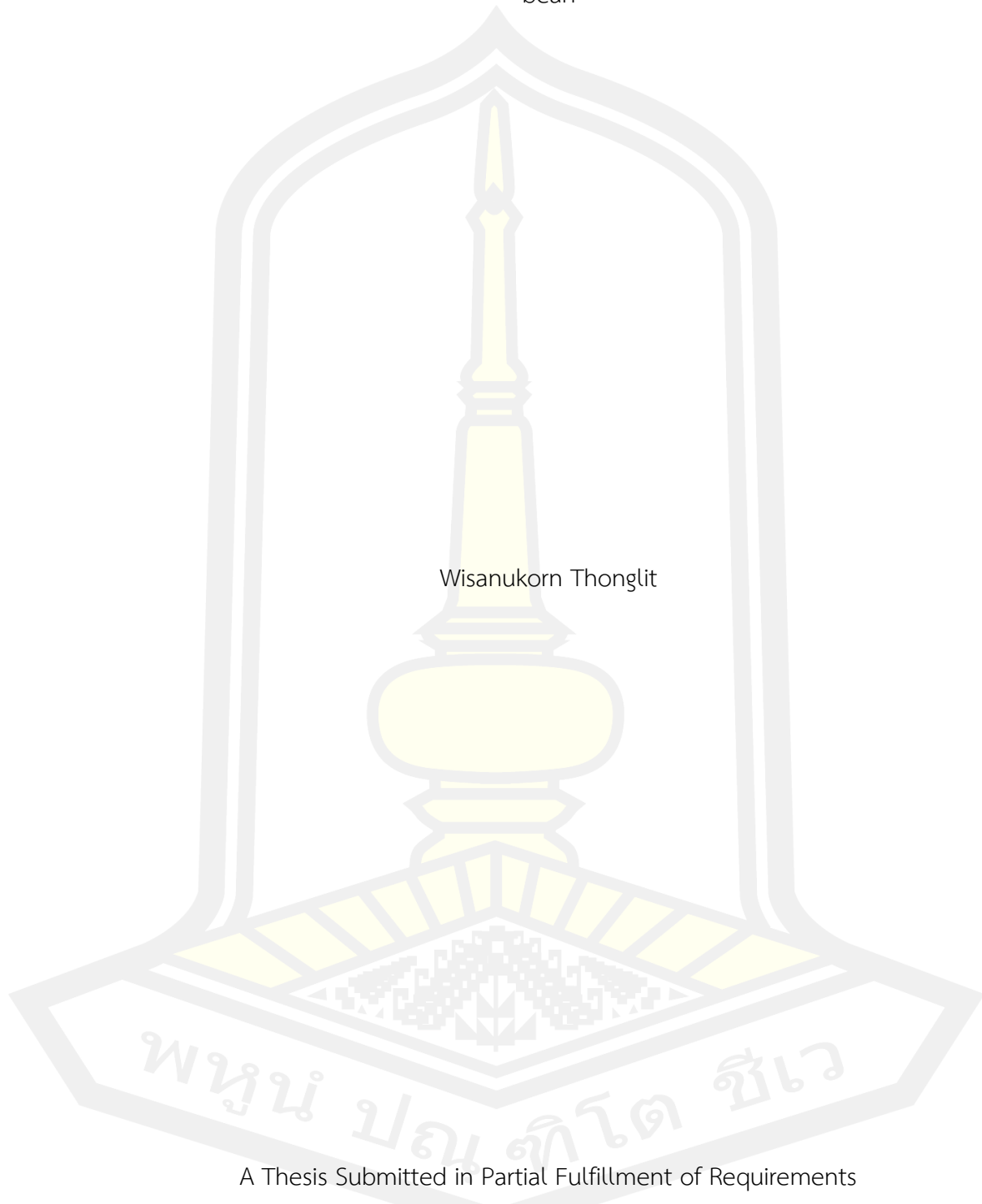


เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

มกราคม 2566

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Stepwise hot-air drying combined with microwave for preparing quick-cooking kidney
bean



Wisanakorn Thonglit

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

January 2023

Copyright of Maharakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายวิชณุกรณ์ ทองฤทธิ
แล้วเห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร. ดลฤดี ใจสุทธิ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รศ. ดร. วสันต์ ดำรงคำจันทร์)

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. ละมุล วิเศษ)

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. ณัฐพล ภูมิสะอาด)

มหาวิทยาลัยขอนแก่นให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

.....
(รศ. ดร. เกียรติศักดิ์ ศรีประทีป)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

.....
(รศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง	การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบขั้นตอนสำหรับการเตรียมถั่วแดง หุงสุกเร็ว		
ผู้วิจัย	วิษณุภรณ์ ทองฤทธิ		
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. วสันต์ ต้วงค์จันทร์		
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต	สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม	ปีที่พิมพ์	2566

บทคัดย่อ

ถั่วแดงเป็นธัญพืชที่ประกอบด้วยองค์ประกอบที่มีคุณค่าทางโภชนาการมากมาย อย่างไรก็ตามการบริโภคถั่วแดงจำเป็นต้องทำการหุงสุกก่อนซึ่งใช้เวลาค่อนข้างนานและขั้นตอนที่ซับซ้อน ดังนั้นการแปรรูปถั่วแดงหุงสุกเร็วจึงอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับผู้บริโภคที่ต้องการความรวดเร็วและความสะดวกสบาย กระบวนการผลิตถั่วแดงหุงสุกเร็ว ได้แก่ การแช่ การต้ม และการอบแห้ง การอบแห้งเป็นวิธีที่ช่วยให้ผลิตภัณฑ์มีอายุการเก็บรักษาที่ยาวนานขึ้น ส่วนใหญ่มักใช้การอบแห้งด้วยลมร้อนกับธัญพืชซึ่งเป็นวิธีที่ควบคุมการทำงานง่ายและไม่ซับซ้อน แต่มีข้อจำกัดที่สำคัญ คือ ใช้เวลาในการอบแห้งที่นาน ส่งผลต่อการเสื่อมคุณภาพทางกายภาพ สารออกฤทธิ์สำคัญต่าง ๆ และคุณสมบัติการคั่วตัว ในปัจจุบันมีการพัฒนาการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนมาใช้ในการแปรรูปผลิตภัณฑ์ ทำให้ช่วยลดระยะเวลาการอบแห้ง และทำให้โครงสร้างภายในผลิตภัณฑ์เกิดความเปราะพรุนสูง แต่อย่างไรก็ตามยังประสบปัญหาในด้านการกระจายคลื่นที่ไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้วัสดุโดยเฉพาะวัสดุจำพวกเมล็ดธัญพืชได้รับคลื่นไม่ทั่วถึง ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ศึกษาปัจจัยต่าง ๆ สำหรับการอบแห้งถั่วแดงหุงสุกเร็วที่ส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ และหาสภาวะที่เหมาะสม โดยมีการอบแห้ง 3 ปัจจัย ๆ ละ 3 ระดับ ได้แก่ 1)อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 70 80 และ 90 องศาเซลเซียส 2)กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 150 300 และ 450 วัตต์ 3)ความเร็วรอบของจานหมุนเท่ากับ 4 8 และ 12 รอบต่อนาที นอกจากนี้การทดลองแบบ Full factorial จะได้จำนวนการทดลองทั้งหมด 27 การทดลอง

อัตราส่วนความชื้น (MR) ที่ได้ในแต่ละการทดลองจะถูกเปรียบเทียบกับแบบจำลองเอมพิริกัล จำนวน 12 สมการ พบว่า ส่วนใหญ่มีค่า R^2 มากกว่า 0.9 โดยเฉพาะอย่างยิ่งสมการที่ประกอบด้วยพารามิเตอร์มากกว่า 2 ตัวขึ้นไป ซึ่งแบบจำลอง Midilli et al. เหมาะสมที่สุดสำหรับ Fit ข้อมูลที่ได้จากการอบแห้งในทุกสภาวะการอบแห้ง อย่างไรก็ตามสมการการอบแห้งของ Midilli et al. ประกอบด้วยพารามิเตอร์ 4 ตัว การนำไปใช้ในทางปฏิบัติเพื่อศึกษาพฤติกรรมและศึกษา

ออกแบบสภาวะที่เหมาะสมอาจเกิดความยุ่งยาก ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการศึกษาในหัวข้อต่อไปจึงได้นำแบบจำลองการอบแห้งของ Page ซึ่งมีค่า R^2 สูงกว่า 0.99 และมีค่าความผิดพลาดต่ำในทุกสภาวะการอบแห้ง ไปใช้เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการอบแห้งของถั่วแดงหุงสุกเร็วที่เตรียมด้วยวิธีการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ ซึ่งจะได้ค่าพารามิเตอร์ของสมการของ Page คือค่าคงที่อัตรา (k) และค่าคงที่เลขชี้กำลัง (n) พบว่า การเพิ่มความร้อนด้วยไมโครเวฟนั้นทำให้ค่าคงที่อัตรา (k) สูงกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนอย่างเดียว ซึ่งแสดงให้เห็นถึงคลื่นไมโครเวฟทำให้โมเลกุลของน้ำภายในวัสดุเกิดการหมุนและความร้อนที่ระดับอุณหภูมิค่าหนึ่งซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกดูดซับด้วยโมเลกุลน้ำ ทำให้น้ำในวัสดุเกิดการระเหยและเคลื่อนที่ออกสู่ผิวภายนอกอย่างรวดเร็ว

การศึกษาสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสม พบว่า ค่า Desirability สูงสุด คือสภาวะการอบแห้งที่อุณหภูมิลมร้อน 90 องศาเซลเซียส กำลังวัตต์ไมโครเวฟ 450 วัตต์ และความเร็วรอบของจานหมุน 6.98 รอบต่อนาที อย่างไรก็ตาม เพื่อให้สะดวกในเชิงปฏิบัติความเร็วรอบของจานหมุนที่เหมาะสมจะใช้ที่ 7 รอบต่อนาที เนื่องจากการใช้กำลังวัตต์ไมโครเวฟที่สูงจะส่งผลให้บริเวณผิวหน้าหรือส่วนขอบของผลิตภัณฑ์เกิดความร้อนที่รวดเร็วมากจนเกิดการไหม้ และทำลายกลิ่นรสของผลิตภัณฑ์สุดท้ายได้ ดังนั้นจึงได้ศึกษาการอบแห้งด้วยลมร้อนและการให้กำลังวัตต์ไมโครเวฟแบบขั้นตอน พบว่า ผลดัชนีการประเมินสังเคราะห์เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการใช้การยอมรับของผู้บริโภคเป็นเกณฑ์ (S_c) ที่มีค่าสูงสุด คือ สภาวะการอบแห้งที่อุณหภูมิลมร้อน 90 องศาเซลเซียส และให้การกำลังวัตต์ไมโครเวฟแบบ Step-down จาก 300 วัตต์ เป็น 150 วัตต์ ดังนั้นสภาวะการอบแห้งดังกล่าวจึงเป็นสภาวะที่เหมาะสมของการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟสำหรับการเตรียมถั่วแดงหุงสุกเร็ว

คำสำคัญ : ถั่วแดง, ถั่วแดงหุงสุกเร็ว, การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ, ไมโครเวฟ, คุณลักษณะการอบแห้ง

TITLE	Stepwise hot-air drying combined with microwave for preparing quick-cooking kidney bean		
AUTHOR	Wisanakorn Thonglit		
ADVISORS	Associate Professor Wasan Duangkhamchan , Ph.D.		
DEGREE	Master of Engineering	MAJOR	Mechanical Engineering
UNIVERSITY	Maharakham University	YEAR	2023

ABSTRACT

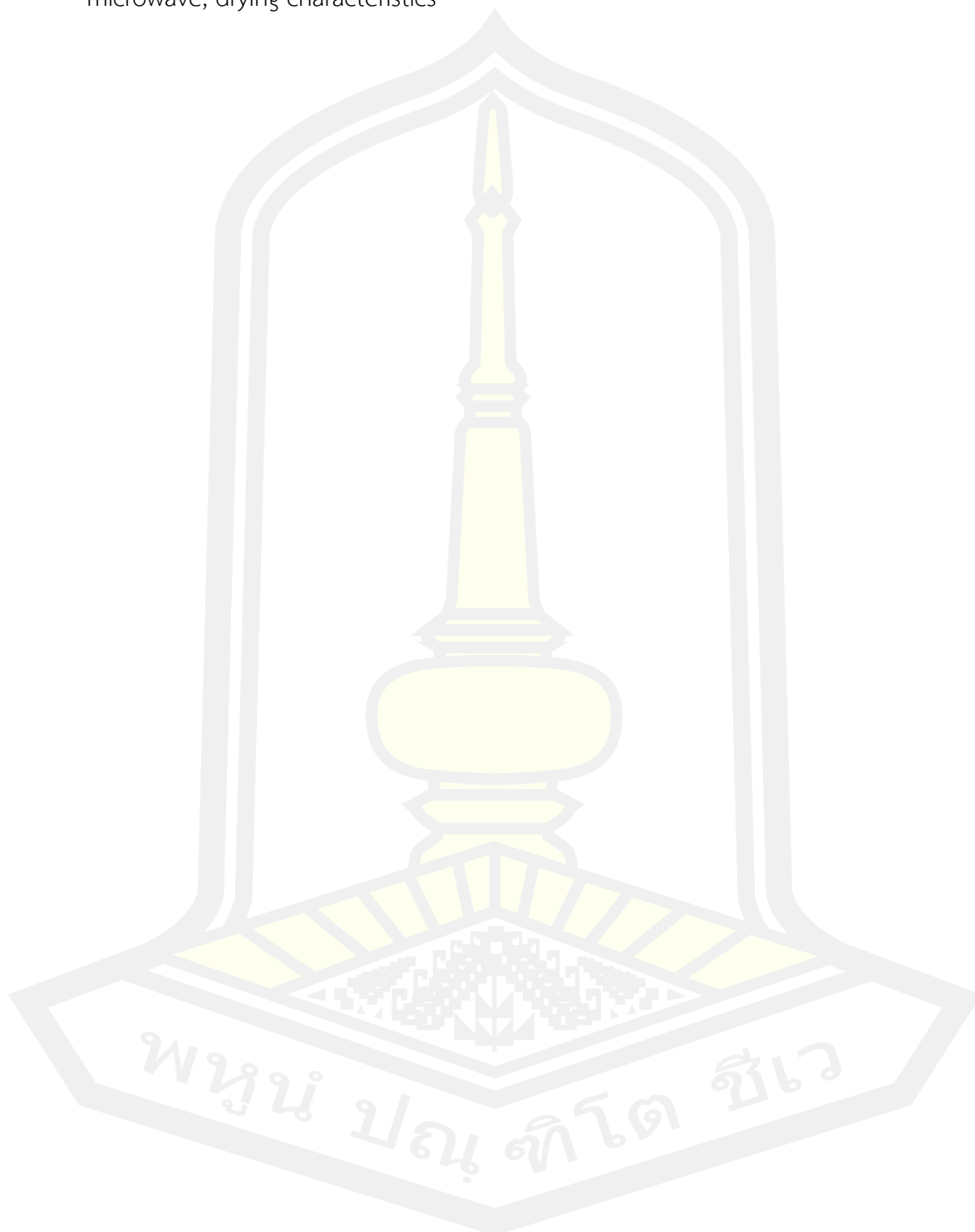
Red beans are grains that contain many nutritious elements. However, red bean consumption needs to be cooked first, which takes quite a long time and steps complicated. Therefore, fast-cooking red bean processing is another option for consumers who need it urgently and comfort Production process of quick cooked red bean these include soaking, boiling and drying. Freeze drying is a way to help products have a longer shelf life. Air drying is most often used. It's easy to control and uncomplicated. But there are important limitations is to spend time in long drying affecting physical quality deterioration Key active ingredients and their properties Recovery: Nowadays, microwave drying combined with hot air has been developed for processing product. This reduces the drying time. and make the internal structure of the product a hole High porosity, but still faces the problem of uneven wave distribution. resulting material Particularly, grain-type materials do not receive waves evenly. Therefore, this thesis studies various factors for drying the red beans that are cooked quickly that affects the quality of the product. and find suitable conditions with 3 drying factors, 3 levels each 1) the hot air temperature was 70, 80 and 90 degrees. Celsius. 2) Microwave wattage is 150, 300 and 450 watts. 3) Rotating speed of the turntable is 4, 8 and 12 rpm. In addition, the full factorial experiment yields the total number of trials. 27 experiments.

The moisture ratio (MR) obtained in each experiment was compared with the model. Empirical results of 12 equations found that most of them had an R²

value greater than 0.9, especially the equations contains two or more parameters. which Midilli et al. model is most suitable for fit data obtained from drying in all drying conditions. However, the Midilli drying equation et al. consists of four parameters. practical application to study behavior and study designing the right conditions can be tricky. Therefore, to make it easier to study the next topic, it has been brought page drying model with an R2 value greater than 0.99. and has a low error value in all conditions drying was used to study the drying behavior of fast-cooked red beans prepared by the freeze-drying method. Hot air combined with microwave heating which will get the parameters of Page's equation is for the rate constant (k) and the exponential constant (n), it was found that the microwave heating increased the constant. The rate (k) is higher than that of hot air drying alone. which demonstrates that microwave waves cause the molecules of the water inside the material is rotated and heated to a certain temperature depending on the wave load. electromagnets absorbed by water molecules causing the water in the material to evaporate and move to the surface outside quickly.

The study of optimum drying conditions found that the highest desirability was the drying condition drying at hot air temperature 90 degrees Celsius, microwave power 450 watts and speed of rotation of turntable 6.98 rpm. However, for practical convenience, the rotational speed of the turntable It is suitable to be used at 7 rpm because the use of high wattage microwaves will result in the surface area or the edge of the product heats up so quickly that it burns and destroys the flavor of final product Therefore, hot air drying and microwave power were studied. Step It was found that the result of the synthetic evaluation index when considering the efficiency of using the acceptance of the consumer is the highest-valued criterion (SC). is the drying condition at 90 °C hot air temperature and provide step-down microwave power from 300 watts to 150 watts, so the drying conditions Thus, it is the optimum condition of hot air drying combined with microwave for bean preparation red, quickly cook.

Keyword : red bean, quick-cooking red bean, hot air drying with microwave,
microwave, drying characteristics



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยคามอนุเคราะห์จากทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้อง ซึ่งผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทาลัยมหาสารคาม สนับสนุนทุนสำหรับการทำวิจัย และภาควิชาเทคโนโลยีเครื่องกล วิทยาลัยการอาชีพพนมรินทร์อาชีวะศึกษา สถาบันการอาชีวะภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 2 อำนวยสถานที่สร้างเครื่องมือ ในการทดลอง ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.วสันต์ ต้วงคำจันทร์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ซึ่งได้ชี้แนะแนวทาง ความกรุณาให้ความรู้ คำแนะนำอย่างเอาใจใส่ในทุกขั้นตอนของการทำวิทยานิพนธ์ทั้งในการทดลอง การเขียนวิทยานิพนธ์ ตลอดจนการแก้ไขปัญหาต่างๆ ทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ตลฤดี ใจสุทธิ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพล ภูมิสะอาด และ ผู้ช่วย ศาสตราจารย์ ดร.ละมุล วิเศษ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งให้ความกรุณาตรวจสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนการสอนวิชาการความรู้ต่างๆ แนะนำการแก้ไขปัญหาต่างๆ และประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ในด้านต่าง ๆ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ บิดา และมารดา ที่คอยให้กำลังใจ เอาใจใส่ดูแลและสนับสนุนทุกสิ่งทุกอย่าง ด้วยดีโดยเฉพาะการให้กำลังใจ และคำแนะนำในการดำเนินชีวิตแก่ข้าพเจ้าตลอดมา

หากเนื้อหาหรือข้อมูลต่างๆ ในวิทยานิพนธ์นี้เป็นประโยชน์แก่ผู้สนใจศึกษาและผู้วิจัยท่านอื่นๆ ข้าพเจ้าขอขอบคุณความดีทั้งหลายนี้ให้แก่บุคคลทุกท่านที่กล่าวมา ท้ายสุดหากวิทยานิพนธ์เล่มนี้มีข้อบกพร่องหรือผิดพลาดประการใด ข้าพเจ้ากราบขออภัยไว้ ณ ที่นี้

วิษณุกรณ์ ทองฤทธิ

พหุณ ปณุ ทิโต ชีเว

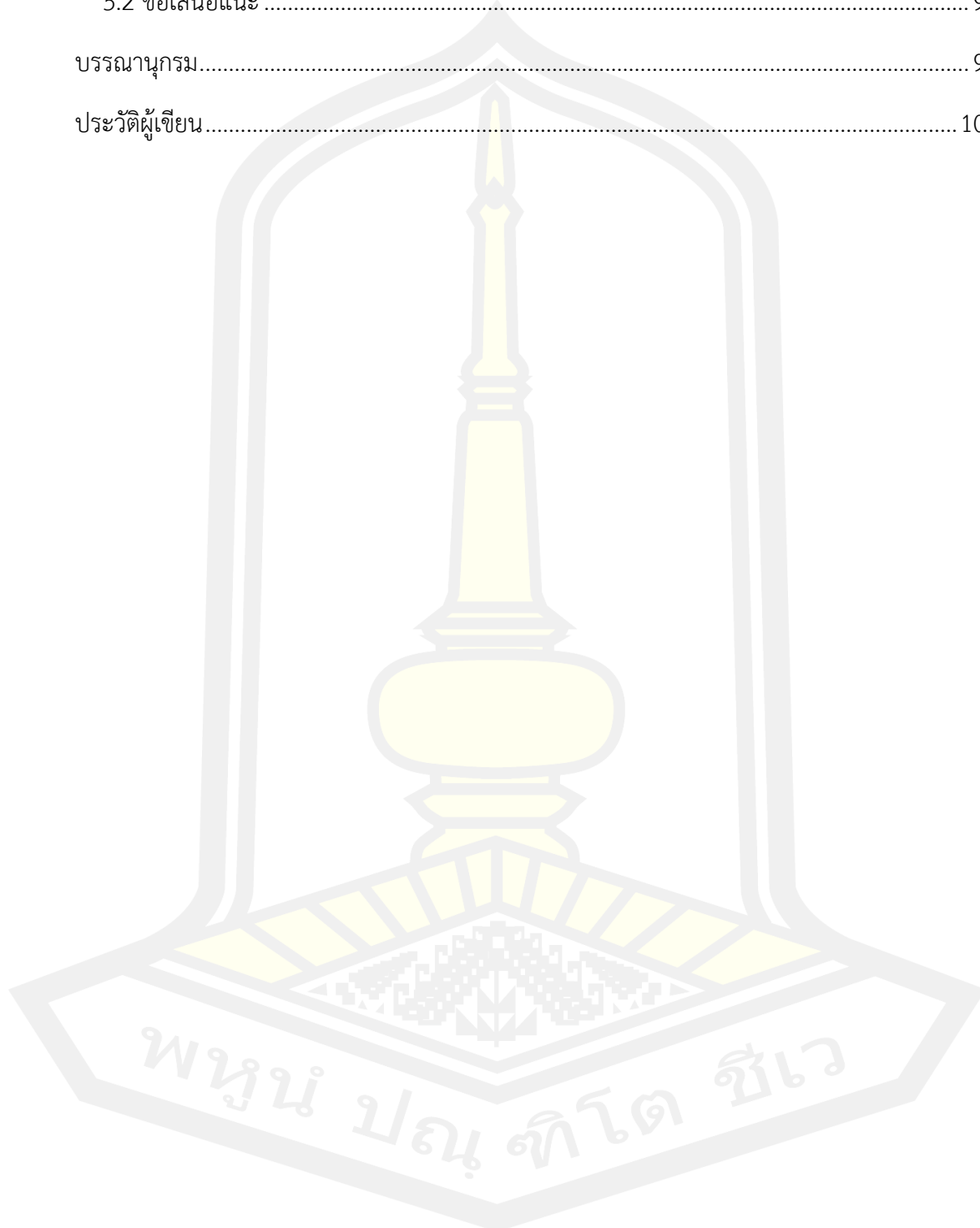
สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ฉ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ญ
สารบัญตาราง.....	จ
สารบัญภาพประกอบ.....	ถ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 หลักการและเหตุผล	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับถั่วแดง	3
2.2 กระบวนการผลิตถั่วแดงหุงสุกเร็ว	6
2.2.1 การแช่-ต้ม-ทำแห้ง	6
2.2.2 การทำให้เกิดการพองตัว (Puffing/Pre-gelatinization).....	7
2.2.3 การใช้ Puffing gun	8
2.2.4 วิธีการทำแห้งสำหรับถั่วแดงหุงสุกเร็ว.....	8
2.3 ทฤษฎีการอบแห้ง	8
2.4 ทฤษฎีการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ	10
2.4.1 การอบแห้งด้วยไมโครเวฟ (Microwave drying)	11

2.4.2	ข้อจำกัดของการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ.....	12
2.4.3	การใช้พลังงานไมโครเวฟร่วมในการอบแห้งด้วยลมร้อน.....	13
2.4.4	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับการใช้คลื่นไมโครเวฟ.....	13
2.4.5	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้คลื่นไมโครเวฟร่วมกับระบบการอบแห้งชนิดอื่น ๆ	15
2.5	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการแปรรูปถั่วแดงหุงสุกเร็ว	17
2.6	วิธีพินิจตรวจสอบ	18
2.6.1	การออกแบบส่วนประสมกลาง (Central composite design หรือ CCD)	19
2.6.2	การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken design).....	19
บทที่ 3	วิธีการดำเนินการศึกษา	21
3.1	วิธีการเตรียมตัวอย่าง	22
3.2	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	22
3.2.1	เครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ	22
3.2.2	เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองและเก็บรวบรวมข้อมูล	23
3.3	วิธีการทดลองและเก็บข้อมูล	24
3.3.1	การวางแผนการทดลอง	24
3.3.2	การวิเคราะห์คุณภาพ	26
3.3.3	ค่าการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ	28
3.3.4	การหาจลนศาสตร์การอบแห้ง	28
3.3.5	การวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น	30
3.3.6	การหาจลนศาสตร์การคืนรูป (Rehydration kinetics)	31
3.3.7	การหาสถานะที่เหมาะสม (Optimization).....	32
3.3.8	ขั้นตอนการอบแห้งแบบ Step up และ Step down.....	33
3.4	แผนการดำเนินการศึกษา.....	34
3.5	สถานที่ดำเนินการศึกษา	35

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	36
4.1 ผลการศึกษาจลนศาสตร์การอบแห้งถั่วแดงหุงสุกเร็วด้วยวิธีการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ.....	36
4.1.1 การศึกษาจลนศาสตร์การอบแห้งถั่วแดงหุงสุกเร็ว ด้วยวิธีการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ โดยอุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 70 80 และ 90 องศาเซลเซียส กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 150 วัตต์ 300 วัตต์ และ 450 วัตต์ และความเร็วรอบของถังหมุนเท่ากับ 4 รอบต่อนาที 8 รอบต่อนาที และ 12 รอบต่อนาที ตามลำดับ ความชื้นเริ่มต้นของถั่วแดงหุงสุกในทุกสภาวะการอบแห้งที่ทดสอบในวิทยานิพนธ์นี้มีค่าร้อยละ 64.98 ± 0.31 ฐานเปียก เมื่อพิจารณาความชื้นสุดท้ายของตัวอย่างถั่วแดงหุงสุกเร็วที่ต้องการซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 10 ฐานเปียก	36
4.1.2 พฤติกรรมการอบแห้งของถั่วแดงหุงสุก.....	37
4.1.3 แบบจำลองการอบแห้ง.....	43
4.1.4 สมการความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ของแบบจำลองการอบแห้งของ Page	58
4.2 ผลการศึกษาสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสม.....	62
4.2.1 ผลตอบสนอง.....	62
4.2.2 สภาวะการอบแห้งที่เหมาะสม	81
4.3 ผลการศึกษาการอบแห้งถั่วแดงหุงสุกแบบขั้นตอน	82
4.4 การวิเคราะห์การประเมินสังเคราะห์ (Synthetic evaluation analysis).....	89
4.4.1 Consumer's acceptability aspect	90
.....	92
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	92
5.1 สรุปผล.....	92
5.1.1 สรุปผลการศึกษาจลนศาสตร์การอบแห้งถั่วแดงหุงสุกเร็วด้วยวิธีการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ	92
5.1.2 ผลการศึกษาสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสม	92
5.1.3 การศึกษาการอบแห้งแบบขั้นตอน	93

5.1.3 การวิเคราะห์การประเมินสังเคราะห์.....	93
5.2 ข้อเสนอแนะ	93
บรรณานุกรม.....	95
ประวัติผู้เขียน.....	105

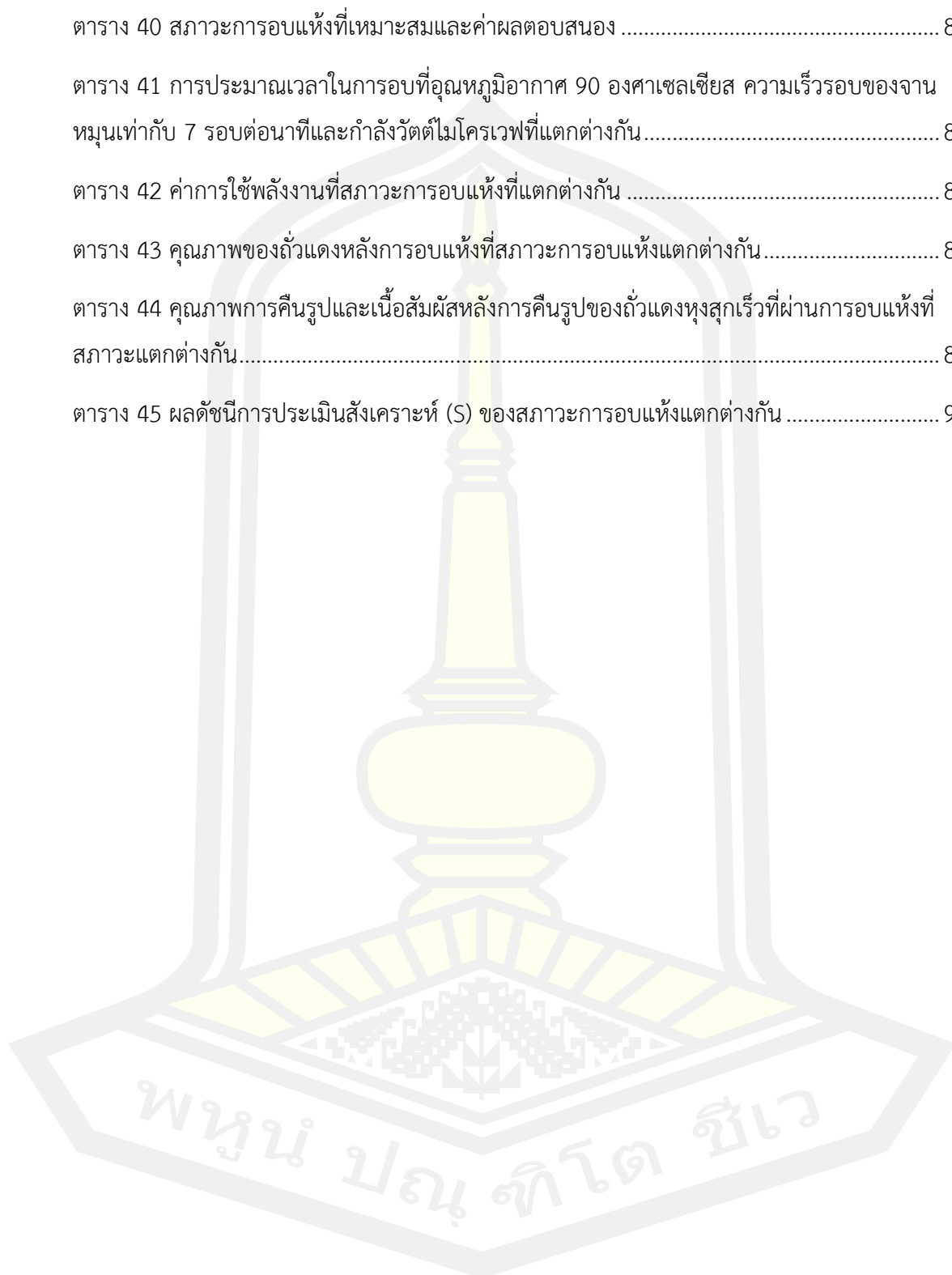


สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 สภาวะการทดลองที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบ Full factorial design	24
ตาราง 2 รูปแบบสมการพื้นฐานที่ใช้ทำนายการอบแห้งวัสดุชิ้นบาง [50].....	30
ตาราง 3 สภาวะการทดลองสำหรับ Step Up และ Step down.....	34
ตาราง 4 แผนการดำเนินการศึกษา	34
ตาราง 5 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 70 องศาเซลเซียส กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 150 วัตต์ และความเร็วรอบของจานหมุนเท่ากับ 4 รอบต่อนาที.....	43
ตาราง 6 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 70 องศาเซลเซียส กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 150 วัตต์ และความเร็วรอบของจานหมุนเท่ากับ 8 รอบต่อนาที.....	44
ตาราง 7 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 70 องศาเซลเซียส กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 150 วัตต์ และความเร็วรอบของจานหมุนเท่ากับ 12 รอบต่อนาที.....	44
ตาราง 8 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 70 องศาเซลเซียส กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 300 วัตต์ และความเร็วรอบของจานหมุนเท่ากับ 4 รอบต่อนาที.....	45
ตาราง 9 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 70 องศาเซลเซียส กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 300 วัตต์ และความเร็วรอบของจานหมุนเท่ากับ 8 รอบต่อนาที.....	45
ตาราง 10 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 70 องศาเซลเซียส กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 300 วัตต์ และความเร็วรอบของจานหมุนเท่ากับ 12 รอบต่อนาที.....	46

ตาราง 29 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 90 องศาเซลเซียส กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 450 วัตต์ และความเร็วรอบของจานหมุนเท่ากับ 4 รอบต่อนาที.....	55
ตาราง 30 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 90 องศาเซลเซียส กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 450 วัตต์ และความเร็วรอบของจานหมุนเท่ากับ 8 รอบต่อนาที.....	56
ตาราง 31 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 90 องศาเซลเซียส กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 450 วัตต์ และความเร็วรอบของจานหมุนเท่ากับ 12 รอบต่อนาที.....	56
ตาราง 32 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 70 องศาเซลเซียส กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 0 วัตต์ และความเร็วรอบของจานหมุนเท่ากับ 8 รอบต่อนาที.....	57
ตาราง 33 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 0 วัตต์ และความเร็วรอบของจานหมุนเท่ากับ 8 รอบต่อนาที.....	57
ตาราง 34 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 90 องศาเซลเซียส กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 0 วัตต์ และความเร็วรอบของจานหมุนเท่ากับ 8 รอบต่อนาที.....	58
ตาราง 35 พารามิเตอร์ของสมการการอบแห้งของ Page เวลาการอบแห้ง และค่าสัมประสิทธิ์แปรผันความชื้นประสิทธิผลที่สภาวะการอบแห้งแตกต่างกัน	59
ตาราง 36 พารามิเตอร์ทางสถิติสำหรับการสมการความสัมพันธ์ที่เหมาะสมของค่าคงที่อัตราการอบแห้ง k	61
ตาราง 37 พารามิเตอร์ทางสถิติสำหรับการสมการความสัมพันธ์ที่เหมาะสมของค่าคงที่เลขชี้กำลัง n	62
ตาราง 38 ผลตอบสนองที่พารามิเตอร์การอบแห้งแตกต่างกัน.....	63
ตาราง 39 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน ANOVA ของ Fitted model สำหรับผลตอบสนองทั้งหมดที่ใช้ในการหาสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสม	65

ตาราง 40 สภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมและค่าผลตอบสนอง	82
ตาราง 41 การประมาณเวลาในการอบที่อุณหภูมิอากาศ 90 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบของจานหมุนเท่ากับ 7 รอบต่อนาทีและกำลังวัตต์ไมโครเวฟที่แตกต่างกัน.....	83
ตาราง 42 ค่าการใช้พลังงานที่สภาวะการอบแห้งที่แตกต่างกัน	83
ตาราง 43 คุณภาพของถั่วแดงหลังการอบแห้งที่สภาวะการอบแห้งแตกต่างกัน.....	87
ตาราง 44 คุณภาพการคืนรูปและเนื้อสัมผัสหลังการคืนรูปของถั่วแดงหุงสุกเร็วที่ผ่านการอบแห้งที่สภาวะแตกต่างกัน.....	88
ตาราง 45 ผลดัชนีการประเมินสังเคราะห์ (S) ของสภาวะการอบแห้งแตกต่างกัน	91



สารบัญภาพประกอบ

	หน้า
ภาพประกอบ 1 รูปร่างของถั่วแดง	3
ภาพประกอบ 2 อัตราการอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่และอัตราการอบแห้งลดลง	10
ภาพประกอบ 3 ระบบการอบแห้งด้วยไมโครเวฟเพื่อใช้ในการศึกษาต่าง ๆ	12
ภาพประกอบ 4 แผนผังการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ	16
ภาพประกอบ 5 ระบบการอบแห้งแบบสเปาเตดเบตร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ	17
ภาพประกอบ 6 การออกแบบส่วนประสมกลาง	19
ภาพประกอบ 7 การออกแบบบ็อกซ์-เบ็นเคน	19
ภาพประกอบ 8 ภาพรวมของขั้นตอนการศึกษา	21
ภาพประกอบ 9 ชุดไมโครเวฟสำหรับการเตรียมถั่วแดงหุงสุกเร็ว	23
ภาพประกอบ 10 อัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นของถั่วแดงหุงสุกเร็วที่อบแห้งที่อุณหภูมิร้อนกำลังวัตต์ไมโครเวฟ และความเร็วรอบของจานหมุนแตกต่างกัน	36
ภาพประกอบ 11 กราฟอัตราส่วนความชื้นและเวลาการอบแห้งที่อุณหภูมิร้อนเท่ากับ 70 องศาเซลเซียสที่กำลังวัตต์ของไมโครเวฟแตกต่างกัน และความเร็วรอบของจานหมุนเท่ากับ (ก) 4 รอบต่อนาที (ข) 8 รอบต่อนาที และ (ค) 12 รอบต่อนาที	38
ภาพประกอบ 12 กราฟอัตราส่วนความชื้นและเวลาการอบแห้งที่อุณหภูมิร้อนเท่ากับ 80 องศาเซลเซียสที่กำลังวัตต์ของไมโครเวฟแตกต่างกัน และความเร็วรอบของจานหมุนเท่ากับ (ก) 4 รอบต่อนาที (ข) 8 รอบต่อนาที และ (ค) 12 รอบต่อนาที	41
ภาพประกอบ 13 กราฟอัตราส่วนความชื้นและเวลาการอบแห้งที่อุณหภูมิร้อนเท่ากับ 90 องศาเซลเซียสที่กำลังวัตต์ของไมโครเวฟแตกต่างกัน และความเร็วรอบของจานหมุนเท่ากับ (ก) 4 รอบต่อนาที (ข) 8 รอบต่อนาที และ (ค) 12 รอบต่อนาที	42
ภาพประกอบ 14 พล็อตของ (ก) Normal probability vs. Studentized residuals (ข) Box-Cox for power transformation (ค) Residual against run number และ (ง) Residuals against predicted drying-rate constant	68

ภาพประกอบ 15 ผลของอุณหภูมิและกำลังวัตต์ไมโครเวฟต่อค่าคงที่อัตราการอบแห้งที่ความเร็วรอบของจานหมุนเท่ากับ (ก) 4 รอบต่อนาที (ข) 8 รอบต่อนาที และ (ค) 12 รอบต่อนาที..... 69

ภาพประกอบ 16 พล็อตของ (ก) Normal probability vs. Studentized residuals (ข) Box-Cox for power transformation (ค) Residual against run number และ (ง) Residuals against predicted drying time 72

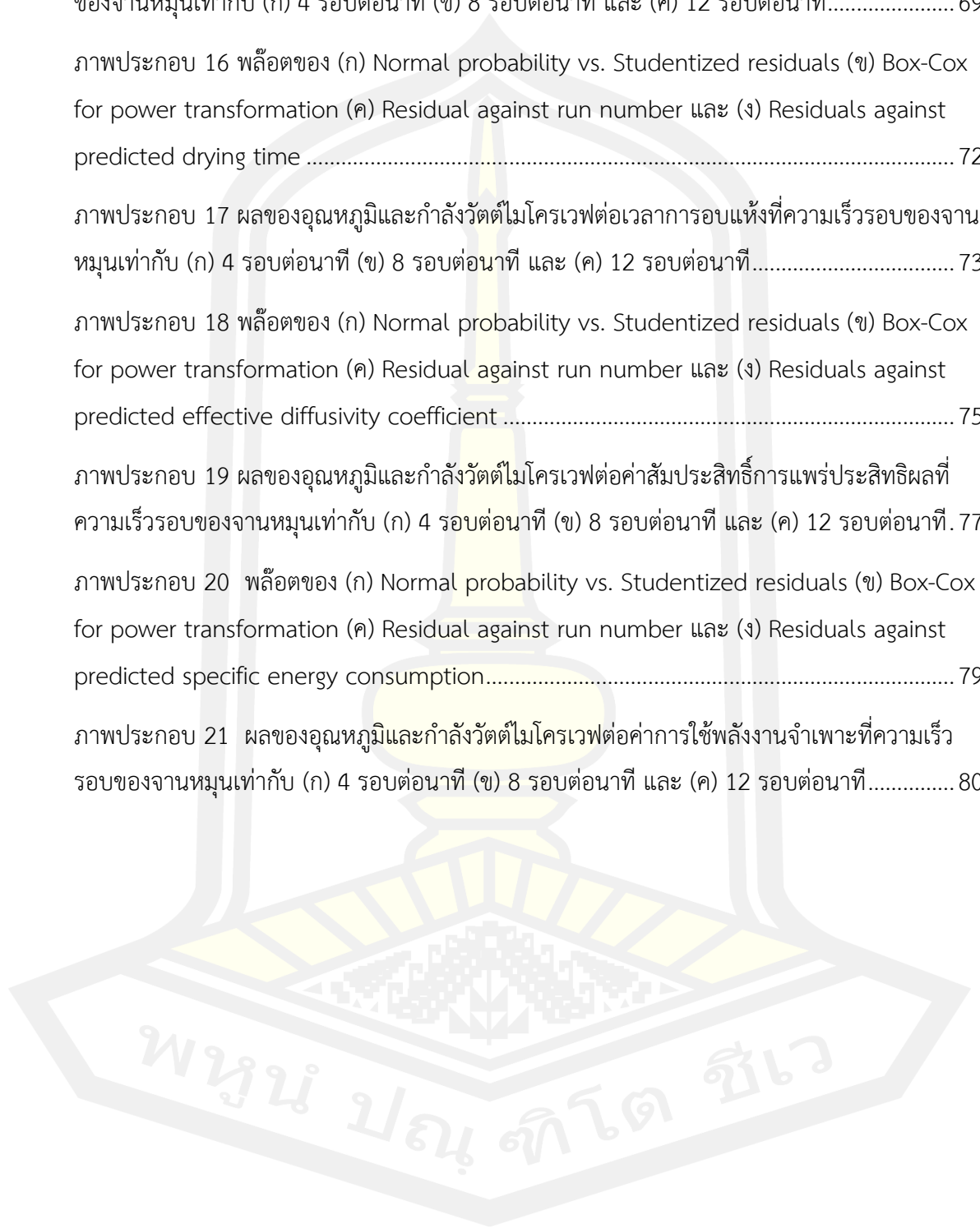
ภาพประกอบ 17 ผลของอุณหภูมิและกำลังวัตต์ไมโครเวฟต่อเวลาการอบแห้งที่ความเร็วรอบของจานหมุนเท่ากับ (ก) 4 รอบต่อนาที (ข) 8 รอบต่อนาที และ (ค) 12 รอบต่อนาที..... 73

ภาพประกอบ 18 พล็อตของ (ก) Normal probability vs. Studentized residuals (ข) Box-Cox for power transformation (ค) Residual against run number และ (ง) Residuals against predicted effective diffusivity coefficient 75

ภาพประกอบ 19 ผลของอุณหภูมิและกำลังวัตต์ไมโครเวฟต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลที่ความเร็วรอบของจานหมุนเท่ากับ (ก) 4 รอบต่อนาที (ข) 8 รอบต่อนาที และ (ค) 12 รอบต่อนาที. 77

ภาพประกอบ 20 พล็อตของ (ก) Normal probability vs. Studentized residuals (ข) Box-Cox for power transformation (ค) Residual against run number และ (ง) Residuals against predicted specific energy consumption..... 79

ภาพประกอบ 21 ผลของอุณหภูมิและกำลังวัตต์ไมโครเวฟต่อค่าการใช้พลังงานจำเพาะที่ความเร็วรอบของจานหมุนเท่ากับ (ก) 4 รอบต่อนาที (ข) 8 รอบต่อนาที และ (ค) 12 รอบต่อนาที..... 80



บทที่ 1

บทนำ

1.1 หลักการและเหตุผล

ในปัจจุบัน ถั่วแดง เป็นพืชตระกูลถั่วที่ค่อนข้าง จะรู้จักกันมากเพราะเป็นพืชที่ส่งออกผลผลิตที่ส่งออกประมาณ 20,000 - 30,000 ตันต่อปี มีมูลค่า 150 - 190 ล้านบาท ตลาดส่งออกถั่วนี้วางแดงของไทย ได้แก่ ญี่ปุ่น และ สาธารณรัฐเกาหลีใต้ ซึ่งส่วนใหญ่จะนำไปใช้ทำไส้ขนม การใช้ภายในประเทศมีน้อย จะส่งออกเกือบทั้งหมดปริมาณการผลิตของแต่ละปีขึ้นอยู่กับราคาที่เกษตรกรได้รับ แหล่งปลูกที่สำคัญคือ จังหวัดเลย (ปลูกมากที่อำเภอวังสะพุงและอำเภอเชียงคาน) และที่จังหวัดขอนแก่น พืชชนิดอื่น ๆ บ้างเล็กน้อย เช่น ที่จังหวัดเพชรบูรณ์และเชียงราย เป็นต้น [1]

ถั่วแดง (Kidney bean) เป็นถั่วชนิดหนึ่ง และเป็นพืชล้มลุกมีประโยชน์และสรรพคุณซึ่งประกอบด้วยสารอาหารและสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพมากมาย เช่น สารประกอบฟีนอลิก และสารประกอบพลาโวนอยด์ เป็นต้น ซึ่งมีคุณสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระ [2] นอกจากนี้ ถั่วแดงยังช่วยรักษาโรคเบาหวาน ช่วยบำรุงเลือด ลดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคหัวใจ และไต ช่วยขับปัสสาวะ ช่วยรักษาปวดข้อต่อ ช่วยรักษาปวดบวม ช่วยขับพิษ ช่วยบำรุงเลือด ช่วยขับน้ำนม ช่วยลดบวมผื่น แก้อาการเหน็บชา ช่วยบำรุงลำไส้ ช่วยลดความดันโลหิตสูง แก้อาการท้องผูก ช่วยขับถ่าย ช่วยรักษาหนอง ช่วยรักษาแผลอักเสบ ช่วยป้องกันโรคมะเร็งลำไส้ แก้อาการเสียดแน่นท้อง ช่วยลดคอเรสเตอรอลในเลือด ช่วยลดไขมันในเลือดน้ำตาลในเลือด [3]–[5]

การอบแห้งเป็นกระบวนการแปรรูปที่ช่วยให้ผลิตภัณฑ์มีอายุการเก็บรักษาที่ยาวนานขึ้น โดยการลดปริมาณน้ำอิสระหรือความชื้น (Water activity) ให้ต่ำจนถึงระดับที่สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ และการทำงานของเอนไซม์ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพในอาหาร นอกจากนั้นการลดความชื้นและปริมาตรของอาหารยังช่วยลดค่าใช้จ่ายและสะดวกในการเก็บรักษา และการขนส่ง [6], [7] นอกจากนี้วัตถุประสงค์หลักในการลดความชื้นในอยู่ในระดับที่ปลอดภัยแล้ว การอบแห้งยังเป็นหนึ่งในขั้นตอนที่สำคัญสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์พืชหุงสุกเร็ว ซึ่งส่วนใหญ่ มักใช้การอบแห้งธัญพืชที่ผ่านหุงสุกแล้วด้วยลมร้อนเพื่อให้แห้ง ซึ่งเป็นวิธีควบคุมการทำงานได้ง่ายและไม่ซับซ้อนแต่มีข้อจำกัดที่สำคัญ คือ ใช้เวลาในการอบแห้งที่นาน ส่งผลต่อการเสื่อมคุณภาพทางกายภาพ การสูญเสียสารอาหาร และสารออกฤทธิ์สำคัญต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณสมบัติการคืนตัวซึ่งส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพทางเนื้อสัมผัสหลังการคืนรูป ในปัจจุบันมีการพัฒนาการอบแห้งโดยการนำเทคนิคไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนมาใช้ในการแปรรูปผลิตผลเกษตรที่หลากหลาย และการ

ประยุกต์ใช้พลังงานไมโครเวฟในการอบแห้งมีประโยชน์หลายประการ ทั้งการลดระยะเวลาการอบแห้ง ทำให้เกิดความเป็นรูพรุน [8]–[10] แต่อย่างไรก็ตาม การอบแห้งร่วมกับไมโครเวฟยังประสบปัญหาในด้านการกระจายคลื่นที่ไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้วัสดุโดยเฉพาะวัสดุจำพวกเมล็ดธัญพืชได้รับคลื่นไม่ทั่วถึง ทำให้เกิดการไม่สม่ำเสมอของคุณภาพผลิตภัณฑ์ [11] ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับออกแบบสภาวะที่เหมาะสมต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1.2.1 เพื่อศึกษา และออกแบบ สร้างเครื่องอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ
- 1.2.2 เพื่อศึกษาปัจจัยการอบแห้งที่มีผลต่อคุณภาพทางกายภาพ คุณสมบัติการคั้นรูป และเนื้อสัมผัสของถั่วแดงหุงสุกเร็วหลังการคั้นรูป
- 1.2.3 เพื่อศึกษาหาสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมและทดลองการอบแห้งแบบขั้นตอนสำหรับเตรียมถั่วแดงหุงสุกเร็ว

1.3 ขอบเขตการศึกษา

- 1.3.1 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ คือ ถั่วแดง
- 1.3.2 เครื่องอบแห้งที่ใช้เป็นแบบลมร้อนและการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟขนาดระดับห้องปฏิบัติการ
- 1.3.3 อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 70 80 และ 90 องศาเซลเซียส
- 1.3.4 กำลังวัตต์ของไมโครเวฟเท่ากับ 150 300 และ 450 วัตต์
- 1.3.5 ความเร็วรอบของจานหมุนเท่ากับ 4 8 และ 12 รอบต่อนาที

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ได้ต้นแบบเครื่องอบแห้งสำหรับประยุกต์ใช้กับการผลิตผลิตภัณฑ์ถั่วแดงหุงสุกเร็ว
- 1.4.2 ทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ
- 1.4.3 ทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติการคั้นรูป และเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ถั่วแดงหุงสุกเร็วหลังการคั้นรูป

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการและทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องและต้องใช้ในวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้แก่ ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับถั่วแดง กระบวนการผลิตถั่วแดงหุงสุกเร็ว ทฤษฎีการอบแห้ง ทฤษฎีการอบแห้ง ด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับถั่วแดง

ถั่วแดง (kidney bean) คือ ถั่วที่รู้จักกันดีเพราะมีจำหน่ายอยู่มากตามท้องตลาด มีการนำมาปรุงเป็นอาหารทั้งคาวและหวาน มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Phasecolus Vulgaris* L. เป็นพืชที่อยู่ในวงศ์ Fabaceae หรือ Leguminosae เป็นพืชที่อยู่ในกลุ่มเดียวกับถั่วเขียว ถั่วเหลือง ถั่วดำ ถั่วลิสง ถั่วฝักยาวและถั่วพู มีชื่อสามัญว่า Kidney bean ที่หมายถึงถั่วรูปไตที่เรียกเช่นนั้นก็เพราะว่าเมล็ดของถั่วมีลักษณะคล้ายกับไต (ดังแสดงในภาพประกอบ 1) ในประเทศไทยได้นำเข้ามาปลูกในสมัยรัชกาลที่ 9 ซึ่งเป็นการปลูกเพื่อทดแทนการปลูกฝิ่น โดยในตอนแรกได้มีการสั่งซื้อเมล็ดพันธุ์มาจากแคลิฟอร์เนียเพื่อทำการทดลองปลูกเพื่อเป็นพืชทดแทน เมื่อทดลองปลูกปรากฏว่าได้ผลผลิตดีมาก และมีการตั้งชื่ออย่างเป็นทางการเป็นภาษาไทยว่า “ถั่วแดง” มาจากถั่วที่เป็นสีแดงและมีเมล็ดขนาดใหญ่ คำว่าหลวงในภาษาเหนือแปลว่าใหญ่ แต่ชาวบ้านทั่วไปมักเรียกสั้น ๆ ว่า “ถั่วแดง” ปัจจุบันนี้ ถั่วแดง หรือ ถั่วแดง คือ พืชเศรษฐกิจอีกชนิดหนึ่งของประเทศไทยที่มีการส่งออกไปยังต่างประเทศ นำเม็ดเงินเข้าสู่ประเทศปีละหลายล้านบาท โดยเฉพาะที่ประเทศญี่ปุ่นและเกาหลีได้มีการสั่งซื้อมากที่สุด [12]



ภาพประกอบ 1 รูปร่างของถั่วแดง

ที่มา: Medthai (2017) [13]

มาตรฐานคุณภาพเมล็ดถั่วแดง ประกอบด้วย

1. ขนาดเมล็ด (เฉลี่ย)

- ความกว้าง : 7.5-8.5 มิลลิเมตร
- ความยาว : 16.0-17.5 มิลลิเมตร
- ความหนา : 5.0-6.5 มิลลิเมตร
- น้ำหนัก 100 เมล็ด : 40-60 กรัม

2. เมล็ดสีแดงสด

- ค่าความสว่าง : 26-32 (ไม่ควรต่ำกว่า 24)
- ค่าสีแดง : 18-22 (ค่าสูงสุดไม่ควรเกิน 25)
- ค่าสีเหลือง : 10-15

ประโยชน์ถั่วแดง ประกอบด้วย

1. ถั่วแดงใช้ทำขนมของหวานหรืออาหารคาวต่าง ๆ โดยเฉพาะชาวอเมริกาและยุโรปที่นิยมกันมาก อาทิ ถั่วแดงต้มน้ำตาล ชูบถั่วแดง และคัสตาร์ดถั่วแดง เป็นต้น
2. ใช้เป็นส่วนผสมของอาหารเสริมหรือแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อาหารเสริม เพื่อสำหรับลดความอ้วน และป้องกันโรคเบาหวาน เนื่องจากถั่วแดงมีใยอาหารสูง ทำให้รู้สึกอิ่มนาน ไม่หิวบ่อย ช่วยในการลดความอ้วนได้อย่างดี
3. แบ่งถั่วแดงใช้สำหรับผลิตวุ้น
4. ถั่วแดงใช้ผสมทำข้าวหลาม ข้าวต้มมัด ใส่น้ำเต้าหู้ และทำไส้ขนมปัง เป็นต้น
5. ฝักอ่อนถั่วแดงนำมารับประทานสดหรือใช้ประกอบอาหาร ทำอาหารได้เหมือนกับถั่วแขก ถั่วพุ่มหรือถั่วฝักยาว แต่ควรเป็นฝักที่ด้านในยังมีเมล็ดอ่อนขนาดเล็ก ไม่ควรเป็นเมล็ดขนาดใหญ่ เพราะเปลือกฝักมีเสี้ยนมาก
6. ใช้เป็นส่วนผสมของอาหารเลี้ยงสัตว์ แต่ต้องทำให้สุกด้วยการต้มหรืออบเสียก่อน และไม่ควรให้รับประทานมาก เพราะจำทำให้สัตว์ท้องอืดได้ นอกจากนี้ ลำต้นและใบสดยังใช้เป็นอาหารเลี้ยงสัตว์ได้ดี

ประโยชน์ทางโภชนาการ ประกอบด้วย

1. ถั่วแดงสามารถรับประทานเป็นแหล่งเสริมโปรตีนหรือเป็นแหล่งโปรตีนหลักได้ เนื่องจากมีโปรตีนสูง นอกจากนั้น ยังพบวิตามิน และเกลือแร่ที่จำเป็นต่อร่างกายอีกหลายชนิด
2. ถั่วแดงมีปริมาณโซเดียม และกรดไขมันอิ่มตัวต่ำ แต่มีปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัวสูง อาทิ กรดลิโนเลอิก เป็นต้น

3. โยอาหารที่พบมากในถั่วแดงช่วยลดระดับไขมันคอเลสเตอรอลในเลือดได้โดยตรง เพราะมีคุณสมบัติในการดูดซับน้ำต้ออกจากระบบทางเดินอาหาร ทำให้กระตุ้นการสร้างน้ำดีใหม่อย่างต่อเนื่อง
4. โยอาหารช่วยลดระดับน้ำตาลในเลือด เพราะโยอาหารสามารถช่วยชะลอการดูดซึมน้ำตาลเข้าสู่กระแสเลือด โดยโยอาหารจะเปลี่ยนสภาพเป็นรูปเจลเข้าเคลือบผิวเยื่อในลำไส้เล็ก ทำให้เกิดการดูดซึมน้ำตาลได้ลดลง
5. โยอาหารช่วยป้องกันมะเร็งลำไส้ และป้องกันโรคลุแกงโป่งพองในลำไส้ใหญ่ได้ เนื่องจาก โยอาหารประเภทที่ไม่ละลายน้ำ อาทิ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ทำหน้าที่กระตุ้นการขับถ่ายได้ดี และช่วยดูดซับหรือนำพาสารพิษตกค้างในอาหารเพื่อขับออกมาพร้อมกับอุจจาระได้
6. ช่วยลดความอ้วน รักษาหุ่นให้สมส่วน เพราะเจลที่เกิดจากแป้งหรือโยอาหารทำหน้าที่เคลือบผิวลำไส้เล็ก ทำให้การดูดซึมน้ำตาล และไขมันเป็นไปอย่างช้า เมื่อรับประทานแล้วทำให้รู้สึกอิ่มนาน ไม่ทานอาหารจุจิก ทำให้ได้รับสารอาหารไม่เกินความต้องการของร่างกาย

ถั่วแดง มีสรรพคุณต่าง ๆ อาทิเช่น [14]

- โยอาหารในถั่วแดงช่วยกระตุ้นการขับถ่าย และป้องกันอาการท้องผูก รวมถึงช่วยขจัดสารตกค้างหรือพิษตกค้างที่สะสมในระบบทางเดินอาหาร และลำไส้
- สีแดงหรือสีม่วงแดงในถั่วแดงประกอบด้วยสารแอนโทไซยานินทำหน้าที่เป็นสารต้านออกซิเดชันได้อย่างดี ช่วยป้องกันการเสื่อมของเซลล์ ผิวพรรณไม่คล้ำหมอง แลดูสดใส และไม่แก่เกินวัย
- ช่วยป้องกันการเกิดโรคมะเร็งลำไส้
- ช่วยลดระดับคอเลสเตอรอลในเส้นเลือด ลดความเสี่ยงการเกิดโรคในระบบหัวใจและหลอดเลือด
- ช่วยขับปัสสาวะ
- รักษาอาการชาตามนิ้วมือ นิ้วเท้า
- ช่วยขับพิษออกจากร่างกาย
- ช่วยแก้อาการประจำเดือนมาไม่ปกติ
- ช่วยลดอาการบวมหน้า
- ช่วยบรรเทาอาการปวดตามข้อ
- ต้านอาการอักเสบ
- กระตุ้นการหายของแผลให้หายเร็ว

ถึงแม้ว่าถั่วแดงประกอบด้วยองค์ประกอบที่มีคุณค่าทางโภชนาการมากมาย แต่การบริโภคยังประสบปัญหาในการหุงสุกที่ต้องใช้เวลานาน และหลายขั้นตอน ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการต้มถั่วแดงจำเป็นต้องแช่ถั่วแดงก่อนอย่างน้อย 4-8 ชั่วโมง จากนั้นนำไปต้มในน้ำเดือดอีกประมาณ 40-45 นาที ดังนั้น การแปรรูปผลิตภัณฑ์ถั่วแดงหุงสุกเร็วจึงอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับผู้บริโภคที่มีความต้องการบริโภคแต่มีเวลาค่อนข้างจำกัดในการหุงต้ม ซึ่งเป็นที่มาของวิทยานิพนธ์นี้

2.2 กระบวนการผลิตถั่วแดงหุงสุกเร็ว

ผลิตภัณฑ์ถั่วแดงหุงสุกเร็ว มีคุณลักษณะที่สำคัญ ได้แก่

- 1) ผลิตภัณฑ์ควรมีความชื้นประมาณร้อยละ 10-12 ฐานเปียก [15]
- 2) รูปร่างเมล็ดสมบูรณ์ไม่แตกหักจนไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค
- 3) มีค่า Bulk density ประมาณ 0.4-0.42 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โดยผลิตถั่วแดงหุงสุกเร็วที่มีค่า Bulk density ต่ำจะมีความเป็นรูพรุนภายในมาก สามารถคืนรูปได้ดี [16]
- 4) ผลิตภัณฑ์ที่คืนรูปแล้ว มีเนื้อสัมผัส กลิ่น สี ใกล้เคียงกับถั่วแดงที่หุงสุกด้วยวิธีธรรมดา
- 5) มีคุณค่าทางโภชนาการที่เหมาะสม

ถั่วแดงเป็นหนึ่งในธัญพืชที่นิยมบริโภคในปัจจุบันเนื่องจากประกอบด้วยคุณค่าทางโภชนาการที่สูง และมีประโยชน์ทางด้านสุขภาพมากมาย อย่างไรก็ตามการบริโภคถั่วแดงยังประสบปัญหาที่สำคัญคือ การใช้เวลานานในการทำให้สุก ซึ่งโดยปกติแล้วจำเป็นต้องแช่เป็นเวลาประมาณ 4-8 ชั่วโมง ก่อนหุงสุกอีกประมาณ 40-45 นาที

โดยในปัจจุบันนี้มีวิธีการแปรรูปผลิตภัณฑ์ที่มีแปงเป็นองค์ประกอบโดยเฉพาะถั่วแดงหุงสุกที่ใช้เวลาสั้นได้หลายวิธี เช่น กรรมวิธีการแช่น้ำ ต้ม ทำแห้ง การทำให้ถั่วแดงพองตัวและเกิดเจลลาตินในกรรมวิธีการบด กรรมวิธีการให้ความร้อนแห้ง กรรมวิธีคืนรูปจากการแช่เยือกแข็ง เป็นต้น [17] เนื่องจากถั่วแดงเป็นธัญพืชที่ประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบหลัก ดังนั้น จึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ถั่วแดงหุงสุกเร็ว ซึ่งสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

2.2.1 การแช่-ต้ม-ทำแห้ง

กระบวนการนี้เป็นขั้นตอนแรกที่ใช้ในการผลิตถั่วแดงหุงสุกเร็ว ตามวิธีของ Ozari-durrani [18] ซึ่งประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ การแช่ การให้ความร้อนเพื่อให้สุกและการทำแห้ง วิธีการนี้ถูกนำมาพัฒนาปรับปรุงต่อในหลายวิธี เช่น การพยายามทำให้ถั่วแดงเกิดรอยร้าวมากขึ้น ส่งผลให้น้ำแทรกซึมผ่านเข้าสู่ถั่วแดงได้ง่ายขึ้น ข้อดี คือ ช่วยลดเวลาในการหุงต้ม การแช่ (Soaking) โดยทั่วไปการแช่จะทำให้ถั่วแดงดูดน้ำจนมีความชื้นประมาณร้อยละ 28 การที่ข้าวจะดูดซึมน้ำได้มากน้อยนั้นขึ้นอยู่กับระยะเวลาและอุณหภูมิของน้ำในการแช่ ทั้งนี้การแช่อาจแบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ การ

แช่โดยใช้ความร้อนและการแช่โดยไม่ใช้ความร้อน ในระหว่างการแช่อาจมีการเติมสารเคมีโดยมีจุดประสงค์ คือ เพื่อปรับโครงสร้างของโปรตีนโดยการลดหรือทำลายโครงสร้างโปรตีน เพื่อให้ถั่วแดงดูดน้ำได้มากขึ้น สารเคมีที่นิยมใช้ ได้แก่ Disodium phosphate, Sodium tripolyphosphate และ Calcium citrate ทั้งนี้ได้มีรายงานทางวิชาการสำหรับกรรมวิธีการแช่เมล็ดธัญพืช ดังนี้

Robert และคณะ (1952) [19] ได้พัฒนากระบวนการผลิตธัญพืชหุงสุกเร็ว โดยทำการแช่เมล็ดธัญพืชในน้ำที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นจึงหุงด้วยน้ำร้อนเป็นเวลา 1-3 นาที จนกระทั่งข้าวมีความชื้นประมาณร้อยละ 45-55 ฐานเปียก หลังจากนั้นอบแห้งที่ 200 องศาเซลเซียส เพื่อต้องการลดความชื้นจากบริเวณผิวให้เร็วกว่าที่ดูดซึมจากข้างใน ทำให้เกิดลักษณะขอบแข็ง โดยใช้ระยะเวลาในการอบ 1-3 นาที เพื่อป้องกันการไหม้ของเมล็ดธัญพืช และขั้นตอนที่สองอบแห้งที่ 100 องศาเซลเซียส จนกระทั่งความชื้นสุดท้ายเหลือร้อยละ 10-15 ฐานเปียก ซึ่งพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้สามารถคั่วได้ในเวลา 5 นาที

Yasumatsu และคณะ (1971) [20] ทำการทดลองโดยใช้เมล็ดธัญพืชแช่ในน้ำที่อุณหภูมิห้อง แล้วหุงเมล็ดธัญพืช ด้วยการใช้น้ำที่ความดันบรรยากาศ และเมล็ดธัญพืชถูกนำมาแช่อีกครั้งที่สองในน้ำที่มีน้ำหอมระเหย หลังจากนั้นเมล็ดธัญพืชถูกนำมาหุงด้วยหม้อหนึ่งความดันจนกระทั่งสุกเกิดเจลที่สมบูรณ์ การใช้น้ำมันหอมระเหยช่วยในการแยกเมล็ดธัญพืชออกเป็นเมล็ดหลังจากที่ผ่านการหุงเพื่อให้สะดวกในการอบแห้ง และขั้นตอนสุดท้ายนำเมล็ดธัญพืชหุงสุกไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จนกระทั่งความชื้นสุดท้ายเหลือร้อยละ 8-12 ฐานเปียก

2.2.2 การทำให้เกิดการพองตัว (Puffing/Pre-gelatinization)

หลักการของวิธีการนี้ คือ การนำเมล็ดธัญพืชมาผ่านการทำให้เกิดเจลก่อน โดยการให้ความร้อนด้วยวิธีการต่าง ๆ ทำให้เมล็ดธัญพืชที่ได้ในขั้นตอนนี้มีลักษณะแข็งใสและหดตัว มีความหนาแน่นมาก หลังจากนั้นทำให้พองโดยการใช้น้ำร้อนที่อุณหภูมิสูง ธัญพืชที่ได้จึงมีเมล็ดที่ขนาดใหญ่กว่าเดิม 4 เท่า น้ำหนักเบาและมีรูพรุน ใช้เวลาในการคั่วเพียง 3-4 นาที โดยมีรายงานวิจัยที่ศึกษาหลักการนี้ คือ

Robert และคณะ (1955) [21] ทดลองแช่เมล็ดธัญพืชจนกระทั่งมีความชื้นร้อยละ 30 ฐานเปียก หลังจากนั้นนำไปหุงด้วยไอน้ำที่ความดัน 10-15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 5-20 นาที และอบต่อในขั้นตอนที่สองที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส จนกระทั่งความชื้นสุดท้ายเหลือร้อยละ 8-14 ฐานเปียก เมล็ดธัญพืชที่ได้มีลักษณะหดตัว ใสแน่น หลังจากขั้นตอนนี้แล้วเป็นกระบวนการทำให้เมล็ดธัญพืชเกิดการพองตัวด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 200-250 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองพบว่าเมล็ดธัญพืชหุงสุกเร็วที่ได้มีลักษณะการพอง ขยายตัว โครงสร้างภายในเมล็ดธัญพืชมีรูพรุนมาก ใช้เวลาในการคั่วสั้น

2.2.3 การใช้ Puffing gun

เป็นวิธีการที่นิยมในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์อาหารหุงสุกเร็วจากถั่วแดง โดยอุปกรณ์ที่ใช้เรียกว่า Puffing gun ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีลักษณะการพองตัว หลักการทำงานของ Puffing gun แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ใช้ไอน้ำ (Steam chamber) เมื่อวัตถุดิบผ่านเข้ามาจะมีการลดความดันเพื่อที่จะดึงอากาศออกจากวัตถุดิบก่อน ไอน้ำจะถูกส่งออกมาเพื่อทำให้ถั่วแดงเกิดเจล จากนั้นผลิตภัณฑ์จะถูกส่งออกไปยังห้องสุญญากาศ (Expansion chamber) ถั่วแดงที่ผ่านเข้ามาจะเกิดการขยายตัวทันที เพราะความดันลดลงอย่างรวดเร็ว ผลิตภัณฑ์ถั่วแดงหุงสุกเร็วที่ได้จะมีขนาดใหญ่ประมาณ 2-3 เท่า ทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสกับน้ำมากในระหว่างการคั้นรูป ดังนั้นถั่วแดงหุงสุกเร็วที่ได้จึงคั้นตัวในระยะเวลาอันสั้น แต่ข้อเสีย คือ ลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากการไล่อากาศออกจาก Expansion chamber ทำได้ไม่ทันที ในขณะที่เมล็ดถั่วแดงถูกป้อนเข้า [22] หากพิจารณาข้อดีของการใช้เทคนิค Puffing คือ เป็นวิธีที่ทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพดีแต่มีค่าใช้จ่ายในการผลิตค่อนข้างสูงจึงไม่เป็นที่นิยม

2.2.4 วิธีการทำแห้งสำหรับถั่วแดงหุงสุกเร็ว

การทำแห้งถือได้ว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญในกระบวนการผลิตถั่วแดงหุงสุกเร็ว ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์โดยเฉพาะคุณภาพทางด้านเนื้อสัมผัสหลังการคั้นรูป โดยทั่วไปแล้วการทำแห้งถั่วแดงหุงสุกเร็วอาจทำได้ 2 วิธีหลัก ๆ ได้แก่

1. การทำแห้งในขั้นตอนเดียว เป็นการทำแห้งที่ใช้ความร้อนไม่สูงมาก ประมาณ 70 องศาเซลเซียส แต่ใช้เวลานานประมาณ 2-3 ชั่วโมง
2. การทำแห้งแบบหลายขั้นตอน ในขั้นตอนแรกเป็นการใช้ความร้อนสูง ภายในระยะเวลาอันสั้นเพื่อให้โครงสร้างอยู่ตัว อาจเกิด Case hardening ภายในถั่วแดงจะเกิดรูพรุนขนาดใหญ่ แล้วจึงตามด้วยการใช้อุณหภูมิต่ำ ซึ่งจะช่วยให้โครงสร้างอยู่ตัวโดยที่ถั่วแดงไม่ไหม้

2.3 ทฤษฎีการอบแห้ง

การอบแห้ง คือ กระบวนการลดความชื้นออกจากตัวอาหารหรือผลิตผลทางการเกษตร เป็นกรรมวิธีถนอมอาหารที่รู้จักกันมาช้านาน ส่วนใหญ่ใช้อากาศร้อนถ่ายเทความร้อนไปยังอาหารโดยการพาความร้อน และเกิดการนำความร้อนในตัวอาหารและน้ำระเหยออกจากอาหารโดยการแพร่ของน้ำ จนมีความชื้นลดลงในระดับที่ปลอดภัยที่การเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์และการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของอาหารเกิดขึ้นน้อยมาก เนื่องจากค่าปริมาณน้ำอิสระ (Water activity) ของอาหารจะน้อยลงตามความชื้นที่สูญเสียไป นอกจากนี้ ยังลดน้ำหนักและปริมาตร ทำให้อาหารมีความง่ายต่อการเก็บการบรรจุ การขนส่ง และลดต้นทุน เนื่องจากการขนส่งผลิตภัณฑ์บางชนิดในสภาพสด จะเปลืองเนื้อ

ที่และการดูแลรักษาลำบาก นอกจากนี้ยังสร้างความเป็นเอกลักษณ์เฉพาะให้กับผลิตภัณฑ์ด้วย [23]–[26]

การอบแห้งสามารถแบ่งได้ 2 ลักษณะ คือ การอบแห้งโดยการพาความร้อน (Convective drying) ของไหลร้อนและแห้ง (ซึ่งมักเป็นอากาศ) จะเป็นตัวสำคัญในการให้ความร้อนซึ่งจำเป็นต้องใช้ในการระเหยน้ำออกจากผิวหน้าของอาหาร การอบแห้งในลักษณะนี้มักรู้จักกันในชื่อของการอบแห้งโดยใช้ลมร้อน (Hot air drying) และอีกรูปแบบ คือ การอบแห้งโดยการนำความร้อน (Conductive drying) เกิดขึ้นจากอาหารสัมผัสกับผิวหน้าร้อนโดยตรง ทำให้น้ำเกิดการระเหยอย่างรวดเร็ว ซึ่งได้แก่การอบแห้งแบบลูกกลิ้ง (Drum drying) [25]

กลไกการอบแห้งแบ่งออกเป็น 2 ช่วงใหญ่ ๆ คือ ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant-rate period) และช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling-rate period) ดังแสดงในภาพประกอบ 2

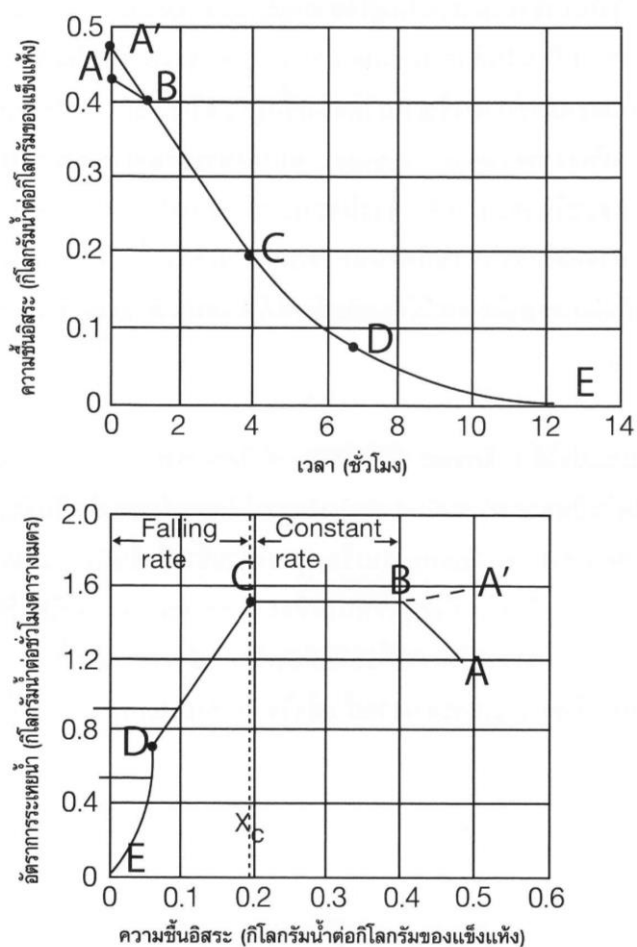
1) ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant rate)

ในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ ความชื้นภายในโครงสร้างอาหารสามารถเคลื่อนที่ได้เร็วพอที่จะทำให้ผิวหน้าของอาหารยังคงอึดด้วยน้ำ วัสดุมีการลดลงของความชื้นอย่างชัดเจน และอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์มีค่าคงที่และเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง อัตราการระเหยของไอน้ำที่ผิวหน้ามีค่าเท่ากับอัตราการเคลื่อนที่ของน้ำ (ของเหลว) ภายในวัสดุพรมที่มาเติมเต็มที่ผิวหน้า ช่วงปลายของคาบเวลานี้ ค่าความชื้นเข้าใกล้ค่าความชื้นวิกฤต (Critical moisture content) ซึ่งค่าความชื้นวิกฤตนี้มีค่าหลายค่า อันเนื่องมาจากความหนาของผลิตภัณฑ์ สภาวะการอบแห้ง ชนิดของโครงสร้าง การยึดเกาะของความชื้นภายในวัสดุ และความสามารถในการเคลื่อนตัวของความชื้นภายในโครงสร้างวัสดุ [26], [27]

2) ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling rate)

การอบแห้งที่วัสดุความชื้นน้อยกว่าความชื้นวิกฤต การอบแห้งเข้าสู่ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ดังแสดงในภาพประกอบ 2 โดยช่วงเวลานี้ใช้เวลามากกว่าช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ [28]

การถ่ายเทความร้อนและมวลนั้น ไม่ได้เกิดขึ้นเฉพาะที่ผิววัสดุเท่านั้น แต่เกิดภายในเนื้อวัสดุด้วย อัตราการเคลื่อนที่ของน้ำภายในโครงสร้างมีค่าน้อยกว่าอัตราการระเหยของน้ำที่ผิวหน้า ความชื้นในวัสดุที่เคลื่อนตัวไปยังผิวหน้าภายใต้อิทธิพลการแพร่กระจายตัวของความชื้นจากภายในวัสดุสู่ผิววัสดุ อุณหภูมิของวัสดุเริ่มสูงกว่าอุณหภูมิกระเปาะเปียก การแพร่ของความชื้นจากภายในโครงสร้างวัสดุจะเป็นปัจจัยควบคุมอัตราการอบแห้ง [23], [26], [27]



ภาพประกอบ 2 อัตราการอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่และอัตราการอบแห้งลดลง
ที่มา: Okos และคณะ (2007) [29]

2.4 ทฤษฎีการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ

ไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจึงทำให้เกิดความร้อนในอาหารได้อย่างรวดเร็ว ใช้เวลาสั้น ประหยัดเวลา ดังนั้นจึงสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตได้มากยิ่งขึ้น อุณหภูมิสูงขึ้นได้อย่างรวดเร็ว ในเวลาสั้น ทำให้สามารถรักษาคุณภาพด้านสี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัสได้ดีกว่าวิธีการใช้ความร้อนแบบดั้งเดิม การสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการต่ำกว่าวิธีดั้งเดิม ประหยัดพลังงาน ควบคุมได้ง่าย ปลอดภัย ตัวเครื่องมีขนาดเล็กและเบา ยืดอายุผลิตภัณฑ์ได้ยาวนานขึ้น ใช้งบการผลิตที่ได้หลากหลาย และสามารถสร้างเครื่องมือได้เองภายในประเทศ ควรศึกษาหาทางใช้ประโยชน์ในการแปรรูปอาหารให้มากยิ่งขึ้น [30]

การใช้คลื่นไมโครเวฟในการแปรรูปอาหารถือเป็นเทคโนโลยีที่ทันสมัย ในต่างประเทศได้ประยุกต์ใช้ไมโครเวฟในกระบวนการให้ความร้อนในอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย เช่น เกษตร อาหาร

ยางพารา สิ่งทอ ไม้ กระดาษ พลาสติก อีกทั้งในวงการแพทย์ และเคมี อย่างไรก็ตาม สำหรับในประเทศไทย นิยมใช้ไมโครเวฟภายในครัวเรือน และร้านอาหารเท่านั้น การนำเทคโนโลยีดังกล่าวไปประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมยังไม่แพร่หลาย เนื่องจากเตาไมโครเวฟอุตสาหกรรมนี้ยังคงมีราคาสูง ประกอบกับการวิจัยในสาขานี้ยังมีอยู่น้อยและมีความซับซ้อนสูง การนำไมโครเวฟมาใช้ในการแปรรูปอาหาร ผู้ปฏิบัติต้องมีความเข้าใจเกี่ยวกับอาหาร เครื่องจักร กระบวนการผลิต และบรรจุภัณฑ์ รวมถึงอันตรกิริยาระหว่างไมโครเวฟและอาหารอย่างลึกซึ้ง นอกจากนี้ยังต้องตรวจสอบการรั่วไหลของคลื่นไมโครเวฟ เพื่อความปลอดภัยต่อผู้ใช้งาน และควบคุมการส่งกำลังไมโครเวฟภายในระบบที่ได้พัฒนาขึ้น [28], [31]

ในอุตสาหกรรมอาหารสามารถนำไมโครเวฟมาใช้ในการกระบวนการต่าง ๆ ได้หลายกระบวนการ ได้แก่ การลวก (Blanching) การทำให้สุก (Cooking) การทำแห้ง (Drying) การพาสเจอร์ไรส์ (Pasteurizing) การสเตอริไลส์ (Sterilizing) การละลายน้ำแข็ง (Thawing) การอบ (Baking) การทำพอง (Puffing) รวมทั้งกระบวนการอื่น ๆ เนื่องจากข้อได้เปรียบในเรื่องการเกิดความร้อนในอัตราที่รวดเร็ว สามารถประหยัดพลังงานได้มาก และสามารถคงคุณค่าทางโภชนาการไว้ได้สูง [32] และสูญเสียคุณภาพด้านต่าง ๆ เช่น กลิ่นรส สี เนื้อสัมผัส และคุณค่าทางโภชนาการน้อยกว่าการให้ความร้อนแบบดั้งเดิม ในปัจจุบันนี้เนื่องจากกระแสความต้องการของผู้บริโภคทางด้านอาหารได้มีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม โดยผู้บริโภคต้องการอาหารที่มีคุณภาพใกล้เคียงกับของสด คุณภาพสูง สะดวกสบาย และรวดเร็วในการเตรียม อีกทั้งมีอายุการเก็บรักษาอย่างเพียงพอและต้องปลอดภัยในการบริโภค จึงทำให้มีการศึกษาวิจัยการใช้ไมโครเวฟในกระบวนการแปรรูปอาหารมากขึ้น

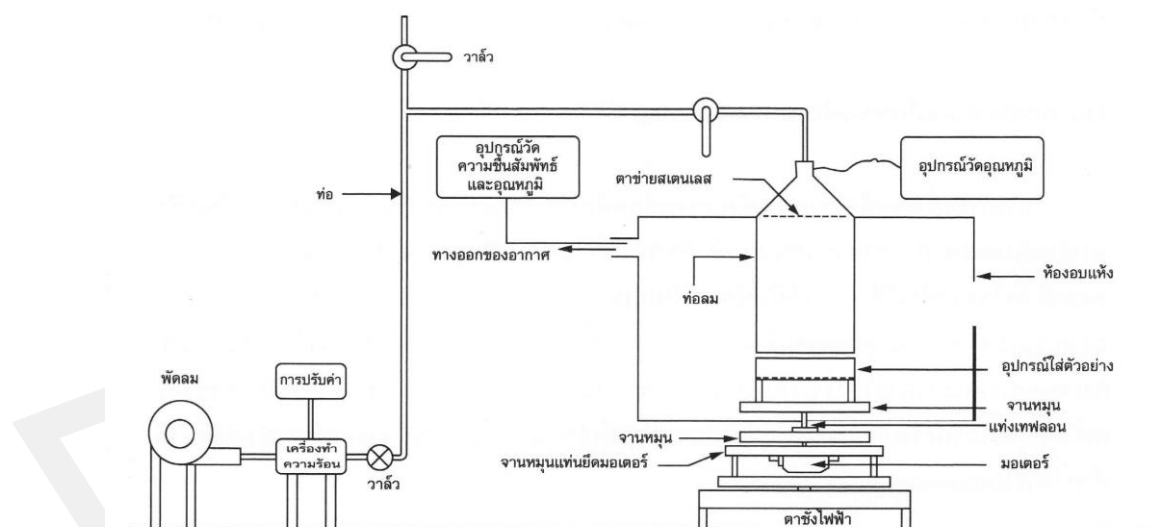
2.4.1 การอบแห้งด้วยไมโครเวฟ (Microwave drying)

การกำจัดน้ำออกด้วยการอบแห้งแบบลมร้อนซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายนั้น มีผลเสียทางด้านลักษณะทางกายภาพ ทางประสาทสัมผัส อันเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้าง และปฏิกิริยาทางเคมี ซึ่งไม่อาจเลี่ยงได้ แต่การใช้ไมโครเวฟในกระบวนการอบแห้งนั้น อัตราการอบแห้งมีค่ามากขึ้น ปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์สุดท้าย การหดตัวเกิดขึ้นน้อยรวมทั้งอาจพองตัวได้อันเนื่องจากกระบวนการอบแห้งด้วยไมโครเวฟสามารถเร่งกระบวนการแพร่ของน้ำในช่วงอัตราอบแห้งลดลง เพราะน้ำภายในวัสดุจะเกิดแรงดันไอน้ำได้ดีกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน (เนื่องจากอุณหภูมิของน้ำเพิ่มขึ้นได้เร็วกว่า) [32]

ยังมีนักวิจัยนำหลักการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟมาใช้ในการอบแห้งด้วยลมร้อน ในผลิตภัณฑ์จำพวกผักและผลไม้ (ดังตัวอย่างในภาพประกอบ 3) ซึ่งจะใช้เวลาในการอบแห้งที่ยาวนานสำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อน แต่หากนำคลื่นไมโครเวฟมาช่วยเพิ่มอัตราการอบแห้งในช่วงปลายของการอบแห้ง หรือช่วงอัตราการอบแห้งลดลง จะสามารถช่วยย่นระยะเวลาของการอบแห้งลงได้ อีกทั้งยังช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดน้ำกลับภายหลังจากการอบแห้ง และการหดตัวของ

ผลิตภัณฑ์ลดลงด้วย นอกจากนี้ยังมีนักวิจัยอีกกลุ่มหนึ่งที่ประยุกต์ใช้คลื่นไมโครเวฟมาช่วยในกระบวนการอบแห้งร่วมกับกระบวนการอื่น ๆ เพื่อเพิ่มคุณภาพและมูลค่าของผลิตภัณฑ์ เช่น การใช้คลื่นไมโครเวฟร่วมกับการอบแห้งด้วยสถานะสุญญากาศ หรือการใช้คลื่นไมโครเวฟร่วมกับการอบแห้งในสถานะเยือกแข็งสุญญากาศ (Microwave freeze drying) [32] ซึ่งกล่าวในรายละเอียดในส่วนถัดไป

กระบวนการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟประกอบด้วย 3 ช่วง คือ (1) ช่วงเกิดความร้อน ซึ่งพลังงานไมโครเวฟถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนภายในวัสดุชิ้น และทำให้อุณหภูมิของวัสดุชิ้นเพิ่มสูงขึ้นตามระยะเวลาที่ผ่านมา เมื่อความดันไอน้ำของวัสดุสูงกว่าความดันของสิ่งแวดล้อม ณ ขณะนั้น วัสดุจึงเริ่มเกิดการสูญเสียความชื้นขึ้นไปที่อัตราที่น้อย (2) ช่วงอัตราการอบแห้งในอัตราคงที่ เมื่ออุณหภูมิของวัสดุเริ่มสูงขึ้นอย่างคงที่ พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจะถูกใช้เพื่อการระเหยของความชื้น (3) ช่วงอัตราการอบแห้งน้อยลงเกิดขึ้นเมื่อพลังงานที่ใช้ในการระเหยของความชื้นน้อยกว่าพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้น อุณหภูมิบางตำแหน่งของวัสดุจะเพิ่มขึ้นสูงกว่าจุดเดือดของน้ำ และทำให้เกิดความร้อนที่มากเกินไป [33] การอบแห้งด้วยไมโครเวฟทำให้อัตราการแพร่ของน้ำเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการเกิดความร้อนที่มากภายในวัสดุ ระยะเวลาการอบแห้ง เนื่องจากผิวของวัสดุจะมีปริมาณความชื้นแพร่ไปมากกว่าการอบแห้งแบบปกติ ทำให้ลดการใช้พลังงานในการอบแห้ง [34]



ภาพประกอบ 3 ระบบการอบแห้งด้วยไมโครเวฟเพื่อใช้ในการศึกษาต่าง ๆ

ที่มา : Zhang et al. (2006) [33]

2.4.2 ข้อจำกัดของการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ

มีข้อจำกัดมากมายเกี่ยวกับการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ ถึงแม้ว่ามีอัตราการอบแห้งที่รวดเร็ว นั่นคือ ความไม่สม่ำเสมอของอุณหภูมิหรือความชื้นของผลิตภัณฑ์ในระหว่างการอบแห้ง อัน

เนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า อุณหภูมิของวัสดุบริเวณผิวหน้าหรือส่วนขอบจะร้อนเร็วมาก จึงเกิดการไหม้ อาจทำลายกลีรนรของผลิตภัณฑ์สุดท้ายได้ และผลิตภัณฑ์อาจเกิดการสูญเสียคุณภาพทางประสาทสัมผัส ในบางกรณี ทำให้เกิดลักษณะ Puffing หรือการพองตัวของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นวัสดุหรืออาหารควรมีการเคลื่อนที่เพื่อป้องกันการเกิดบริเวณที่ร้อนมากจนเกินไป นอกจากนี้การออกแบบเครื่อง ไม่เพียงแต่ออกแบบเพื่อคงคุณภาพของผลิตภัณฑ์เท่านั้น แต่ยังต้องพิจารณาถึงการสะท้อนกลับของคลื่นไมโครเวฟสู่แมกนีตรอน ซึ่งทำให้แมกนีตรอนเสื่อมประสิทธิภาพ [32], [33]

2.4.3 การใช้พลังงานไมโครเวฟร่วมในการอบแห้งด้วยลมร้อน

การใช้พลังงานไมโครเวฟร่วมในการอบแห้งด้วยลมร้อน มีการใช้อยู่ 3 แนวทาง ซึ่งประกอบด้วย

1. การใช้พลังงานไมโครเวฟ ณ จุดเริ่มต้นของการระเหยน้ำภายในวัสดุ ซึ่งภายในวัสดุจะมีความร้อนสูงอย่างรวดเร็วจนน้ำสามารถระเหยเป็นไอได้อย่างรวดเร็ว ไอน้ำจะถูกดันออกจากภายนอกทำให้เกิดการระเหยน้ำที่ผิวของวัสดุ อัตราการอบแห้งสูงขึ้นทำให้เกิดโครงสร้างที่เป็นรูพรุนภายในวัสดุ ซึ่งส่งผลดีต่อการเคลื่อนที่ของน้ำออกสู่ภายนอกหรือวัสดุสามารถดูดซับน้ำได้ดีในระหว่างการคืนรูป

2. การนำพลังงานไมโครเวฟมาใช้ร่วมกับลมร้อนในช่วงการอบแห้งที่ลดลง (Falling-rate period) ในกรณีนี้ผิววัสดุจะแห้งและมีความชื้นหนาแน่นอยู่ในศูนย์กลางของวัสดุ ซึ่งการใช้พลังงานไมโครเวฟ ณ ช่วงเวลานี้จะทำให้เกิดความร้อนภายในจนแรงดันไอน้ำสามารถดันน้ำที่เหลือภายในเคลื่อนที่สู่ผิววัสดุและพร้อมระเหยด้วยลมร้อนต่อไป

3. การนำพลังงานไมโครเวฟมาใช้ร่วมกับลมร้อนในช่วงการอบแห้งคงที่ (Constant-rate period) เมื่อการอบแห้งด้วยลมร้อนทั่วไปอยู่ในช่วงนี้การระเหยน้ำจะช้ามากทำให้เสียเวลาและพลังงานในการอบแห้งมาก ดังนั้นการนำพลังงานไมโครเวฟมาใช้ในช่วงนี้จะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการระเหยน้ำออกจากผลิตภัณฑ์สูงขึ้น

2.4.4 งานวิจัยเกี่ยวข้องกับการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับการใช้คลื่นไมโครเวฟ

คลื่นไมโครเวฟถูกนำมาใช้ในการอบแห้งพาสต้า (Pasta) โดยหากใช้ระบบนี้ในการควบคุมความชื้นในกระบวนการอบแห้งผลิตภัณฑ์เส้นพาสต้าและมักกะโรนีจะใช้ระยะเวลาน้อยกว่า 1 ชั่วโมง ในขณะที่หากเป็นระบบดั้งเดิมต้องใช้เวลามากกว่า 8 ชั่วโมง และยังสามารถรองรับการอบแห้งผลิตภัณฑ์จำนวนปริมาณ 3,000 ปอนด์ต่อชั่วโมง โดยที่ใช้กำลัง 60 กิโลวัตต์ และความถี่ 915 เมกะเฮิร์ต จึงเป็นการประหยัดทั้งพลังงาน ค่าดำเนินการ และค่าบำรุงรักษา นอกจากนี้ยังเป็นที่ยอมรับให้ใช้ได้กับผลิตภัณฑ์ทางด้านชีวภาพที่สามารถลดการปนเปื้อนอนุภาคขนาดเล็กและแมลงที่ติดตามได้เป็นอย่างดี [28]

สิริชัย และคณะ (2554) [35] ได้ศึกษาการอบแห้งของเส้นก๋วยเตี๋ยวด้วยเครื่องไมโครเวฟแบบสายพาน พบว่า อัตราการอบแห้งด้วยไมโครเวฟมีค่าสูงกว่าการอบแห้งด้วยการอบแห้งแบบถาดมาก เนื่องจากการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟนั้น คลื่นไมโครเวฟจะทำให้โมเลกุลของน้ำสั่น เกิดความร้อนและระเหยตัวในทุกจุดของเส้นก๋วยเตี๋ยว แตกต่างจากการอบแห้งด้วยลมร้อนที่ต้องอาศัยการแพร่ของน้ำภายในชิ้นอาหารจนถึงผิวหน้าแล้วจึงระเหยออกไป

เมื่อเปรียบเทียบกับ การอบแห้งลำไยด้วยวิธีการใช้ลมร้อนและการใช้คลื่นไมโครเวฟด้วยระบบต่อเนื่องโดยใช้ความเร็วสายพาน 0.02 เมตรต่อวินาที กำลังไฟฟ้า 1000 วัตต์ ทำแห้งจนความชื้นลดลงต่ำกว่าร้อยละ 18 ฐานเปียก และค่าปริมาณน้ำอิสระไม่เกิน 0.6 พบว่า สามารถลดระยะเวลาลงร้อยละ 65.4 พลังงานและต้นทุนลดลงร้อยละ 88.5 เมื่อเปรียบเทียบกับ การอบแห้งด้วยลมร้อนโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบถาดอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส [36]

สิริชัย และคณะ (2553) [37] ได้ทำการอบแห้งกล้วยและขนุน พบว่า ใช้เวลาประมาณ 38 นาที ซึ่งการอบแห้งกล้วยด้วยไมโครเวฟใช้ระยะเวลาเร็วกว่าการอบแห้งด้วยวิธีการอบลมร้อนถึง 15 เท่า ส่วนขนุนใช้เวลาเร็วกว่าถึง 21 เท่า และสีของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการอบแห้งจากทั้งสองวิธีนั้นส่วนมากไม่แตกต่างกัน นอกจากนี้ สิริชัย และคณะ (2553) [38] ยังได้ศึกษาการอบแห้งเครื่องต้มยำ ได้แก่ ตะไคร้ ใบมะกรูด เติบ พริกชี้หนู และข่า ซึ่งเวลาที่ใช้ในการอบแห้งนั้นมีค่าน้อยกว่าการอบด้วยตู้อบลมร้อนประมาณ 10-12 เท่า เมื่อนำไปต้มเครื่องต้มยำที่อบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟจะมีลักษณะทางประสาทสัมผัส และความสามารถในการดูดน้ำกลับที่ดีกว่า และค่าสีของผลิตภัณฑ์ที่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งไมโครเวฟแบบสายพานไหลต่อเนื่อง มีค่าไม่แตกต่างกันกับกับอบแห้งแบบปกติตลอดอายุการเก็บรักษา

สิริชัย และคณะ (2554) [39] พบว่า การอบแห้งกุ้งด้วยลมร้อนทำให้ได้กุ้งแห้งที่ได้มีลักษณะแห้งแข็ง เนื้อเหนียว และไม่สามารถดูดน้ำกลับเมื่อนำกุ้งไปคืนรูป ดังนั้นจึงต้องมีการปฏิบัติต่อกุ้งโดยการเจาะรูจำนวนมากที่ตัวกุ้งและจุ่มในน้ำสัปปะรดดิบเพื่อให้เอนไซม์บรอมีเลนย่อยโปรตีนบางส่วนในกุ้ง การอบแห้งกุ้งด้วยไมโครเวฟแบบสายพานไหลต่อเนื่องลดการใช้พลังงาน ลดระยะเวลา และลดค่าใช้จ่ายเมื่อเปรียบเทียบกับคุณภาพทางด้านประสาทสัมผัส พบว่า ทั้งการอบแห้งกุ้งด้วยเครื่องไมโครเวฟแบบสายพานไหลต่อเนื่องและการอบแห้งแบบลมร้อนไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

แต่การอบแห้งด้วยไมโครเวฟในบางผลิตภัณฑ์ยังมีข้อจำกัดอยู่บ้าง สิริชัย และคณะ (2553) [40] พบว่า การอบแห้งด้วยไมโครเวฟกับมะพร้าวชิ้นเล็ก ส่งผลให้คุณภาพของสีด้อยกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน ซึ่งเกิดจากการที่มีรอยไหม้ แต่ในทางตรงข้าม เมื่อหั่นมะพร้าวให้หนาขึ้นกลับไม่พบปัญหาการไหม้ที่ขึ้นเนื้อมะพร้าวเมื่อผ่านคลื่นไมโครเวฟ ขณะเดียวกันเมื่อใช้ไมโครเวฟในการทำแห้งมะพร้าวชิ้นจะเร็วกว่าการทำแห้งแบบถาด 1.34 เท่า

2.4.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้คลื่นไมโครเวฟร่วมกับระบบการอบแห้งชนิดอื่น ๆ

จากข้อดีและข้อจำกัดของการอบแห้งด้วยไมโครเวฟ จึงมีการใช้คลื่นไมโครเวฟร่วมกับระบบอบแห้งแบบอื่น ๆ เพื่อพัฒนาศักยภาพของการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยคำนึงถึงความเหมาะสมในการอบแห้ง คุณภาพของผลิตภัณฑ์ และการประหยัดพลังงาน เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่ผลิตภัณฑ์ที่มีค่าต่อเศรษฐกิจ และปรับปรุงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการและลดข้อจำกัดของพลังงานไมโครเวฟโดยใช้ระบบอื่นร่วม [28]

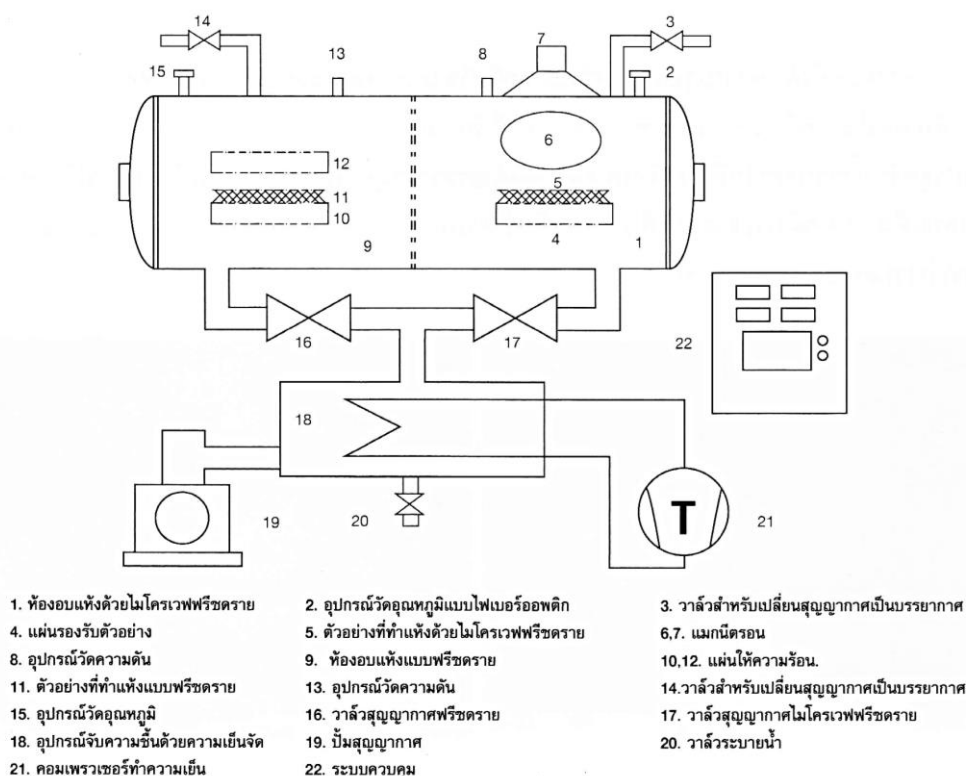
1) ระบบอบแห้งสุญญากาศร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ

การใช้ระบบอบแห้งสุญญากาศร่วมกับคลื่นไมโครเวฟเพื่อลดปัญหาการเสื่อมคุณภาพทางกายภาพ เช่น การไหม้ หรือเกิดสีเข้มอันไม่พึงประสงค์ หรือแม้แต่ปัญหาการกระจายตัวของความร้อนเนื่องจากการใช้ระบบสุญญากาศ ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของไอน้ำจำนวนมากที่ผิวหน้าของอาหารเพิ่มมากขึ้น [41]

การอบแห้งด้วยระบบสุญญากาศร่วมกับคลื่นไมโครเวฟลดระยะเวลาการอบแห้งใบสาระแหน่ลงอย่างมาก อีกทั้งค่าความสว่าง ค่าสีเขียว และค่าสีเหลือง มีค่ามากกว่าการอบแห้งแบบปกติ ค่าการดูดซึมน้ำกลับของใบสาระแหน่ที่ผ่านการอบแห้งด้วยระบบสุญญากาศร่วมกับคลื่นไมโครเวฟมีค่าสูงกว่าการอบแห้งแบบปกติ นอกจากนี้ยังพบว่าการอบแห้งใบสาระแหน่ด้วยระบบดังกล่าวทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีปริมาณรطوبةมากกว่า [42]

2) ระบบอบแห้งแช่เยือกแข็งร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ

การอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Microwave-freeze drying) ดังภาพประกอบ 4 เป็นกระบวนการอบแห้งอาหารที่อยู่ในสถานะเยือกแข็ง ทำให้ผลิตภัณฑ์มีโครงสร้างแข็งแรงไม่หืดตัว และมีปริมาณรطوبةสูง ทำให้มีคุณสมบัติการดูดคืนน้ำกลับที่ดี และใกล้เคียงกับวัตถุดิบสดก่อนการอบแห้ง การใช้คลื่นไมโครเวฟสามารถช่วยลดระยะเวลาการระเหยน้ำและช่วยคงปริมาณสารอาหารได้ไม่แตกต่างจากการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งแบบปกติ ปัญหาหลักของการอบแห้งแบบนี้ คือ มีระยะเวลาการอบแห้งที่นาน ซึ่งต้องใช้พลังงานสูง อีกทั้งมีอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำ ซึ่งการใช้คลื่นไมโครเวฟร่วมในระบบการอบแห้งนี้ทำให้อัตราการให้ความร้อนเพิ่มขึ้น อบแห้งได้รวดเร็วขึ้นอย่างมาก [41], [43]



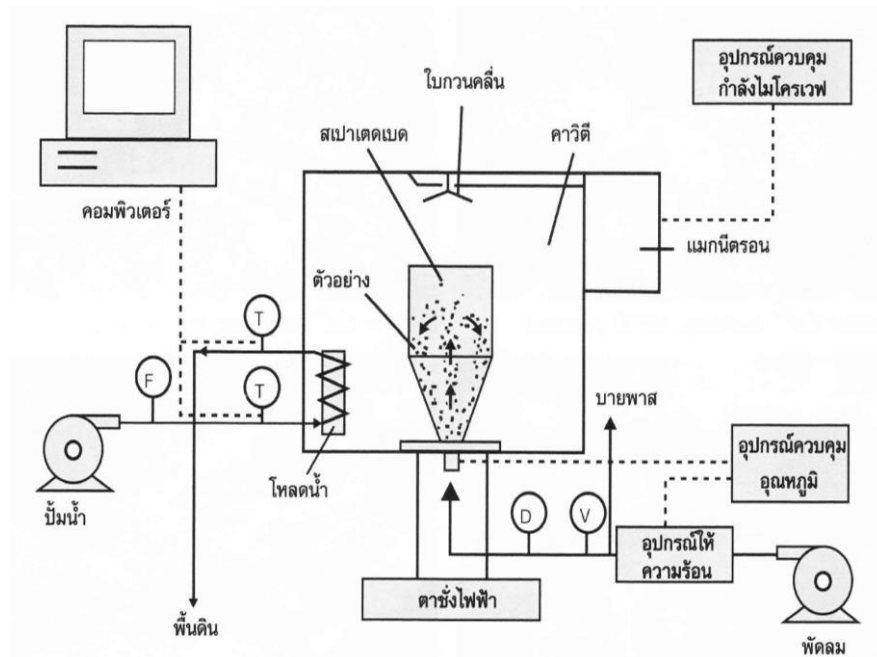
ภาพประกอบ 4 แผนผังการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ

ที่มา: Wang et al. (2010) [43]

จากการเปรียบเทียบการอบแห้งมันฝรั่งที่ผ่านและไม่ผ่านการลวกแบบแช่เยือกแข็งอย่างเดี่ยวและร่วมกันคลื่นไมโครเวฟ พบว่า การอบแห้งโดยใช้คลื่นไมโครเวฟร่วมทำให้ระยะเวลาการอบแห้งลดลงร้อยละ 37 เมื่อการอบแห้งร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ ตัวอย่างที่ผ่านการลวกมีอัตราการอบแห้งที่น้อยกว่าตัวอย่างที่ไม่ผ่านการลวก เนื่องจากสมบัติไดอิเล็กทริกของตัวอย่างมันฝรั่งเปลี่ยนแปลงไปในระหว่างการลวก มีการสูญเสียองค์ประกอบของเคมีและเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างอันเนื่องจากการเกิดเจลลิตินเซชันของสตาร์ช อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบผลการใช้ไมโครเวฟร่วม กลับพบว่าปริมาณวิตามินซี น้ำตาลรีดิวซ์ (Reducing sugar) ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด และปริมาณสตาร์ชไม่แตกต่างกัน [43]

3) การอบแห้งแบบ Spouted bed ร่วมกับไมโครเวฟ

จากข้อจำกัดในการอบแห้งด้วยไมโครเวฟในเรื่องความไม่สม่ำเสมอของความร้อนและความชื้นในระหว่างการอบแห้ง ระบบการแห้งนี้ทำให้วัสดุเกิดการเคลื่อนที่ไปยังทุกส่วนของคาวิตี (Cavity) จากลมร้อนด้านล่าง ทำให้เกิดการผสมและกระจายตัวได้ดี ดังแสดงในภาพประกอบ 5 ทำให้อัตราการอบแห้งรวดเร็วขึ้นและช่วยปรับปรุงคุณภาพสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ [33], [41]



D อุณหภูมิจุดน้ำค้าง F อัตราการไหล T อุณหภูมิ V ความเร็ว

ภาพประกอบ 5 ระบบการอบแห้งแบบสเปาเตดเบคร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ

ที่มา: Zhang et al. (2006) [33]

การอบแห้งด้วยระบบสเปาเตดเบคร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ ทำให้ Parboiled wheat และ Parboiled bulgur มีโครงสร้างความเป็นรูพรุนเพิ่มมากขึ้น และความเป็นทรงกลมเพิ่มมากขึ้น แต่ความหนาแน่นปรากฏลดลง เมื่อเทียบกับการไม่ใช้คลื่นไมโครเวฟ [44]

โดยทั่วไป สมบัติทางกายภาพของ Parboiled wheat อบแห้งที่สภาวะอุณหภูมิสูง หรือใช้กำลังคลื่นไมโครเวฟมีความแตกต่างไปจากการอบแห้งแบบไม่ใช้คลื่นไมโครเวฟ อีกทั้งลดระยะเวลาการอบแห้งอย่างมาก แต่อย่างไรก็ตามต้องพิจารณาถึง %yield ของข้าวด้วย เนื่องจากปริมาณรูพรุนที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้ความแข็งแรงของตัวอย่างข้าวมีน้อยลง และแตกง่ายในระหว่างการสี และการอบแห้งร่วมกับคลื่นไมโครเวฟทำให้เกิดปริมาณรูพรุนและการเสียดสภาพของโปรตีน และเกิดเป็นโครงสร้างเหมือนรังผึ้ง [44]

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการแปรรูปถั่วแดงหุงสุกเร็ว

Li และคณะ (2022) [45] ได้ศึกษาผลของการอบแห้งถั่วแดงด้วยวิธีการกึ่งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ โดยศึกษาปัจจัยอุณหภูมิลมร้อน 60 70 และ 80 องศาเซลเซียส พบว่า อุณหภูมิลมร้อนที่เพิ่มขึ้นและการใช้คลื่นไมโครเวฟส่งผลต่อประสิทธิภาพการอบแห้งที่สูงขึ้น ในคุณภาพด้านสี

พบว่า เมื่ออบแห้งถั่วแดงด้วยอุณหภูมิร้อนที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อค่าความสว่าง (L^*) ที่ลดลง แต่ค่า b^* และค่าความต่างของสี (ΔE) กลับเพิ่มขึ้น อย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) ในขณะที่ค่า a^* ไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน สภาวะการใช้กำลังคลื่นไมโครเวฟ 0.8 วัตต์ต่อกรัม และอุณหภูมิร้อน 70 องศาเซลเซียส เป็นสภาวะการอบแห้งที่ดีที่สุดสำหรับกระบวนการอบแห้งถั่วแดงเมื่อพิจารณาในด้านคุณภาพการสัมผัส ได้แก่ ความแข็งและความเหนียว

Wang and Xiong (2013) [46] ได้ศึกษาผลของการอบแห้งถั่วแดงด้วยการใช้กำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟที่ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ 200 320 และ 400 วัตต์ พบว่า เมื่อระดับการใช้กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ส่งผลต่ออัตราการระเหยน้ำเพิ่มขึ้น ในขณะที่การสูญเสียพลังงานลดลง

Wang และคณะ (2008) [47] ได้ศึกษาลักษณะและคุณภาพของการอบแห้งถั่วแดงด้วยไมโครเวฟแบบ 2 ขั้นตอน ที่ใช้กำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟที่ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ 160 240 และ 320 วัตต์ พบว่า เมื่อระดับการใช้กำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟเพิ่มขึ้น ทำให้อัตราการระเหยน้ำเพิ่มขึ้น แต่การใช้พลังงานและน้ำหนักมวลลดลง

Doymaz (2015) [48] ได้ศึกษาคูณลักษณะการอบแห้งและอัตราการคืนรูปของการอบแห้งถั่วแดงด้วยการเตรียมตัวอย่างที่ต่างกัน 2 วิธี คือ วิธีการจุ่มตัวอย่างลงในสารละลายกรดซิตริก และการลวกด้วยน้ำที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส โดยปัจจัยของอุณหภูมิร้อน ได้แก่ 50 60 70 และ 80 องศาเซลเซียส พบว่า การเตรียมตัวอย่างทั้งสองวิธีส่งผลให้ระยะเวลาการอบแห้งสั้นลงเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งแบบปราศจากการเตรียมตัวอย่าง นอกจากนี้สมการอบแห้งของ Weibull ถูกใช้ทำนายพฤติกรรมของการอบแห้งถั่วแดงในงานวิจัยนี้ได้ดีกว่าสมการอบแห้งอื่น อัตราการคืนรูปสำหรับการเตรียมตัวอย่างด้วยวิธีการลวกสูงกว่าการเตรียมตัวอย่างด้วยการจุ่มสารละลายกรดซิตริก และปราศจากการเตรียมตัวอย่าง

2.6 วิธีพื้นผิวตอบสนอง

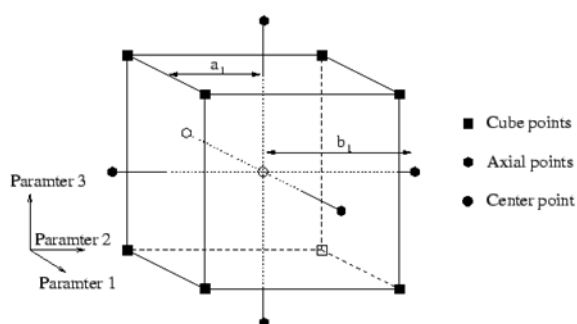
วิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology หรือ RSM) เป็นวิธีการทางคณิตศาสตร์หรือสถิติที่เป็นประโยชน์ในการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ปัญหา ซึ่งแสดงผลตอบสนองต่อผลจากตัวแปรต่าง ๆ เพื่อที่จะได้ค่าที่ดีที่สุดหรือเหมาะสมที่สุดต่อผลนั้น โดยส่วนใหญ่วิธีพื้นผิวตอบสนองจะแสดงผลในรูปแบบของกราฟ อาจจะมีพล็อตเป็นโครงร่างของพื้นผิวตอบสนอง โดยปัญหาส่วนใหญ่จะไม่ทราบความสัมพันธ์ระหว่างพื้นผิวตอบสนองกับตัวแปรอิสระ

RSM เป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพกับกระบวนการที่มีความซับซ้อน จึงทำให้ง่ายในการจัดการและอธิบายผลเมื่อเทียบกับวิธีการอื่น การออกแบบการทดลองที่ส่วนใหญ่นิยมใช้จะเป็นการ

ออกแบบการทดลองเพื่อหารูปแบบของสมการอันดับสอง โดยจะเน้นไปที่การสร้างแบบจำลองควอดราติก (Quadratic) ของผลตอบสนอง ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 2 วิธี คือ

2.6.1 การออกแบบส่วนประสมกลาง (Central composite design หรือ CCD)

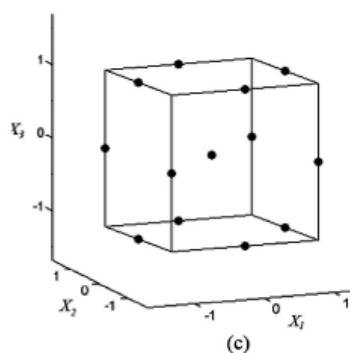
เป็นการออกแบบ 5 ระดับ $(-2, -1, 0, 1, 2)$ เป็นหนึ่งในวิธีการหาพื้นผิวตอบสนองที่นิยมใช้ เพื่อหากระบวนการที่เหมาะสมโดยทั่วไป จะประกอบด้วย 2^k แฟคทอเรียลที่มี nf รันซึ่ง 2^k รันในแนวแกนหรือแนวรูปตัวดาวและ nc รันที่จุดศูนย์กลาง (ดังแสดงในภาพประกอบ 6)



ภาพประกอบ 6 การออกแบบส่วนประสมกลาง

2.6.2 การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken design)

เป็นการออกแบบ 3 ระดับ $(-1, 0, 1)$ สำหรับฟิตพื้นผิวตอบสนอง การออกแบบนี้ถูกสร้างขึ้นจากการรวมการออกแบบแฟคทอเรียล 2^k กับการออกแบบบล็อกไม่สมบูรณ์ผลของการออกแบบมีประสิทธิภาพในด้านจำนวนของการรันที่ต้องการ การออกแบบนี้จึงมีความสามารถในการหมุนหรือเกือบหมุนได้ เนื่องจากเป็นการออกแบบรูปทรงกลมที่มีจุดวางอยู่บนรูปทรงกลมรัศมี 2 (ดังแสดงในภาพประกอบ 7)



ภาพประกอบ 7 การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน

การออกแบบส่วนประสมกลางจะใช้ในกรณีการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนไม่เหมาะสม เนื่องจากการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนจะไม่รวมเอาจุดมุมของลูกบาศก์มา ส่วนข้อเปรียบเทียบระหว่างการออกแบบส่วนประสมกลางกับการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนนั้น สำหรับการสร้างแบบการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน จะใช้จำนวนน้อยกว่าการออกแบบส่วนประสมกลางเนื่องจากต้องการปัจจัยเพียง 3 ระดับต่างจากการออกแบบส่วนประสมกลางที่ต้องการถึง 5 ระดับ แต่ในด้านของคุณภาพนั้นการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน จะมีคุณภาพต่ำกว่าการออกแบบส่วนประสมกลาง เพราะว่าการออกแบบส่วนประสมกลางไม่มีจุดการทดลองที่มุมลูกบาศก์ซึ่งอาจมีประโยชน์เมื่อผู้ทดลองหลีกเลี่ยงปัจจัยที่มีความสำคัญสูง ราคาแพง เป็นไปไม่ได้

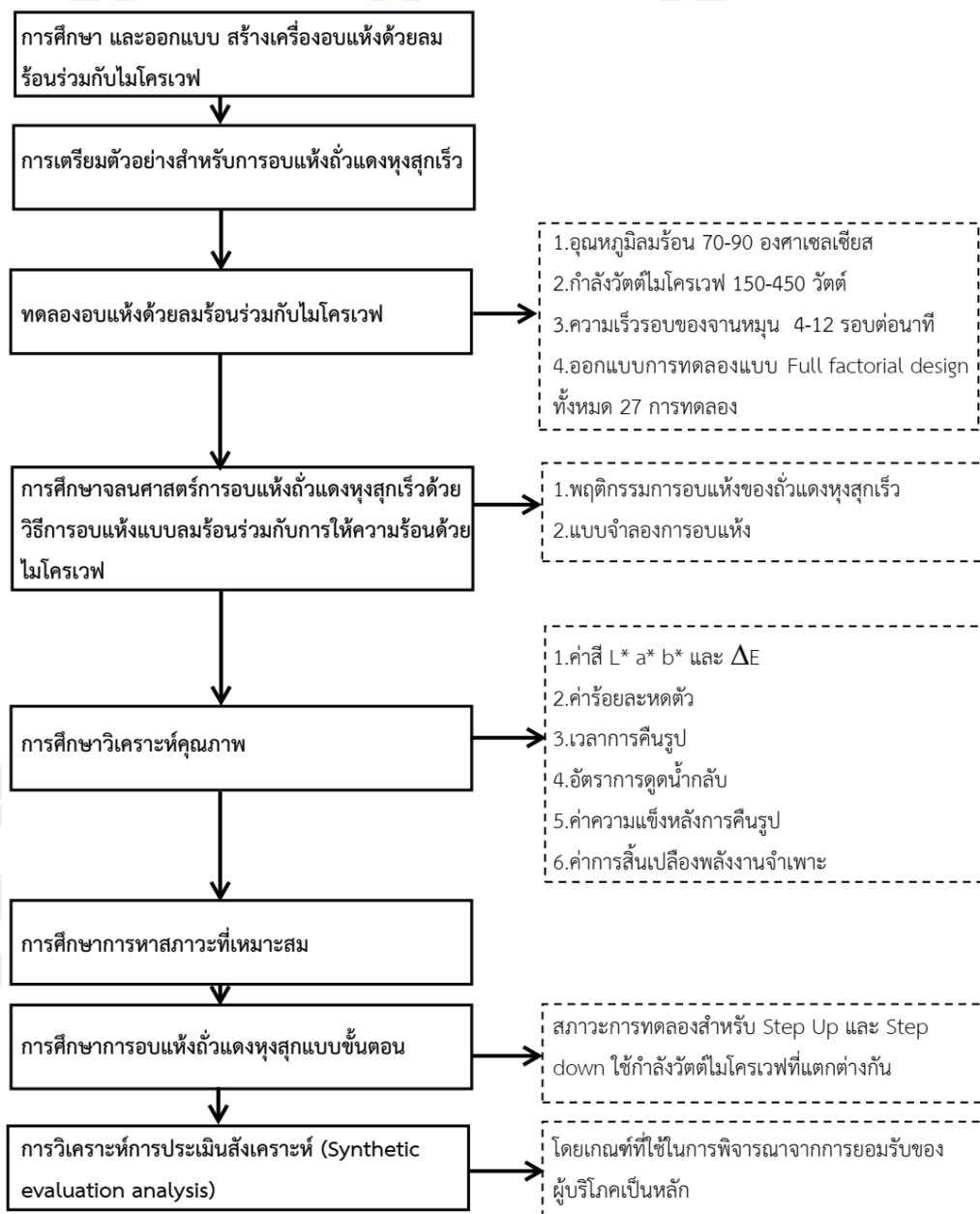
เทคนิค RSM มีประโยชน์ที่สำคัญ คือ จำนวนชุดการทดลองที่ออกแบบโดยใช้ RSM จะมีจำนวนชุดการทดลองที่น้อยกว่า เนื่องจาก RSM จะนำเสนอข้อมูลจำนวนมากจากการทดลองเพียงไม่กี่ครั้ง และ RSM มีความเป็นไปได้ที่จะเจอผลกระทบภายในจากตัวแปรอิสระ นอกจากนี้โมเดลสมการอย่างง่ายของ RSM จะเพิ่มความเข้าใจต่อผลที่เกิดจากการผสมกันของตัวแปรอิสระต่าง ๆ จึงอาจกล่าวได้ว่า RSM เป็นเครื่องมือที่เป็นประโยชน์สำหรับการหาจุดที่เหมาะสมของกระบวนการทางเคมีและกระบวนการทางชีวเคมี



บทที่ 3

วิธีการดำเนินการศึกษา

ในบทนี้จะกล่าวถึง วิธีการเตรียมตัวอย่าง เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง วิธีการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูล ตลอดจนวิธีการดำเนินการศึกษา วิทยานิพนธ์นี้ได้แบ่ง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้



ภาพประกอบ 8 ภาพรวมของขั้นตอนการศึกษา

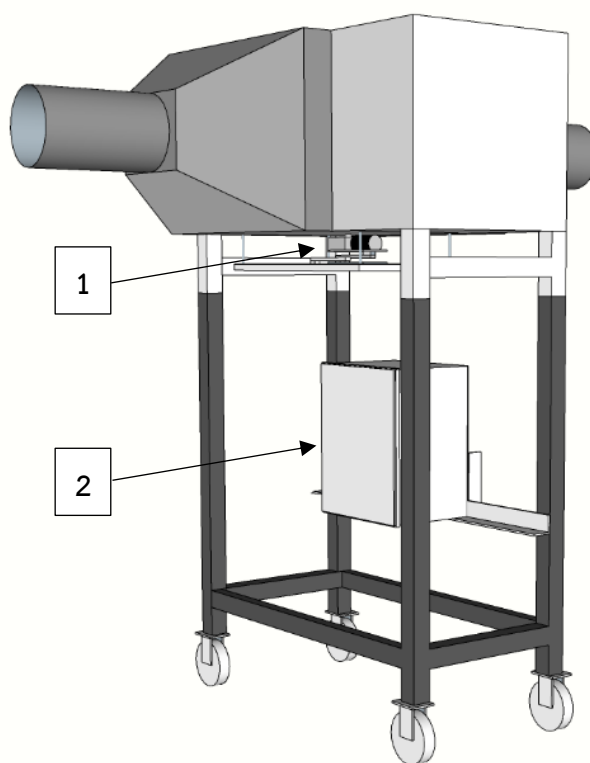
3.1 วิธีการเตรียมตัวอย่าง

- 3.1.1 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองเป็นถั่วแดง มีความชื้นเริ่มต้นประมาณร้อยละ 12-13 ฐานเปียก
- 3.1.2 คัดเลือกเฉพาะเมล็ดที่สมบูรณ์และมีขนาดใกล้เคียงกัน
- 3.1.3 นำถั่วแดง 150 กรัม แช่น้ำที่อุณหภูมิห้องด้วยอัตราส่วนถั่วแดงต่อน้ำเท่ากับ 1 ต่อ 3 โดยน้ำหนัก ใช้เวลาในการแช่ 3 ชั่วโมง ทิ้งให้สะเด็ดน้ำ จากนั้นวิเคราะห์ค่าความชื้น (ร้อยละฐานเปียก)
- 3.1.4 นำถั่วแดงที่ผ่านการแช่แล้วต้มที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 40 นาที
- 3.1.5 นำถั่วแดงหุงสุก 200 กรัม เตรียมทดลองอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟต่อไป

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 เครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ

เครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ ประกอบด้วย เครื่องอบแห้งที่มีพัดลมขนาด 1 แรงม้า สำหรับดูดอากาศภายนอกเข้าในระบบ ความเร็วลมของพัดลมถูกควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์ (Model H-3200 Series, Haitec Transmission Equipment Co., Ltd., China) สมจะผ่านชุดทำความร้อนที่มีการติดตั้งฮีตเตอร์แบบครีบน้ำมันขนาด 1 กิโลวัตต์ จำนวน 10 ตัว อุณหภูมิลมถูกควบคุมโดยใช้ชุดควบคุมพีไอดี (Model MAC-3D, Shimax Co., Ltd., Japan) ลมร้อนถูกเป่าผ่านไมโครเวฟขนาด 800 วัตต์ ที่มีการติดตั้งมอเตอร์กระแสตรงกับชุดจานหมุน (หมายเลข 1) ที่มีขนาดแรงดัน 12 โวลต์ ความเร็วรอบ 12 รอบต่อนาที ขนาดแรงบิด 39 กิโลกรัมเซนติเมตร โดยมีมอเตอร์ถูกต่อกับบอร์ด Arduino mega ที่อยู่ภายในกล่องควบคุม (หมายเลข 2) สำหรับควบคุมความเร็วรอบของจานหมุน อุปกรณ์ดังกล่าวถูกต่อกับแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า หรือ Switching power supply ที่แปลงไฟฟ้ากระแสสลับขนาดแรงดัน 220 โวลต์ เป็นไฟฟ้ากระแสตรงขนาดแรงดัน 12 โวลต์ สามารถรับกระแสได้สูงสุด 5 แอมป์ ดังแสดงในภาพประกอบ 9



ภาพประกอบ 9 ชุดไมโครเวฟสำหรับการเตรียมถั่วแดงหุงสุกเร็ว

3.2.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองและเก็บรวบรวมข้อมูล

1) เครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลองและเก็บรวบรวมข้อมูลในการอบแห้ง

- 1.1) เครื่องคอมพิวเตอร์ 1 ชุด
- 1.2) เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัล ความละเอียด 2 ตำแหน่ง
- 1.3) เทอร์โมคัปเปิล Type K
- 1.4) มิเตอร์วัดการใช้พลังงานไฟฟ้า

2) เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองหาความชื้นของถั่วแดง

- 2.1) ตู้อบลมร้อน (Hot air oven)
- 2.2) กระจกป้องกันวัดความชื้น (Moisture can)
- 2.3) เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล ความละเอียด 3 ตำแหน่ง

3) เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองหาคุณภาพของผลิตภัณฑ์

- 3.1) เครื่องวัดสี
- 3.2) เครื่องวัดค่าปริมาณน้ำอิสระ (a_w)
- 3.3) เครื่องวัดเนื้อสัมผัส

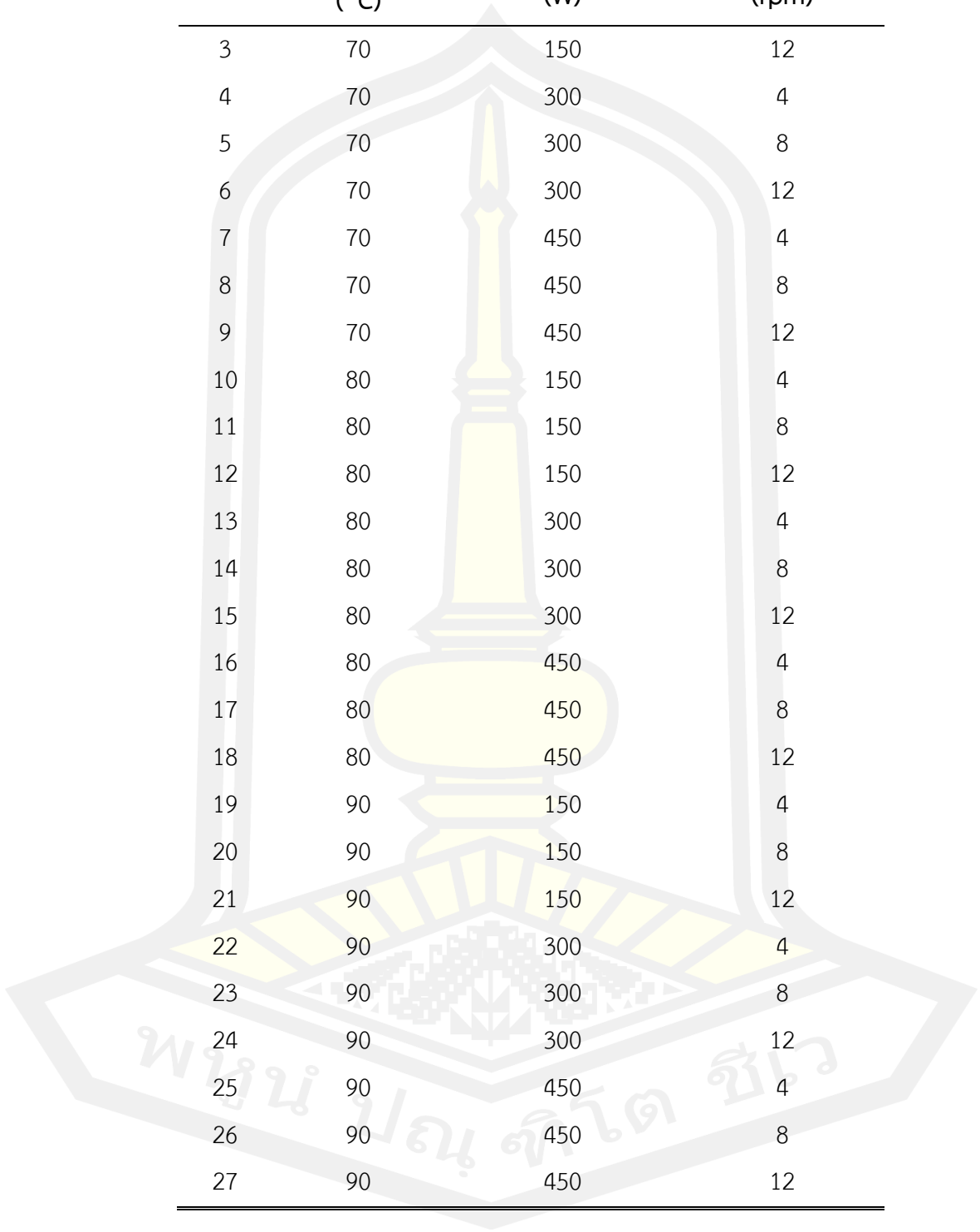
3.3 วิธีการทดลองและเก็บข้อมูล

3.3.1 การวางแผนการทดลอง

- 1) ตัวแปรต้น ประกอบด้วย 3 ปัจจัย ดังนี้
 - 1.1) อุณหภูมิลมร้อน อยู่ในช่วง 70-90 องศาเซลเซียส
 - 1.2) กำลังวัตต์ไมโครเวฟ อยู่ในช่วง 150-450 วัตต์
 - 1.3) ความเร็วรอบของจานหมุน อยู่ในช่วง 4-12 รอบต่อนาที
- 2) ตัวแปรตาม ประกอบด้วย
 - 2.1) ค่าสี L^* a^* b^* และ ΔE
 - 2.2) ค่าร้อยละหดตัว
 - 2.3) เวลาการคืนรูป
 - 2.4) อัตราการดูดน้ำกลับ
 - 2.5) ค่าความแข็งหลังการคืนรูป
 - 2.6) ค่าการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC)
- 3) ตัวแปรควบคุม
 - 3.1) ปริมาณถั่วแดงหุงสุกที่ใช้ต่อ 1 การทดลอง เท่ากับ 200 กรัม
 - 3.2) ความเร็วลมเท่ากับ 0.5 เมตรต่อวินาที
 - 3.3) ความชื้นเริ่มต้น
 - 3.4) ความชื้นสุดท้ายร้อยละ 9-10 ฐานเปียก
- 4) ออกแบบการทดลองแบบ Full factorial design โดยใช้ช่วงของปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัย คือ อุณหภูมิลมร้อน อยู่ในช่วง 70-90 องศาเซลเซียส กำลังวัตต์ไมโครเวฟ อยู่ในช่วง 150-450 วัตต์ และ ความเร็วรอบของจานหมุน อยู่ในช่วง 4-12 รอบต่อนาที จะได้การทดลองทั้งหมด 27 การทดลอง ดังตาราง 1

ตาราง 1 สภาวะการทดลองที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบ Full factorial design

Run	Temperature (°C)	Microwave power (W)	Rotary speed (rpm)
1	70	150	4
2	70	150	8



Run	Temperature (°C)	Microwave power (W)	Rotary speed (rpm)
3	70	150	12
4	70	300	4
5	70	300	8
6	70	300	12
7	70	450	4
8	70	450	8
9	70	450	12
10	80	150	4
11	80	150	8
12	80	150	12
13	80	300	4
14	80	300	8
15	80	300	12
16	80	450	4
17	80	450	8
18	80	450	12
19	90	150	4
20	90	150	8
21	90	150	12
22	90	300	4
23	90	300	8
24	90	300	12
25	90	450	4
26	90	450	8
27	90	450	12

3.3.2 การวิเคราะห์คุณภาพ

1) ความชื้น (ร้อยละฐานแห้ง)

วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลองตั้งแต่ช่วงความชื้นถั่วแดงเริ่มต้นจนกระทั่งความชื้นสุดท้ายประมาณร้อยละ 10 ฐานเปียก โดยหาความชื้น (Moisture content, MC) ของผลิตภัณฑ์ตามมาตรฐาน AOAC นำตัวอย่างถั่วแดงปริมาณ 3-5 กรัม ได้นำหนักที่แน่นอนในภาชนะอะลูมิเนียม และนำไปอบแห้งจนได้นำหนักคงที่ในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง แล้วนำออกมาชั่งนำหนักที่แน่นอนอีกครั้ง จากนั้นคำนวณปริมาณความชื้นดังสมการ 1

$$MC = \frac{W_t - W_d}{W_d} \quad (1)$$

เมื่อ	MC	คือ	ความชื้น (ร้อยละฐานแห้ง)
	W_t	คือ	นำหนักถั่วแดงที่เวลาใด ๆ (กรัม)
	W_d	คือ	นำหนักแห้งของถั่วแดง (กรัม)

2) การวิเคราะห์ปริมาณน้ำอิสระ (a_w)

ชั่งตัวอย่างประมาณ 3 กรัม โดยต้องให้ตัวอย่างปิดพื้นที่กั้นภาชนะใส่ตัวอย่าง และให้ปริมาณตัวอย่างอยู่สูงระดับครึ่งของภาชนะใส่ตัวอย่าง จากนั้นนำภาชนะใส่ในเครื่องวัดปริมาณน้ำอิสระ รุ่น Aqualab (Decagon, United of Kingdom)

3) ค่าสี L^* a^* b^* และ ΔE

การวัดวิเคราะห์ค่าสี ทดสอบคุณภาพด้านสีของตัวอย่างถั่วแดงหุงสุกเร็วโดยใช้เครื่องวัดสี (Minolta colorimeter) วัดค่าสีระบบ CIE (L^* a^* b^*) ด้วยเครื่อง Chroma meter รายงานค่าเป็น L^* (ค่าความสว่าง) a^* (ค่าความเป็น สีแดง) $-a^*$ (ค่าความเป็นสีเขียว) b^* (ค่าความเป็นสีเหลือง) $-b^*$ (ค่าความเป็น สีน้ำเงิน) โดยการทดลองจะทำการวัด 5 ซ้ำ และรายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย

4) ค่าร้อยละหดตัว

การวัดการหดตัวของถั่วแดงหุงสุกเร็ว นั้นคิดเป็นร้อยละ โดยเปรียบเทียบปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงไปของถั่วแดงแห้งและถั่วแดงหุงสุก ซึ่งอาศัยหลักการแทนที่ของเหลวโดยใช้ n-heptane ในการวัดปริมาตรของถั่วแดงสุกก่อนทำการอบแห้งด้วยกระบอกตวงมาตรฐาน

จากนั้นวัดปริมาตรอีกครั้งหลักจากการอบแห้งแล้วด้วยกระบอกตวงมาตรฐานเช่นเดิม การหัดตัวสามารถคำนวณได้ดังสมการ 2

$$\% \text{Shrinkage} = \frac{V_i - V_f}{V_i} \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ V_i คือ ปริมาตรเริ่มต้นของถั่วแดงหุงสุกก่อนการอบแห้ง
 V_f คือ ปริมาตรสุดท้ายของถั่วแดงหลังการอบแห้ง

5) เวลาการคืนรูป

นำตัวอย่างถั่วแดงแห้งมาทดสอบการคืนตัวปริมาณ 15 กรัม ในน้ำเดือด 1 ลิตร ทำการชั่งน้ำหนักทุก ๆ 1 นาที โดยนำตัวอย่างออกมาบันทึกน้ำหนักหลังจากการดูดน้ำแต่ละช่วงเวลา ก่อนชั่งน้ำหนักตัวอย่าง กำจัดน้ำที่ผิวของเมล็ดถั่วแดงโดยวางบนผ้าฝ้ายเป็นเวลาประมาณ 1 นาที ทำการวัด ชั่งน้ำหนักจนกระทั่งน้ำหนักของตัวอย่างถั่วแดงหลังจากดูดน้ำกลับไม่เปลี่ยนแปลงหรือเข้าสู่สภาวะสมดุล

6) อัตราการดูดน้ำกลับ

เป็นค่าแสดงถึงความสามารถในการดูดซับน้ำและการพองตัวของเมล็ดถั่วแดงในระหว่างการคืนรูป โดยในการทดลองหาได้จากน้ำหนักของตัวอย่างที่คืนรูปแล้วต่อน้ำหนักของถั่วแดงก่อนการคืนรูป อัตราการดูดน้ำกลับสามารถวิเคราะห์ได้โดยชั่งตัวอย่างถั่วแดงแห้ง 100 กรัม นำไปคืนรูปในน้ำเดือดตามเวลาที่วิเคราะห์ได้ แล้วชั่งน้ำหนักถั่วแดงหลังคืนรูป คำนวณหาอัตราการดูดน้ำกลับดังสมการ 3 [49]

$$\text{Rehydration ratio} = \frac{w_c - w_i}{w_i} \quad (3)$$

โดยที่ w_c คือ น้ำหนักถั่วแดงหลังคืนรูป (กรัม)
 w_i คือ น้ำหนักถั่วแดงแห้ง (กรัม)

7) ค่าเนื้อสัมผัสหลังการคืนรูป

ซึ่งตัวอย่างถั่วแดงสุกหรือคืนรูป 3-5 กรัม เรียงบนฐานวัดเป็นชั้นเดียว กดตัวอย่าง 2 ครั้งเพื่อศึกษาลักษณะเนื้อสัมผัสแบบวิเคราะห์ค่าโครงเนื้อสัมผัส (Texture profile analysis: TPA) ด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส (TA.XT plus texture analyzer, Stable Micro system Ltd., Surry, UK) หัววัดชนิดทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร ระยะระหว่างหัววัดกับฐาน 8 มิลลิเมตร ระยะทางที่หัววัดกดตัวอย่าง 90% strain ความเร็วก่อนวัด ขณะวัด และหลังการวัดเท่ากับ 1 มิลลิเมตรต่อวินาที บันทึกค่าด้วยซอฟต์แวร์ Exponent 32 วัดค่าตัวอย่างละ 6 ครั้ง ได้ค่าเนื้อสัมผัสดังนี้ ความแข็ง (Hardness) การเกาะติดผิว (Adhesiveness) การรวมตัวกัน (Cohesiveness) ความยืดหยุ่น (Springiness index) และการเคี้ยว (Chewiness)

3.3.3 ค่าการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

ค่าการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) คือ อัตราส่วนระหว่างพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งต่อปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุอบแห้ง สามารถคำนวณได้ดังสมการ 4

$$SEC = \frac{3.6 \times E}{W_{\text{evap}}} \times 1000 \quad (4)$$

โดยที่	SEC	คือ	ค่าการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (เมกะจูลต่อกิโลกรัม น้ำ)
	E	คือ	ปริมาณพลังงานที่ใช้ (กิโลวัตต์ชั่วโมง)
	W_{evap}	คือ	ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากถั่วแดง (กิโลกรัม)
	3.6	คือ	ตัวเลขแปลงหน่วยของพลังงานไฟฟ้า

3.3.4 การหาจลนศาสตร์การอบแห้ง

การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งถั่วแดงสามารถทำได้โดยการวิเคราะห์ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นและเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง สมการของอัตราส่วนความชื้น โดยคำนวณดังสมการ 5

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (5)$$

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

การวิเคราะห์หาสมการอบแห้งที่เหมาะสมของการอบแห้งถั่วแดง ทำได้โดยนำค่าอัตราส่วนความชื้นที่เวลาใด ๆ จากการทดลองมาเปรียบเทียบกับสมการอบแห้งที่ใช้สำหรับทำนาย ค่าความชื้นซึ่งอยู่ในรูปแบบสมการอบแห้งกึ่งทฤษฎี (Semi-theoretical drying equation) โดยใช้โปรแกรม Statistica for windows version 5.0 ในการทำนายค่าความชื้น รูปแบบสมการพื้นฐานที่ใช้ทำนายการอบแห้งชั้นบางมีรายละเอียดดังแสดงไว้ในตาราง 2 ซึ่งการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสมการอบแห้งใช้เทคนิควิเคราะห์ความถดถอยไม่เชิงเส้น (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 6 และ 7

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_{obs,i} - V_{pre,i})^2} \quad (6)$$

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(V_{obs,i} - V_{pre,i})^2}{N - Z} \quad (7)$$

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

ตาราง 2 รูปแบบสมการพื้นฐานที่ใช้ทำนายการอบแห้งวัสดุชิ้นบาง [50]

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

3.3.5 การวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น

สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (D_{eff}) และค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) สมการกึ่งทฤษฎี (Semi-theoretical equation) ซึ่งจะมีรูปแบบความสัมพันธ์ในรูปกฎข้อที่สองของฟิค (Fick's second law) สามารถใช้ในการหาอัตราส่วนความชื้น ดังแสดงในสมการ 8 สำหรับวัสดุที่มีชิ้นบาง

$$MR = \frac{6}{\pi^2} \exp\left(-\pi^2 \frac{D_{eff} t}{r^2}\right) \quad (8)$$

เมื่อ D_{eff} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล
(ตารางเมตรต่อวินาที)

สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (D_{eff}) เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิที่ถ่วงแดงดูดซับพลังงาน มีความสัมพันธ์ตามรูปแบบของสมการอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) ถูกใช้ในการวิเคราะห์หาค่าพลังงานกระตุ้น (Activation energy for diffusion, E_a) ซึ่งบ่งบอกค่าความร้อนแฝงในการเปลี่ยนสถานะของมวลความชื้นในถ่วงแดง (Latent heat of vaporization) ในระหว่างกระบวนการอบแห้ง โดยมีรูปแบบสมการดังแสดงในสมการ 9

$$D_{\text{eff}} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (9)$$

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

3.3.6 การหาจลนศาสตร์การคืนรูป (Rehydration kinetics)

เช่นเดียวกับวิธีการวิเคราะห์เวลาคืนรูป นำตัวอย่างถั่วแดงแห้งมาทดสอบการคืนตัวปริมาณ 15 กรัม ในน้ำเดือด 1 ลิตร ทำการชั่งน้ำหนักทุก ๆ 1 นาที โดยนำตัวอย่างออกมาบันทึกน้ำหนัก หลังจากการดูดน้ำแต่ละช่วงเวลา ก่อนชั่งน้ำหนักตัวอย่าง กำจัดน้ำที่ผิวของเมล็ดถั่วแดงโดยวางบนผ้าฝ้ายเป็นเวลาประมาณ 1 นาที ทำการวัด ชั่งน้ำหนักจนกระทั่งน้ำหนักของตัวอย่างถั่วแดงหลังจากดูดน้ำกลับไม่เปลี่ยนแปลง (เข้าสู่สภาวะสมดุล)

น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นในระหว่างการคืนตัว (Weight gain on rehydration, WGR) สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการ 10 โดยที่ตัวห้อย e และ t แทนค่าที่เวลาสมดุล และเวลา t ใด ๆ ตามลำดับ W คือ น้ำหนักของตัวอย่าง (กิโลกรัม)

$$WGR = \frac{W_e - W_t}{W_e} \times 100 \quad (10)$$

นำน้ำหนักของตัวอย่างที่เวลาสมดุลและเวลาใด ๆ มาพิตกับสมการเอมพิริคัลที่แตกต่างกัน 3 สมการซึ่งประกอบด้วย 1) แบบจำลอง Exponential 2) แบบจำลองของ Peleg และ 3) แบบจำลองของ Weibull โดยใช้วิธี Non-linear regression method เพื่อหาค่าคงที่จลนศาสตร์การคืนตัว

1) สมการจลนศาสตร์อันดับที่หนึ่ง (First-order kinetics equation) หรืออีกอย่างหนึ่งว่าสมการ Exponential equation แสดงในสมการ 11

$$WGR = WGR_e - (WGR_e - 1)\exp(-k_r t) \quad (11)$$

โดยที่	WGR	คือ	อัตราส่วนน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นที่เวลา t ใด ๆ
	WGR_e	คือ	อัตราส่วนน้ำหนักที่สมดุล
	k_r	คือ	คงที่อัตราการคืบตัว (min^{-1})
	t	คือ	เวลาการคืบตัว (min)

2) แบบจำลอง Peleg [51]

$$WGR = \left(WGR_e - \frac{1}{k_2} \right) + \frac{t}{k_1 + k_2 t} \quad (12)$$

โดยที่	k_1	คือ	ค่าคงที่จลนศาสตร์
	k_2	คือ	ค่าพารามิเตอร์ไร้หน่วยที่สอดคล้องกับอัตราการคืบตัวสูงสุด

3) แบบจำลอง Weibull [52]

$$WGR = WGR_e + (1 - WGR_e) \exp \left[-\frac{t}{\beta} \right]^\alpha \quad (13)$$

โดยที่	β	คือ	พารามิเตอร์สเกล (Scale parameter)
--------	---------	-----	-----------------------------------

3.3.7 การหาสภาวะที่เหมาะสม (Optimization)

เนื่องจากแต่ปัจจัยการอบแห้งต่างส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ต่างกัน ดังนั้นการหาสภาวะที่ดีที่สุดหรือสภาวะที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งสำคัญในการออกแบบสภาวะ วิทยานิพนธ์นี้ใช้วิธีผลตอบสนองพื้นผิว (Response surface method, RSM) ในการหาสภาวะที่เหมาะสมโดยพิจารณา 3 ปัจจัย คือ อุณหภูมิอบแห้ง กำลังวัตต์ของไมโครเวฟ และความเร็วรอบของจานหมุน ในขณะที่ผลตอบสนองที่ศึกษา ประกอบด้วย ค่าสูงสุดของค่าคงที่อัตราการอบแห้ง (k) และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (D_e) นอกจากนี้ยังรวมถึงค่าต่ำสุดของเวลาการอบแห้ง (DT) และค่าการใช้พลังงานจำเพาะ (SEC) โดยเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ควบคุม (ถั่วแดงที่ผ่านการทำให้สุกด้วยวิธีทั่วไป)

สมการความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยและผลตอบสนองเป็นแบบสมการโพลีโนเมียลอันดับสอง (Second-order polynomial equation) ดังนี้

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^n a_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n a_{ij} x_i x_j \quad (14)$$

ในสมการ 14 สัมประสิทธิ์ a_0 คือ ค่าคงที่ a_i และ a_{ii} Linear และ Quadratic effect ตามลำดับ ในขณะที่ a_{ij} คือ Interaction effect ส่วน x_i ($n = 3$) คือ ค่าจริงของแฟคเตอร์ที่ i

ผลตอบสนองที่ประมาณค่าจากสมการ 14 ถูกนำมาเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของค่า Scale free value (d_i) ซึ่งเรียกว่าค่าการออกแบบ (Desirability) ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 โดยที่ค่า 0 แสดงผลตอบสนอง 1 หรือมากกว่า 1 ผลตอบสนองที่อยู่นอกขีดจำกัดที่ยอมรับได้ ในขณะที่ค่า 1 แทนสถานะในอุดมคติ ฟังก์ชันของ Desirability ($d_i(Y_i)$) ที่ใช้มีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับผลตอบสนองที่ต้องการ เช่น ค่ามากที่สุด ค่าน้อยที่สุด หรือค่าที่กำหนด เป็นต้น ดังนั้นค่า Desirability รวมที่ต้องการจึงเป็นการผสมผสานของแต่ละผลตอบสนอง ดังสมการต่อไปนี้

$$D = (d_1(Y_1) d_2(Y_2) \dots d_k(Y_k))^{1/k} \quad (15)$$

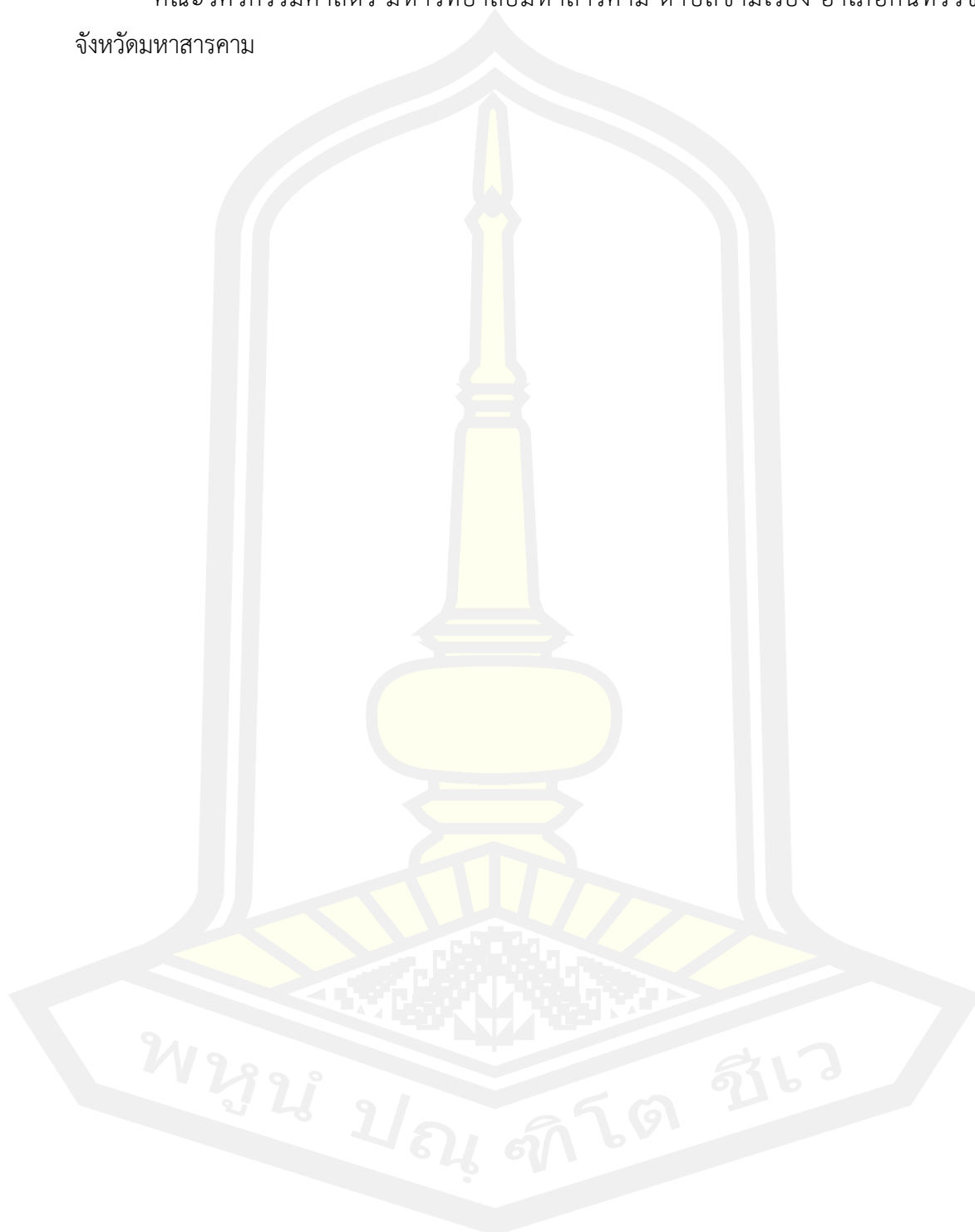
โดยที่ k คือ จำนวนของผลตอบสนอง

3.3.8 ขั้นตอนการออกแบบแบบ Step up และ Step down

- 1) อบรมพนักงานที่สถานะต่าง ๆ ดังแสดงในตาราง 1
- 2) วิเคราะห์จลนศาสตร์การอบรมเพื่อประมาณค่าคงที่อัตราการอบรมและค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล
- 3) วิเคราะห์จลนศาสตร์การคืนรูปเพื่อประมาณค่าคงที่อัตราการคืนรูป
- 4) วิเคราะห์คุณภาพของถั่วแดงอบแห้ง (ดังหัวข้อ 3.3.2)
- 5) วิเคราะห์หาอุณหภูมิและความเร็วรอบที่เหมาะสมโดยใช้ผลตอบสนองที่ได้จากข้อ 2-4
- 6) ทดลองการออกแบบแบบ Step up และ Step down โดยใช้ค่าความชื้นในการเปลี่ยนกำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับร้อยละ 70 ของความชื้นเริ่มต้น ดังแสดงในตาราง

3.5 สถานที่ดำเนินการศึกษา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ตำบลขามเรียง อำเภอกันทรวิชัย
จังหวัดมหาสารคาม



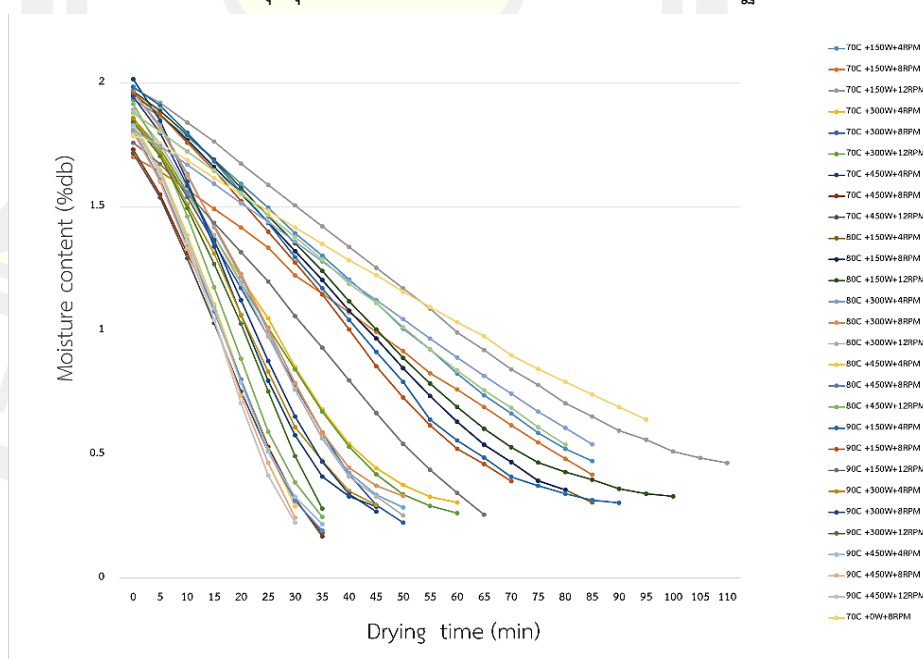
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้แบ่งผลการศึกษาออกเป็น 4 ส่วน ซึ่งประกอบด้วย การศึกษา จลนศาสตร์การอบแห้งถั่วแดงหุงสุกเร็วด้วยวิธีการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับการให้ความร้อนด้วย ไมโครเวฟ การศึกษาสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสม การศึกษาการอบแห้งแบบขั้นตอน ซึ่งมี รายละเอียดดังนี้

4.1 ผลการศึกษาจลนศาสตร์การอบแห้งถั่วแดงหุงสุกเร็วด้วยวิธีการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ

4.1.1 การศึกษาจลนศาสตร์การอบแห้งถั่วแดงหุงสุกเร็ว ด้วยวิธีการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ โดยอุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 70 80 และ 90 องศาเซลเซียส กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 150 วัตต์ 300 วัตต์ และ 450 วัตต์ และความเร็วรอบของถังหมุนเท่ากับ 4 รอบต่อนาที 8 รอบต่อนาที และ 12 รอบต่อนาที ตามลำดับ ความชื้นเริ่มต้นของถั่วแดงหุงสุกในทุกสภาวะการอบแห้งที่ทดสอบในวิทยานิพนธ์นี้มีค่าร้อยละ 64.98 ± 0.31 ฐานเปียก เมื่อพิจารณาความชื้นสุดท้ายของตัวอย่างถั่วแดงหุงสุกเร็วที่ต้องการซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 10 ฐานเปียก

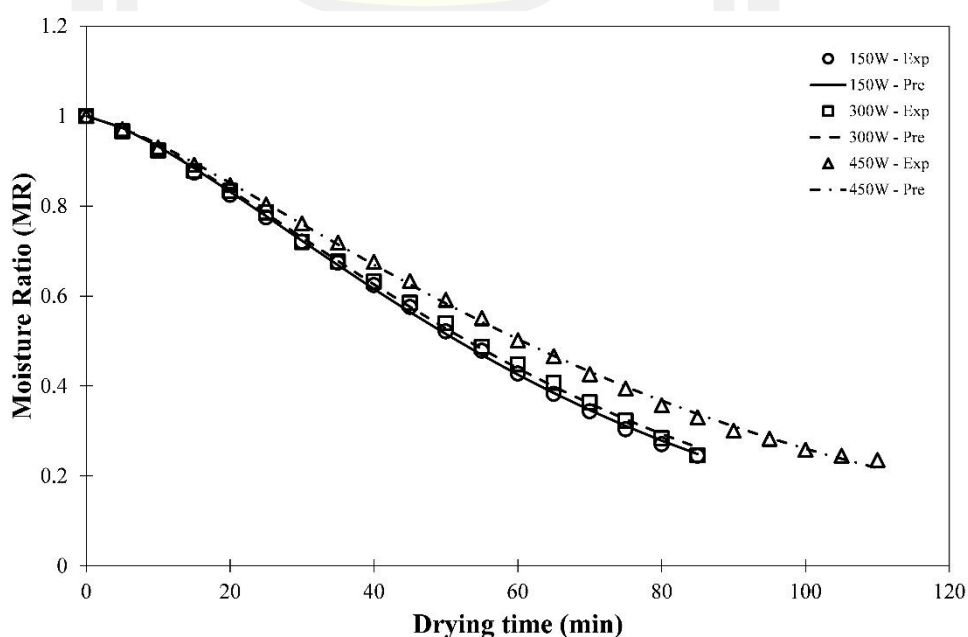


ภาพประกอบ 10 อัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นของถั่วแดงหุงสุกเร็วที่อบแห้งที่อุณหภูมิลมร้อน กำลังวัตต์ไมโครเวฟ และความเร็วรอบของจานหมุนแตกต่างกัน

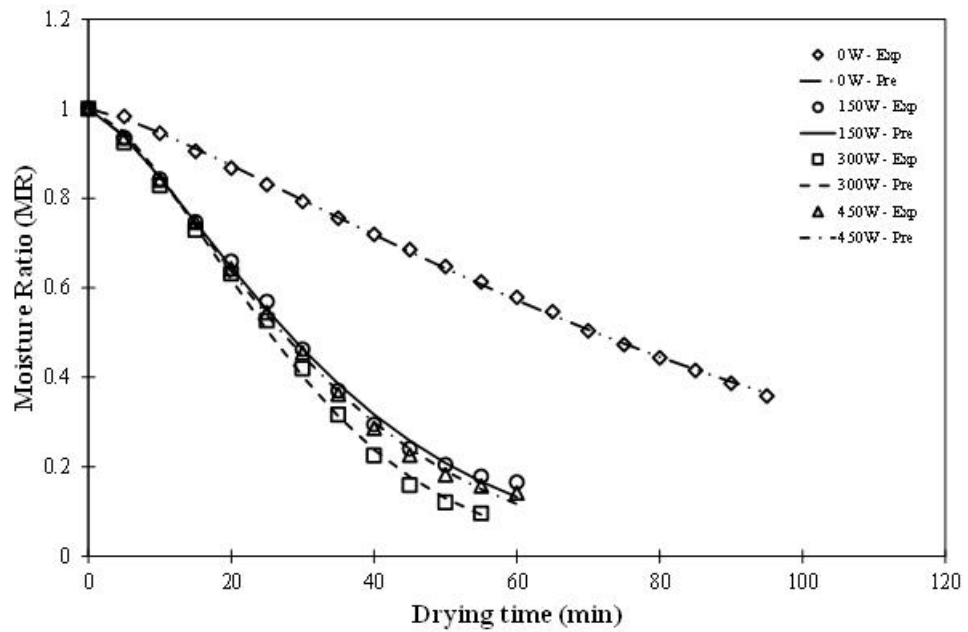
ภาพประกอบ 10 แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นตามเวลาการอบแห้ง พบว่า การลดความชื้นจะลดลงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียลโดยลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรก จากนั้นอัตราการลดความชื้นจะค่อย ๆ ลดลงซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ วิภาคนดา และคณะ (2556) [74] และเมื่อทำการเปรียบเทียบการลดความชื้นที่อุณหภูมิคงที่ใด ๆ ของทั้ง 3 อุณหภูมิ พบว่า การให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟส่งผลให้เวลาในการอบแห้งจนถึงระดับที่ต้องการ (10% db) มีค่าลดลง เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิที่กำลังวัตต์ไมโครเวฟคงที่ใด ความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้เวลาในการอบแห้งลดลงเช่นเดียวกัน

4.1.2 พฤติกรรมการอบแห้งของถั่วแดงหุงสุก

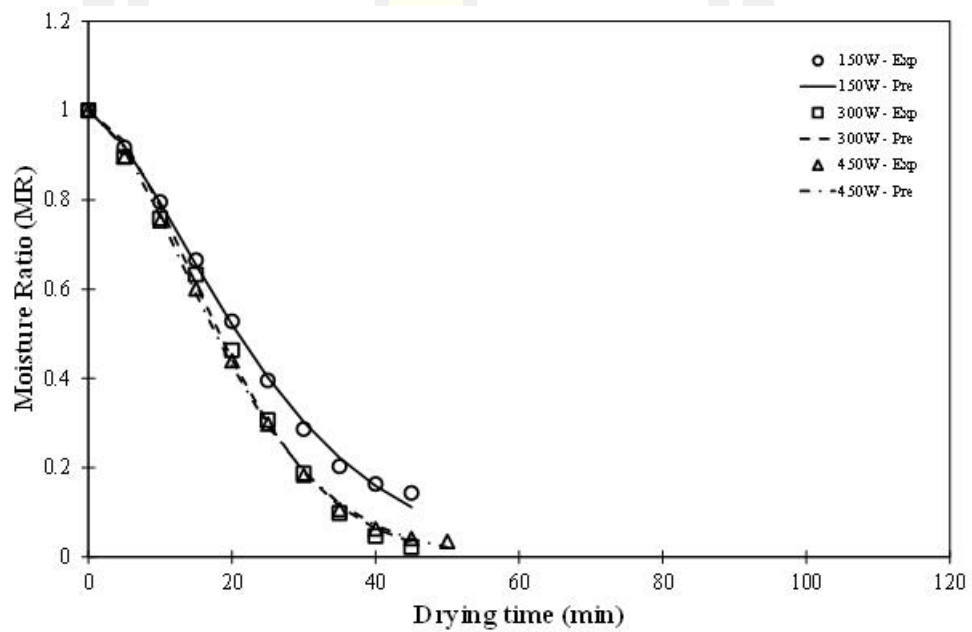
ภาพประกอบ 11 แสดงพฤติกรรมการอบแห้งของตัวอย่างถั่วแดงหุงสุก โดยใช้กระบวนการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ ที่อุณหภูมิลมร้อนคงที่เท่ากับ 70 องศาเซลเซียส กำลังวัตต์ไมโครเวฟมีการเปลี่ยนในช่วง 150 – 450 วัตต์ และความเร็วรอบของจานหมุนแตกต่างกันเท่ากับ 4 รอบต่อนาที (ภาพประกอบ 11(ก)) 8 รอบต่อนาที (ภาพประกอบ 11(ข)) และ 12 รอบต่อนาที (ภาพประกอบ 11(ค)) จากภาพประกอบ 11 จะเห็นได้ว่าพฤติกรรมการอบแห้งเป็นไปตามทฤษฎีการอบแห้ง โดยความชื้นของตัวอย่างถั่วแดงหุงสุกมีค่าลดลงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียลตลอดระยะเวลาการอบแห้ง ซึ่งสอดคล้องกับคุณลักษณะการอบแห้งของผลิตภัณฑ์ผลทางการเกษตรและอาหารทั่วไป [9], [10], [42], [43], [56]–[59]



(ก)



(ข)



(ค)

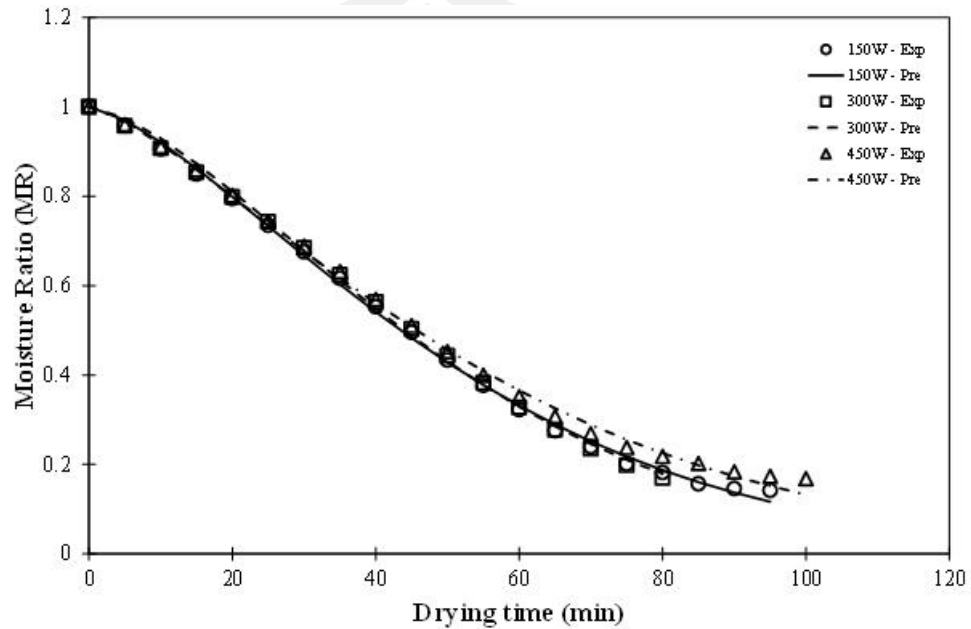
ภาพประกอบ 11 กราฟอัตราส่วนความชื้นและเวลาการอบแห้งที่อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 70 องศาเซลเซียส ที่กำลังวัตต์ของไมโครเวฟแตกต่างกัน และความเร็วรอบของจานหมุนเท่ากับ (ก) 4 รอบต่อนาที (ข) 8 รอบต่อนาที และ (ค) 12 รอบต่อนาที

ความชื้นเริ่มต้นของถั่วแดงหุงสุกในทุกสภาวะการอบแห้งที่ทดสอบในวิทยานิพนธ์นี้มีค่าร้อยละ 64.98 ± 0.31 ฐานเปียก เมื่อพิจารณาความชื้นสุดท้ายของตัวอย่างถั่วแดงหุงสุกเร็วที่ต้องการซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 10 ฐานเปียก หรืออัตราส่วนความชื้น (MR) สุดท้ายมีค่าประมาณ 0.20 จากภาพประกอบ 11(ข) พบว่า การอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ ส่งผลให้เวลาการอบแห้งสั้นกว่าสภาวะที่ไม่มีการใช้คลื่นไมโครเวฟร่วมด้วย ดังแสดงในภาพประกอบ 11(ข) การอบแห้งด้วยลมร้อนอย่างเดียวใช้เวลามากกว่า 100 นาที ในขณะที่การใช้คลื่นไมโครเวฟร่วมด้วยที่ 150 300 และ 450 วัตต์ ใช้เวลาเพียง 40-50 นาที เท่านั้น แนวโน้มของเวลาการอบแห้งที่ลดลงเมื่อใช้คลื่นไมโครเวฟในการให้ความร้อนเสริมนี้สอดคล้องกับค่าคงที่อัตราการอบแห้งดังแสดงในตาราง 35 ซึ่งส่งผลจากการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ เมื่อพิจารณาผลของการใช้กำลังวัตต์ที่แตกต่างกันในแต่ละระดับความเร็วรอบของจานหมุน ดังแสดงในภาพประกอบ 11 พบว่า ค่าความชื้นของตัวอย่างมีค่าลดลงเมื่อใช้กำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟมากขึ้น แสดงให้เห็นว่ากำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟที่มากขึ้นนี้ทำให้อัตราการให้ความร้อนเพิ่มมากขึ้นและส่งผลให้ปริมาณน้ำในตัวอย่างมีอัตราการระเหยมากขึ้นเช่นเดียวกัน ไอน้ำที่ถูกทำให้ระเหยด้วยคลื่นไมโครเวฟจะเป็นแรงผลักดันให้น้ำในตัวอย่างเกิดการเคลื่อนตัวจากภายในสู่ผิวภายนอกตัวอย่างถั่วแดงหุงสุกได้รวดเร็วขึ้นที่เวลาอบแห้งเดียวกัน ความชื้นจึงมีค่าต่ำกว่าเมื่อใช้กำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟที่มากขึ้น กลไกการอบแห้งเมื่อใช้คลื่นไมโครเวฟที่มีกำลังไฟฟ้ามักขึ้นนี้มีผลสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ [10], [42], [56], [60]

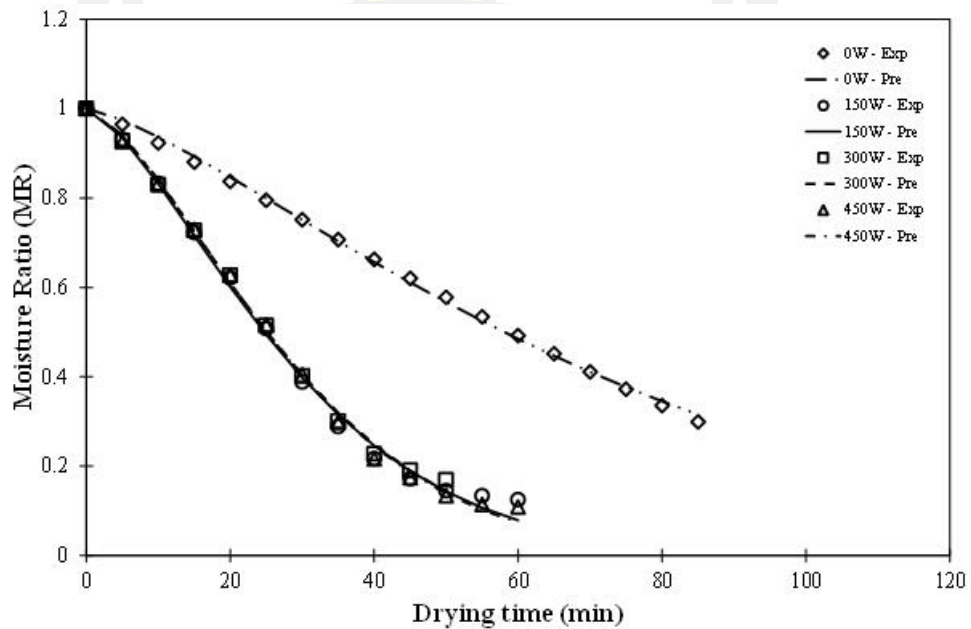
ถึงแม้ว่าการอบแห้งด้วยไมโครเวฟมีอัตราการอบแห้งที่รวดเร็ว การอบแห้งด้วยวิธีนี้ยังมีข้อจำกัดเกี่ยวกับความไม่สม่ำเสมอของอุณหภูมิหรือความชื้นของผลิตภัณฑ์ในระหว่างการอบแห้ง อันเนื่องมาจากความไม่สม่ำเสมอของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า อุณหภูมิของวัสดุบริเวณผิวหน้าหรือส่วนขอบจะร้อนเร็วมากจึงเกิดการไหม้ อาจทำลายกลิ่นรสของผลิตภัณฑ์สุดท้ายได้ ดังนั้น วัสดุหรืออาหารควรมีการเคลื่อนที่เพื่อป้องกันการเกิดบริเวณที่ร้อนมากเกินไป [35]–[40] งานวิจัยนี้จึงได้นำประเด็นนี้มาใช้ในการศึกษาด้วยเช่นเดียวกัน โดยศึกษาผลของความเร็วในการเคลื่อนที่ของตัวอย่าง ถั่วแดงหุงสุกซึ่งสอดคล้องกับความเร็วรอบของจานหมุน จากภาพประกอบ 11 จะเห็นได้ว่าที่ระดับการใช้กำลังวัตต์ไมโครเวฟเดียวกัน เวลาในการอบแห้งมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้ความเร็วรอบของจานหมุนเพิ่มขึ้น

พฤติกรรมการอบแห้งถั่วแดงหุงสุกเร็วโดยใช้วิธีการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟที่ระดับอุณหภูมิลมร้อน 80 และ 90 องศาเซลเซียส มีลักษณะเป็นไปในทางเดียวกันกับสภาวะอุณหภูมิลมร้อน 70 องศาเซลเซียส ดังแสดงในภาพประกอบ 10 และ 11 ตามลำดับ โดยการใช้ไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนสามารถช่วยลดเวลาการอบแห้งของถั่วแดงหุงสุกลงได้อีกทั้งการใช้กำลังวัตต์ไมโครเวฟสามารถช่วยเร่งให้น้ำหรือความชื้นในวัสดุเกิดการระเหยได้รวดเร็วขึ้น

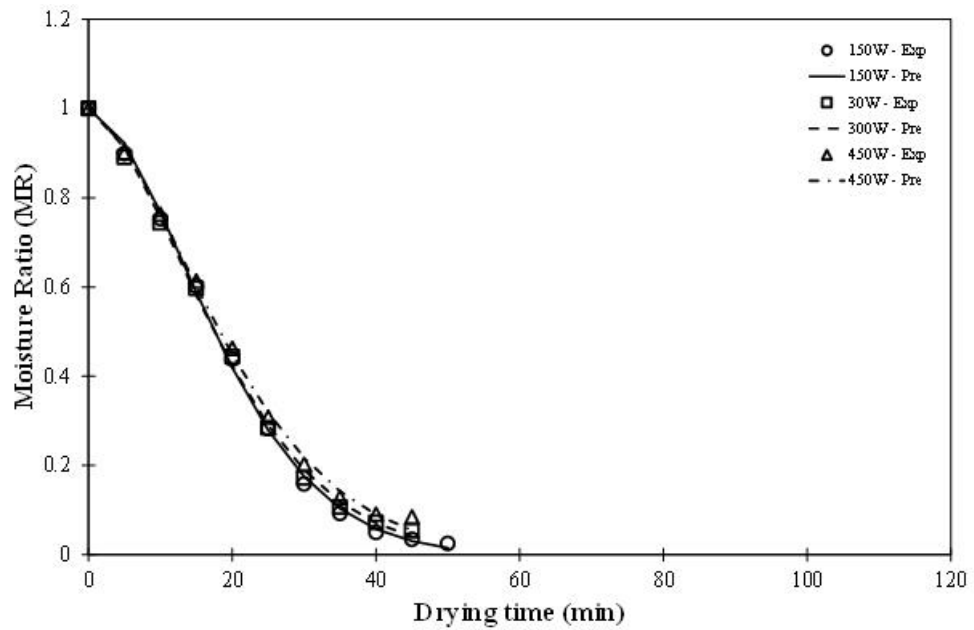
ส่งผลให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นและเวลาในการอบแห้งลดลง ในขณะที่ความเร็วรอบของจานหมุนมีอิทธิพลต่อพฤติกรรมการอบแห้งที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับอุณหภูมิลมร้อนและกำลังวัตต์ของไมโครเวฟที่ใช้



(ก)

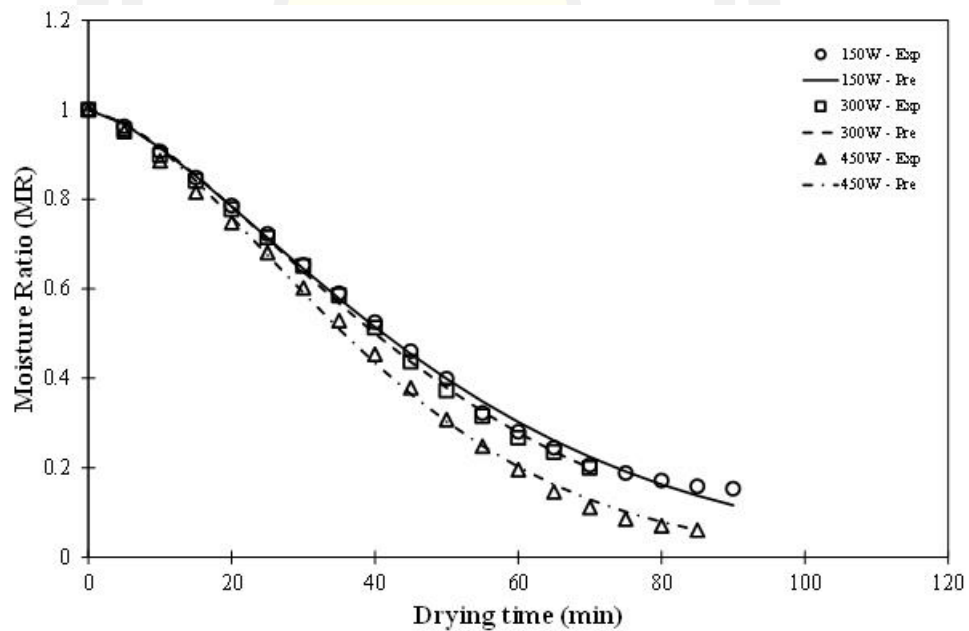


(ข)

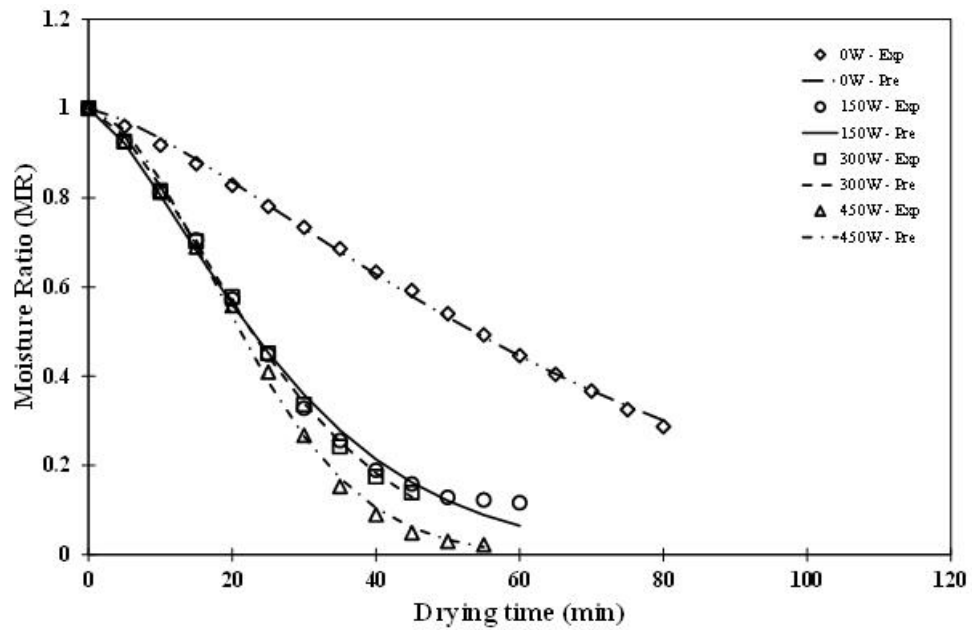


(ค)

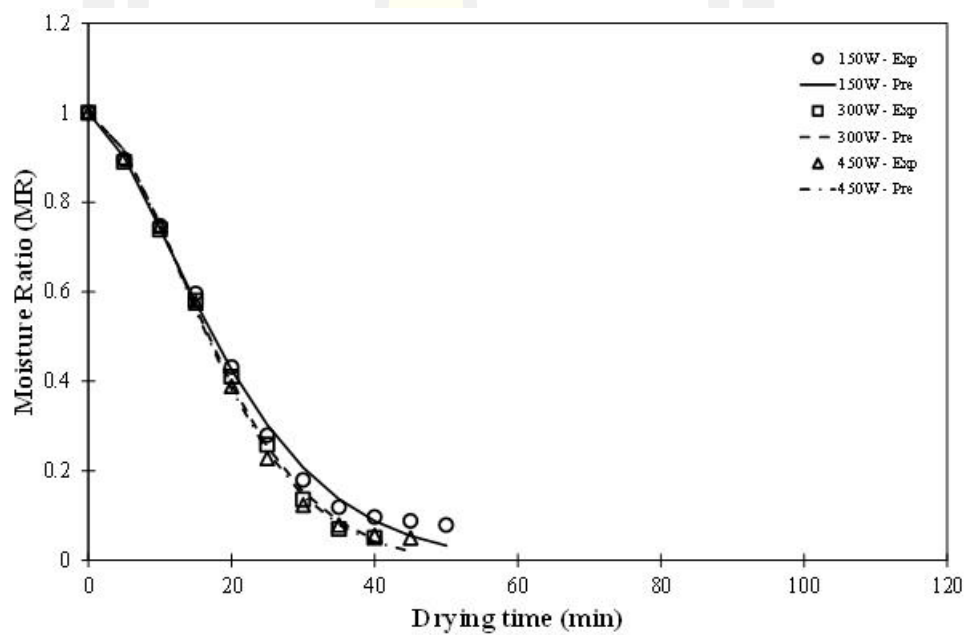
ภาพประกอบ 12 กราฟอัตราส่วนความชื้นและเวลาการอบแห้งที่อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส ที่กำลังวัตต์ของไมโครเวฟแตกต่างกัน และความเร็วรอบของจานหมุนเท่ากับ (ก) 4 รอบต่อนาที (ข) 8 รอบต่อนาที และ (ค) 12 รอบต่อนาที



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพประกอบ 13 กราฟอัตราส่วนความชื้นและเวลาการอบแห้งที่อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 90 องศาเซลเซียส ที่กำลังวัตต์ของไมโครเวฟแตกต่างกัน และความเร็วรอบของจานหมุนเท่ากับ (ก) 4 รอบต่อนาที (ข) 8 รอบต่อนาที และ (ค) 12 รอบต่อนาที

4.1.3 แบบจำลองการอบแห้ง

ในหัวนี้เป็นการศึกษาแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับถั่วแดงหุงสุกเร็วที่เตรียมจากกระบวนการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ โดยใช้แบบจำลองเอมพิริกัลหรือสมการการอบแห้งแบบกึ่งทฤษฎีที่นำเสนอในงานวิจัยที่เกี่ยวกับการอบแห้งต่าง ๆ จำนวน 11 สมการ ดังแสดงในตาราง 2

นำสมการดังกล่าวนี้มาเปรียบเทียบกับอัตราส่วนความชื้น (MR) โดยมีปัจจัยการอบแห้ง 3 ปัจจัย ๆ ละ 3 ระดับ ได้แก่ อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 70 80 และ 90 องศาเซลเซียส กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 150 300 และ 450 วัตต์ และความเร็วยรอบของจานหมุนเท่ากับ 4 8 และ 12 รอบต่อนาที ออกแบบการทดลองแบบ Full factorial ดังนั้นจะได้จำนวนการทดลองทั้งหมด 27 การทดลอง

ในการเลือกสมการอบแห้งที่เหมาะสม วิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้พารามิเตอร์ทางสถิติซึ่งประกอบด้วย ค่า R^2 ค่า Chi-square (χ^2) ค่า Root mean square error (RMSE) ค่า %P และค่า MSE โดยพิจารณาเลือกสมการเอมพิริกัลที่มีค่า R^2 สูงสุด ในขณะที่ค่าความผิดพลาด χ^2 RMSE %P และ MSE มีค่าต่ำสุด ดังแสดงในตาราง 5 - 34

ตาราง 5 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 70 องศาเซลเซียส กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 150 วัตต์ และความเร็วยรอบของจานหมุนเท่ากับ 4 รอบต่อนาที

Models	Statistical parameters for model selection				
	R^2	χ^2	RMSE	%P	MSE
1. Lewis	0.9628	0.00232	0.04684	8.88184	-0.00966
2. Page	0.9992	0.00005	0.00665	1.13858	0.00120
3. Modified Page	0.9628	0.00247	0.04684	8.88189	-0.00966
4. Henderson & Pabis	0.9780	0.00146	0.03600	6.65682	0.00229
5. Wang & Singh	0.9975	0.00016	0.01202	2.10651	-0.00282
6. Logarithm	0.9985	0.00011	0.00949	1.66664	0.00000
7. Two-Term with 4 parameters	0.9780	0.00167	0.03600	6.65684	0.00229
8. Two-Term Exponential	0.9626	0.00248	0.04695	8.90812	-0.00956
9. Midilli et al.	0.9998	0.00002	0.00349	0.67648	0.00000
10. Approximation of diffusion	0.9990	0.00007	0.00755	1.41548	0.00108
11. Verman et al.	0.9990	0.00007	0.00759	1.41555	0.00105

ตาราง 6 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 70 องศาเซลเซียส กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 150 วัตต์ และความเร็วรอบของจานหมุนเท่ากับ 8 รอบต่อนาที

Models	Statistical parameters for model selection				
	R ²	χ^2	RMSE	%P	MSE
1. Lewis	0.9636	0.00218	0.04536	8.24563	-0.00952
2. Page	0.9988	0.00008	0.00821	1.50108	0.00126
3. Modified Page	0.9636	0.00231	0.04536	8.24567	-0.00952
4. Henderson & Pabis	0.9783	0.00138	0.03500	6.15727	0.00210
5. Wang & Singh	0.9983	0.00010	0.00965	1.39046	-0.00235
6. Logarithm	0.9990	0.00007	0.00740	0.87407	0.00001
7. Two-Term with 4 parameters	0.9783	0.00157	0.03500	6.15728	0.00209
8. Two-Term Exponential	0.9627	0.00237	0.04589	8.34450	-0.00955
9. Midilli et al.	0.9998	0.00002	0.00349	0.41191	0.00008
10. Approximation of diffusion	0.9986	0.00009	0.00890	1.66671	0.00107
11. Verma et al.	0.9636	0.00247	0.04536	8.24567	-0.00952

ตาราง 7 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 70 องศาเซลเซียส กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 150 วัตต์ และความเร็วรอบของจานหมุนเท่ากับ 12 รอบต่อนาที

Models	Statistical parameters for model selection				
	R ²	χ^2	RMSE	%P	MSE
1. Lewis	0.9730	0.00174	0.04085	8.01676	-0.00822
2. Page	0.9993	0.00005	0.00677	1.38219	0.00042
3. Modified Page	0.9730	0.00183	0.04085	8.01677	-0.00822
4. Henderson & Pabis	0.9855	0.00098	0.02996	5.60553	0.00211
5. Wang & Singh	0.9955	0.00031	0.01673	3.23879	-0.00377
6. Logarithm	0.9966	0.00024	0.01443	2.82497	0.00004
7. Two-Term with 4 parameters	0.9855	0.00109	0.02996	5.60551	0.00211
8. Two-Term Exponential	0.9722	0.00188	0.04147	8.17646	-0.00788
9. Midilli et al.	0.9994	0.00005	0.00656	1.39377	0.00047
10. Approximation of diffusion	0.9994	0.00004	0.00616	1.24855	0.00015
11. Verma et al.	0.9951	0.00035	0.01742	3.40861	-0.00358

ตาราง 8 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 70 องศาเซลเซียส กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 300 วัตต์ และความเร็รรอบของจานหมุนเท่ากับ 4 รอบต่อนาที

Models	Statistical parameters for model selection				
	R ²	χ^2	RMSE	%P	MSE
1. Lewis	0.9647	0.00317	0.05409	13.31312	-0.00768
2. Page	0.9973	0.00026	0.01485	4.16002	-0.00078
3. Modified Page	0.9647	0.00346	0.05409	13.31309	-0.00768
4. Henderson & Pabis	0.9773	0.00222	0.04338	10.02259	0.00427
5. Wang & Singh	0.9894	0.00104	0.02964	7.56386	-0.00637
6. Logarithm	0.9904	0.00103	0.02818	7.51844	0.00000
7. Two-Term with 4 parameters	0.9773	0.00272	0.04338	10.02262	0.00427
8. Two-Term Exponential	0.9640	0.00353	0.05462	13.51438	-0.00734
9. Midilli et al.	0.9985	0.00018	0.01107	2.49538	-0.00005
10. Approximation of diffusion	0.9977	0.00025	0.01389	3.82730	0.00003
11. Verman et al.	0.9879	0.00130	0.03159	8.35808	-0.00591

ตาราง 9 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 70 องศาเซลเซียส กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 300 วัตต์ และความเร็รรอบของจานหมุนเท่ากับ 8 รอบต่อนาที

Models	Statistical parameters for model selection				
	R ²	χ^2	RMSE	%P	MSE
1. Lewis	0.9428	0.00597	0.07396	27.20066	-0.00669
2. Page	0.9977	0.00027	0.01491	3.80420	0.00339
3. Modified Page	0.9428	0.00656	0.07396	27.20069	-0.00669
4. Henderson & Pabis	0.9586	0.00475	0.06291	22.60514	0.00828
5. Wang & Singh	0.9918	0.00094	0.02796	9.79719	-0.00540
6. Logarithm	0.9931	0.00088	0.02574	9.23682	0.00000
7. Two-Term with 4 parameters	0.9586	0.00594	0.06291	22.60334	0.00827
8. Two-Term Exponential	0.9428	0.00656	0.07396	27.20071	-0.00669
9. Midilli et al.	0.9984	0.00022	0.01216	4.11006	0.00003
10. Approximation of diffusion	0.9947	0.00067	0.02249	7.53180	0.00461
11. Verman et al.	0.9914	0.00109	0.02860	10.23722	-0.00515

ตาราง 10 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 70 องศาเซลเซียส กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 300 วัตต์ และความเร็วรอบของจานหมุนเท่ากับ 12 รอบต่อนาที

Models	Statistical parameters for model selection				
	R ²	χ^2	RMSE	%P	MSE
1. Lewis	0.9629	0.00348	0.05672	15.53615	-0.00736
2. Page	0.9988	0.00012	0.01003	3.40033	-0.00041
3. Modified Page	0.9629	0.00380	0.05672	15.53610	-0.00736
4. Henderson & Pabis	0.9763	0.00243	0.04535	11.84974	0.00517
5. Wang & Singh	0.9911	0.00091	0.02779	7.47559	-0.00637
6. Logarithm	0.9922	0.00088	0.02596	7.40390	0.00001
7. Two-Term with 4 parameters	0.9763	0.00297	0.04535	11.84983	0.00517
8. Two-Term Exponential	0.9622	0.00387	0.05723	15.76149	-0.00693
9. Midilli et al.	0.9993	0.00009	0.00785	2.17072	0.00006
10. Approximation of diffusion	0.9989	0.00012	0.00968	3.03308	0.00040
11. Verma et al.	0.9629	0.00418	0.05672	15.53613	-0.00736

ตาราง 11 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 70 องศาเซลเซียส กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 450 วัตต์ และความเร็วรอบของจานหมุนเท่ากับ 4 รอบต่อนาที

Models	Statistical parameters for model selection				
	R ²	χ^2	RMSE	%P	MSE
1. Lewis	0.9545	0.00467	0.06480	17.31800	-0.00801
2. Page	0.9980	0.00023	0.01367	4.49496	-0.00104
3. Modified Page	0.9545	0.00525	0.06480	17.31805	-0.00801
4. Henderson & Pabis	0.9684	0.00364	0.05399	13.94057	0.00605
5. Wang & Singh	0.9867	0.00154	0.03509	9.32269	-0.00747
6. Logarithm	0.9883	0.00154	0.03287	9.12335	0.00000
7. Two-Term with 4 parameters	0.9684	0.00486	0.05399	13.93935	0.00605
8. Two-Term Exponential	0.9545	0.00525	0.06480	17.31800	-0.00801
9. Midilli et al.	0.9991	0.00014	0.00927	2.55635	0.00003
10. Approximation of diffusion	0.9981	0.00024	0.01309	3.89107	0.00046
11. Verma et al.	0.9981	0.00025	0.01310	3.88748	0.00043

ตาราง 12 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 70 องศาเซลเซียส กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 450 วัตต์ และความเร็วรอบของจานหมุนเท่ากับ 8 รอบต่อนาที

Models	Statistical parameters for model selection				
	R ²	χ^2	RMSE	%P	MSE
1. Lewis	0.9280	0.00950	0.09249	93.92528	-0.00153
2. Page	0.9969	0.00045	0.01907	12.82982	0.00609
3. Modified Page	0.9280	0.01069	0.09249	93.92527	-0.00153
4. Henderson & Pabis	0.9434	0.00841	0.08200	82.48597	0.01515
5. Wang & Singh	0.9874	0.00188	0.03874	33.93310	-0.00767
6. Logarithm	0.9885	0.00195	0.03696	34.54638	0.00068
7. Two-Term with 4 parameters	0.9434	0.01121	0.08200	82.57631	0.01521
8. Two-Term Exponential	0.9273	0.01079	0.09291	94.58256	-0.00120
9. Midilli et al.	0.9984	0.00032	0.01378	9.60758	0.00011
10. Approximation of diffusion	0.9900	0.00170	0.03446	34.94943	0.00950
11. Verman et al.	0.9280	0.01222	0.09249	93.92528	-0.00153

ตาราง 13 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 70 องศาเซลเซียส กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 450 วัตต์ และความเร็วรอบของจานหมุนเท่ากับ 12 รอบต่อนาที

Models	Statistical parameters for model selection				
	R ²	χ^2	RMSE	%P	MSE
1. Lewis	0.9454	0.00706	0.08009	62.04841	-0.00002
2. Page	0.9990	0.00014	0.01066	7.11293	0.00141
3. Modified Page	0.9454	0.00784	0.08009	62.04841	-0.00002
4. Henderson & Pabis	0.9588	0.00590	0.06951	52.69053	0.01414
5. Wang & Singh	0.9867	0.00190	0.03945	24.43853	-0.00911
6. Logarithm	0.9588	0.00664	0.06951	52.69053	0.01414
7. Two-Term with 4 parameters	0.9588	0.00759	0.06951	52.74601	0.01417
8. Two-Term Exponential	0.9448	0.00792	0.08050	62.58078	0.00031
9. Midilli et al.	0.9992	0.00015	0.00976	6.15315	0.00009
10. Approximation of diffusion	0.9962	0.00061	0.02106	13.33302	0.00552
11. Verman et al.	0.9454	0.00882	0.08009	62.04841	-0.00002

ตาราง 14 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 150 วัตต์ และความเร็รรอบของจานหมุนเท่ากับ 4 รอบต่อนาที

Models	Statistical parameters for model selection				
	R ²	χ^2	RMSE	%P	MSE
1. Lewis	0.9571	0.00377	0.05982	16.86596	-0.00768
2. Page	0.9985	0.00014	0.01130	3.24543	0.00093
3. Modified Page	0.9571	0.00398	0.05982	16.86624	-0.00768
4. Henderson & Pabis	0.9734	0.00246	0.04709	12.66759	0.00531
5. Wang & Singh	0.9913	0.00081	0.02697	7.37069	-0.00579
6. Logarithm	0.9928	0.00071	0.02456	6.86406	0.00000
7. Two-Term with 4 parameters	0.9734	0.00277	0.04709	12.66775	0.00531
8. Two-Term Exponential	0.9563	0.00404	0.06034	17.09788	-0.00724
9. Midilli et al.	0.9988	0.00012	0.00997	2.78901	0.00020
10. Approximation of diffusion	0.9980	0.00019	0.01276	3.39377	0.00177
11. Verma et al.	0.9980	0.00019	0.01278	3.38949	0.00169

ตาราง 15 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 150 วัตต์ และความเร็รรอบของจานหมุนเท่ากับ 8 รอบต่อนาที

Models	Statistical parameters for model selection				
	R ²	χ^2	RMSE	%P	MSE
1. Lewis	0.9463	0.00415	0.06252	14.93528	-0.00992
2. Page	0.9979	0.00017	0.01242	2.43478	0.00297
3. Modified Page	0.9463	0.00443	0.06252	14.93544	-0.00992
4. Henderson & Pabis	0.9645	0.00293	0.05084	11.88937	0.00435
5. Wang & Singh	0.9966	0.00028	0.01568	3.68083	-0.00308
6. Logarithm	0.9975	0.00022	0.01348	3.09142	-0.00005
7. Two-Term with 4 parameters	0.9645	0.00338	0.05084	11.88947	0.00435
8. Two-Term Exponential	0.9455	0.00450	0.06301	15.06787	-0.00973
9. Midilli et al.	0.9994	0.00005	0.00641	1.45725	-0.00001
10. Approximation of diffusion	0.9961	0.00035	0.01695	3.96317	0.00310
11. Verma et al.	0.9961	0.00035	0.01697	3.95804	0.00309

ตาราง 16 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 150 วัตต์ และความเร็วรอบของจานหมุนเท่ากับ 12 รอบต่อนาที

Models	Statistical parameters for model selection				
	R ²	χ^2	RMSE	%P	MSE
1. Lewis	0.9668	0.00274	0.05105	12.22958	-0.00781
2. Page	0.9977	0.00020	0.01342	3.86152	-0.00079
3. Modified Page	0.9668	0.00288	0.05105	12.22973	-0.00781
4. Henderson & Pabis	0.9810	0.00165	0.03860	8.53450	0.00368
5. Wang & Singh	0.9902	0.00085	0.02769	6.72370	-0.00632
6. Logarithm	0.9916	0.00077	0.02570	6.51241	0.00001
7. Two-Term with 4 parameters	0.9810	0.00184	0.03860	8.53441	0.00368
8. Two-Term Exponential	0.9660	0.00295	0.05163	12.42338	-0.00758
9. Midilli et al.	0.9991	0.00009	0.00845	1.89661	0.00005
10. Approximation of diffusion	0.9982	0.00017	0.01201	3.28906	0.00015
11. Verman et al.	0.9982	0.00017	0.01201	3.29058	0.00015

ตาราง 17 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 300 วัตต์ และความเร็วรอบของจานหมุนเท่ากับ 4 รอบต่อนาที

Models	Statistical parameters for model selection				
	R ²	χ^2	RMSE	%P	MSE
1. Lewis	0.9562	0.00454	0.06474	19.01643	-0.00679
2. Page	0.9956	0.00049	0.02042	7.75736	-0.00234
3. Modified Page	0.9562	0.00495	0.06474	19.01643	-0.00679
4. Henderson & Pabis	0.9706	0.00332	0.05304	14.49792	0.00633
5. Wang & Singh	0.9837	0.00184	0.03943	12.25551	-0.00878
6. Logarithm	0.9843	0.00196	0.03879	13.06844	0.00000
7. Two-Term with 4 parameters	0.9706	0.00406	0.05304	14.49795	0.00633
8. Two-Term Exponential	0.9558	0.00500	0.06504	19.09245	-0.00688
9. Midilli et al.	0.9984	0.00022	0.01221	3.38728	0.00019
10. Approximation of diffusion	0.9962	0.00047	0.01895	6.91802	-0.00036
11. Verman et al.	0.9562	0.00545	0.06474	19.01643	-0.00679

ตาราง 18 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 300 วัตต์ และความเร็รรอบของจานหมุนเท่ากับ 8 รอบต่อนาที

Models	Statistical parameters for model selection				
	R ²	χ^2	RMSE	%P	MSE
1. Lewis	0.9525	0.00438	0.06311	15.64546	-0.00889
2. Page	0.9976	0.00024	0.01412	3.61840	0.00050
3. Modified Page	0.9525	0.00487	0.06311	15.64552	-0.00889
4. Henderson & Pabis	0.9673	0.00335	0.05238	12.47557	0.00512
5. Wang & Singh	0.9888	0.00115	0.03068	7.59528	-0.00589
6. Logarithm	0.9905	0.00110	0.02824	7.13510	0.00000
7. Two-Term with 4 parameters	0.9673	0.00431	0.05238	12.47560	0.00512
8. Two-Term Exponential	0.9519	0.00494	0.06355	15.75860	-0.00890
9. Midilli et al.	0.9980	0.00026	0.01284	3.13366	0.00006
10. Approximation of diffusion	0.9971	0.00033	0.01545	3.80056	0.00145
11. Verman et al.	0.9525	0.00548	0.06311	15.64546	-0.00889

ตาราง 19 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 300 วัตต์ และความเร็รรอบของจานหมุนเท่ากับ 12 รอบต่อนาที

Models	Statistical parameters for model selection				
	R ²	χ^2	RMSE	%P	MSE
1. Lewis	0.9517	0.00511	0.06866	23.18444	-0.00612
2. Page	0.9972	0.00032	0.01639	6.25928	-0.00034
3. Modified Page	0.9517	0.00557	0.06866	23.18444	-0.00612
4. Henderson & Pabis	0.9667	0.00384	0.05701	18.35688	0.00764
5. Wang & Singh	0.9857	0.00165	0.03740	12.40580	-0.00797
6. Logarithm	0.9865	0.00171	0.03626	12.83932	0.00000
7. Two-Term with 4 parameters	0.9667	0.00469	0.05701	18.36706	0.00765
8. Two-Term Exponential	0.9511	0.00564	0.06909	23.41154	-0.00583
9. Midilli et al.	0.9983	0.00023	0.01271	3.65044	-0.00008
10. Approximation of diffusion	0.9967	0.00041	0.01781	5.81834	0.00166
11. Verman et al.	0.9517	0.00613	0.06866	23.18431	-0.00612

ตาราง 20 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 450 วัตต์ และความเร็รรอบของจานหมุนเท่ากับ 4 รอบต่อนาที

Models	Statistical parameters for model selection				
	R ²	χ^2	RMSE	%P	MSE
1. Lewis	0.9384	0.00824	0.08656	82.27047	0.00090
2. Page	0.9985	0.00022	0.01330	9.24061	0.00214
3. Modified Page	0.9384	0.00916	0.08656	82.27047	0.00090
4. Henderson & Pabis	0.9529	0.00701	0.07572	70.36929	0.01592
5. Wang & Singh	0.9837	0.00242	0.04447	34.56649	-0.01004
6. Logarithm	0.9822	0.00298	0.04653	44.94276	0.00000
7. Two-Term with 4 parameters	0.9529	0.00901	0.07572	70.36929	0.01592
8. Two-Term Exponential	0.9378	0.00925	0.08699	83.10252	0.00141
9. Midilli et al.	0.9988	0.00023	0.01217	8.54512	0.00019
10. Approximation of diffusion	0.9943	0.00095	0.02624	20.16885	0.00717
11. Verman et al.	0.9384	0.01030	0.08656	82.27047	0.00090

ตาราง 21 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 450 วัตต์ และความเร็รรอบของจานหมุนเท่ากับ 8 รอบต่อนาที

Models	Statistical parameters for model selection				
	R ²	χ^2	RMSE	%P	MSE
1. Lewis	0.9455	0.00681	0.07831	43.28059	-0.00232
2. Page	0.9983	0.00024	0.01396	6.07752	0.00163
3. Modified Page	0.9455	0.00766	0.07831	43.28074	-0.00232
4. Henderson & Pabis	0.9584	0.00585	0.06840	37.07041	0.01201
5. Wang & Singh	0.9870	0.00182	0.03816	18.23487	-0.00804
6. Logarithm	0.9868	0.00211	0.03848	20.79714	0.00000
7. Two-Term with 4 parameters	0.9584	0.00780	0.06840	37.09161	0.01202
8. Two-Term Exponential	0.9448	0.00775	0.07875	43.81860	-0.00168
9. Midilli et al.	0.9985	0.00029	0.01312	5.50752	0.00000
10. Approximation of diffusion	0.9956	0.00071	0.02227	9.21208	0.00476
11. Verman et al.	0.9845	0.00249	0.04171	21.99422	-0.00721

ตาราง 22 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 450 วัตต์ และความเร็วรอบของจานหมุนเท่ากับ 12 รอบต่อนาที

Models	Statistical parameters for model selection				
	R ²	χ^2	RMSE	%P	MSE
1. Lewis	0.9471	0.00633	0.07545	31.32858	-0.00461
2. Page	0.9982	0.00024	0.01399	6.47732	-0.00034
3. Modified Page	0.9471	0.00712	0.07545	31.32858	-0.00461
4. Henderson & Pabis	0.9609	0.00526	0.06489	26.29857	0.00997
5. Wang & Singh	0.9851	0.00201	0.04011	15.18496	-0.00860
6. Logarithm	0.9855	0.00223	0.03947	15.90648	0.00000
7. Two-Term with 4 parameters	0.9609	0.00702	0.06489	26.33542	0.01001
8. Two-Term Exponential	0.9465	0.00720	0.07588	31.45529	-0.00475
9. Midilli et al.	0.9987	0.00022	0.01160	4.65620	0.00004
10. Approximation of diffusion	0.9969	0.00048	0.01835	7.43772	0.00262
11. Verman et al.	0.9969	0.00048	0.01836	7.40369	0.00254

ตาราง 23 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 90 องศาเซลเซียส กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 150 วัตต์ และความเร็วรอบของจานหมุนเท่ากับ 4 รอบต่อนาที

Models	Statistical parameters for model selection				
	R ²	χ^2	RMSE	%P	MSE
1. Lewis	0.9563	0.00388	0.06065	15.86444	-0.00859
2. Page	0.9974	0.00024	0.01478	4.47005	-0.00065
3. Modified Page	0.9563	0.00411	0.06065	15.86444	-0.00859
4. Henderson & Pabis	0.9738	0.00246	0.04695	11.67939	0.00493
5. Wang & Singh	0.9873	0.00120	0.03274	8.63968	-0.00727
6. Logarithm	0.9896	0.00104	0.02958	8.10012	0.00000
7. Two-Term with 4 parameters	0.9738	0.00279	0.04695	11.67935	0.00493
8. Two-Term Exponential	0.9555	0.00418	0.06116	16.02142	-0.00853
9. Midilli et al.	0.9986	0.00015	0.01098	2.83900	0.00063
10. Approximation of diffusion	0.9976	0.00024	0.01425	4.18086	0.00050
11. Verman et al.	0.9976	0.00024	0.01425	4.18250	0.00046

ตาราง 24 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 90 องศาเซลเซียส กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 150 วัตต์ และความเร็วรอบของจานหมุนเท่ากับ 8 รอบต่อนาที

Models	Statistical parameters for model selection				
	R ²	χ^2	RMSE	%P	MSE
1. Lewis	0.9481	0.00388	0.06019	13.05844	-0.01051
2. Page	0.9983	0.00014	0.01086	1.62349	0.00235
3. Modified Page	0.9481	0.00418	0.06019	13.05855	-0.01051
4. Henderson & Pabis	0.9662	0.00273	0.04862	10.20942	0.00374
5. Wang & Singh	0.9947	0.00043	0.01923	4.31913	-0.00358
6. Logarithm	0.9959	0.00036	0.01688	3.72466	-0.00001
7. Two-Term with 4 parameters	0.9662	0.00322	0.04862	10.20409	0.00373
8. Two-Term Exponential	0.9474	0.00424	0.06065	13.19305	-0.01025
9. Midilli et al.	0.9953	0.00045	0.01821	4.25220	-0.00020
10. Approximation of diffusion	0.9971	0.00025	0.01425	2.72968	0.00234
11. Verma et al.	0.9481	0.00453	0.06019	13.05848	-0.01051

ตาราง 25 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 90 องศาเซลเซียส กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 150 วัตต์ และความเร็วรอบของจานหมุนเท่ากับ 12 รอบต่อนาที

Models	Statistical parameters for model selection				
	R ²	χ^2	RMSE	%P	MSE
1. Lewis	0.9386	0.00655	0.07865	39.03102	-0.00517
2. Page	0.9978	0.00025	0.01488	4.86879	0.00417
3. Modified Page	0.9386	0.00696	0.07865	39.03136	-0.00517
4. Henderson & Pabis	0.9579	0.00477	0.06512	31.76675	0.01029
5. Wang & Singh	0.9908	0.00104	0.03043	13.94543	-0.00658
6. Logarithm	0.9925	0.00091	0.02756	13.19701	0.00001
7. Two-Term with 4 parameters	0.9579	0.00545	0.06512	31.76688	0.01029
8. Two-Term Exponential	0.9379	0.00703	0.07906	39.35372	-0.00480
9. Midilli et al.	0.9988	0.00015	0.01084	4.97060	0.00009
10. Approximation of diffusion	0.9940	0.00072	0.02457	11.66817	0.00616
11. Verma et al.	0.9940	0.00073	0.02458	11.53546	0.00601

ตาราง 26 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 90 องศาเซลเซียส กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 300 วัตต์ และความเร็วรอบของจานหมุนเท่ากับ 4 รอบต่อนาที

Models	Statistical parameters for model selection				
	R ²	χ^2	RMSE	%P	MSE
1. Lewis	0.9621	0.00400	0.06076	17.75147	-0.00594
2. Page	0.9947	0.00061	0.02276	9.14321	-0.00411
3. Modified Page	0.9621	0.00436	0.06076	17.75159	-0.00594
4. Henderson & Pabis	0.9747	0.00292	0.04968	13.19549	0.00581
5. Wang & Singh	0.9848	0.00175	0.03851	11.15715	-0.00909
6. Logarithm	0.9833	0.00212	0.04039	13.67919	0.00000
7. Two-Term with 4 parameters	0.9747	0.00357	0.04968	13.19599	0.00580
8. Two-Term Exponential	0.9615	0.00443	0.06122	18.05439	-0.00546
9. Midilli et al.	0.9992	0.00012	0.00898	2.18899	0.00014
10. Approximation of diffusion	0.9963	0.00047	0.01907	7.30041	-0.00099
11. Verman et al.	0.9621	0.00480	0.06076	17.75147	-0.00594

ตาราง 27 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 90 องศาเซลเซียส กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 300 วัตต์ และความเร็วรอบของจานหมุนเท่ากับ 8 รอบต่อนาที

Models	Statistical parameters for model selection				
	R ²	χ^2	RMSE	%P	MSE
1. Lewis	0.9621	0.00400	0.06076	17.75147	-0.00594
2. Page	0.9947	0.00061	0.02276	9.14321	-0.00411
3. Modified Page	0.9621	0.00436	0.06076	17.75159	-0.00594
4. Henderson & Pabis	0.9747	0.00292	0.04968	13.19549	0.00581
5. Wang & Singh	0.9848	0.00175	0.03851	11.15715	-0.00909
6. Logarithm	0.9833	0.00212	0.04039	13.67919	0.00000
7. Two-Term with 4 parameters	0.9747	0.00357	0.04968	13.19599	0.00580
8. Two-Term Exponential	0.9615	0.00443	0.06122	18.05439	-0.00546
9. Midilli et al.	0.9992	0.00012	0.00898	2.18899	0.00014
10. Approximation of diffusion	0.9963	0.00047	0.01907	7.30041	-0.00099
11. Verman et al.	0.9621	0.00480	0.06076	17.75147	-0.00594

ตาราง 28 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 90 องศาเซลเซียส กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 300 วัตต์ และความเร็วรอบของจานหมุนเท่ากับ 12 รอบต่อนาที

Models	Statistical parameters for model selection				
	R ²	χ^2	RMSE	%P	MSE
1. Lewis	0.9194	0.01091	0.10002	103.97112	-0.00126
2. Page	0.9978	0.00033	0.01655	8.62452	0.00418
3. Modified Page	0.9194	0.01200	0.10002	103.97110	-0.00126
4. Henderson & Pabis	0.9393	0.00904	0.08682	88.73657	0.01712
5. Wang & Singh	0.9786	0.00319	0.05152	46.37076	-0.01112
6. Logarithm	0.9808	0.00318	0.04881	49.83685	0.00000
7. Two-Term with 4 parameters	0.9393	0.01131	0.08682	88.84297	0.01717
8. Two-Term Exponential	0.9188	0.01210	0.10040	104.21191	-0.00141
9. Midilli et al.	0.9984	0.00031	0.01427	10.73859	-0.00016
10. Approximation of diffusion	0.9899	0.00167	0.03539	33.30952	0.01021
11. Verman et al.	0.9899	0.00167	0.03539	33.16889	0.01012

ตาราง 29 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 90 องศาเซลเซียส กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 450 วัตต์ และความเร็วรอบของจานหมุนเท่ากับ 4 รอบต่อนาที

Models	Statistical parameters for model selection				
	R ²	χ^2	RMSE	%P	MSE
1. Lewis	0.9562	0.00525	0.06908	27.74910	-0.00316
2. Page	0.9955	0.00060	0.02221	13.66653	-0.00438
3. Modified Page	0.9562	0.00583	0.06908	27.74910	-0.00316
4. Henderson & Pabis	0.9677	0.00430	0.05929	22.35065	0.00896
5. Wang & Singh	0.9838	0.00215	0.04199	15.98002	-0.00958
6. Logarithm	0.9799	0.00302	0.04685	22.02031	0.00000
7. Two-Term with 4 parameters	0.9677	0.00552	0.05929	22.35065	0.00896
8. Two-Term Exponential	0.9556	0.00591	0.06954	28.08775	-0.00284
9. Midilli et al.	0.9988	0.00021	0.01159	3.86860	0.00013
10. Approximation of diffusion	0.9960	0.00060	0.02090	11.23299	-0.00121
11. Verman et al.	0.9562	0.00656	0.06908	27.74914	-0.00316

ตาราง 30 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 90 องศาเซลเซียส กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 450 วัตต์ และความเร็รรอบของจานหมุนเท่ากับ 8 รอบต่อนาที

Models	Statistical parameters for model selection				
	R ²	χ^2	RMSE	%P	MSE
1. Lewis	0.9333	0.00864	0.08764	53.38708	-0.00330
2. Page	0.9980	0.00030	0.01521	6.47804	0.00367
3. Modified Page	0.9333	0.00988	0.08764	53.38708	-0.00330
4. Henderson & Pabis	0.9478	0.00774	0.07758	46.93979	0.01306
5. Wang & Singh	0.9871	0.00192	0.03861	22.40924	-0.00768
6. Logarithm	0.9883	0.00202	0.03673	22.51069	0.00000
7. Two-Term with 4 parameters	0.9478	0.01083	0.07758	46.93511	0.01305
8. Two-Term Exponential	0.9327	0.00996	0.08803	53.28308	-0.00398
9. Midilli et al.	0.9985	0.00030	0.01297	7.99117	0.00001
10. Approximation of diffusion	0.9930	0.00121	0.02839	16.20496	0.00686
11. Verman et al.	0.9333	0.01152	0.08764	53.38708	-0.00330

ตาราง 31 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 90 องศาเซลเซียส กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 450 วัตต์ และความเร็รรอบของจานหมุนเท่ากับ 12 รอบต่อนาที

Models	Statistical parameters for model selection				
	R ²	χ^2	RMSE	%P	MSE
1. Lewis	0.9362	0.00856	0.08778	52.43806	-0.00179
2. Page	0.9980	0.00030	0.01550	11.66641	-0.00147
3. Modified Page	0.9362	0.00963	0.08778	52.43814	-0.00179
4. Henderson & Pabis	0.9512	0.00737	0.07677	44.65241	0.01402
5. Wang & Singh	0.9785	0.00325	0.05102	25.70025	-0.01125
6. Logarithm	0.9778	0.00384	0.05183	31.33058	0.00000
7. Two-Term with 4 parameters	0.9512	0.00982	0.07677	44.64404	0.01399
8. Two-Term Exponential	0.9357	0.00972	0.08816	52.92264	-0.00133
9. Midilli et al.	0.9989	0.00022	0.01156	4.90132	0.00013
10. Approximation of diffusion	0.9952	0.00084	0.02419	11.95671	0.00431
11. Verman et al.	0.9962	0.01101	0.08778	52.43806	-0.00179

ตาราง 32 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 70 องศาเซลเซียส กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 0 วัตต์ และความเร็วรอบของจานหมุนเท่ากับ 8 รอบต่อนาที

Models	Statistical parameters for model selection				
	R ²	χ^2	RMSE	%P	MSE
1. Lewis	0.9766	0.00100	0.03089	4.71391	-0.00833
2. Page	0.9995	0.00002	0.00436	0.62549	0.00024
3. Modified Page	0.9766	0.00106	0.03089	4.71394	-0.00833
4. Henderson & Pabis	0.9883	0.00053	0.02178	3.21339	0.00082
5. Wang & Singh	0.9985	0.00007	0.00788	0.96534	-0.00216
6. Logarithm	0.9993	0.00003	0.00534	0.61529	-0.00001
7. Two-Term with 4 parameters	0.9883	0.00059	0.02178	3.22042	0.00057
8. Two-Term Exponential	0.9757	0.00110	0.03146	4.79270	-0.00823
9. Midilli et al.	0.9998	0.00001	0.00291	0.37784	0.00008
10. Approximation of diffusion	0.9996	0.00002	0.00422	0.55753	-0.00018
11. Verma et al.	0.9996	0.00002	0.00425	0.55393	-0.00022

ตาราง 33 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 0 วัตต์ และความเร็วรอบของจานหมุนเท่ากับ 8 รอบต่อนาที

Models	Statistical parameters for model selection				
	R ²	χ^2	RMSE	%P	MSE
1. Lewis	0.9700	0.00151	0.03779	6.32759	-0.00821
2. Page	0.9984	0.00008	0.00866	1.35749	0.00162
3. Modified Page	0.9700	0.00161	0.03779	6.32762	-0.00821
4. Henderson & Pabis	0.9814	0.00100	0.02975	4.84893	0.00141
5. Wang & Singh	0.9995	0.00002	0.00465	0.73247	-0.00114
6. Logarithm	0.9997	0.00002	0.00388	0.48079	0.00005
7. Two-Term with 4 parameters	0.9814	0.00114	0.02975	4.85214	0.00142
8. Two-Term Exponential	0.9692	0.00165	0.03831	6.43032	-0.00791
9. Midilli et al.	0.9999	0.00000	0.00103	0.17142	-0.00001
10. Approximation of diffusion	0.9986	0.00008	0.00812	1.33568	0.00114
11. Verma et al.	0.9986	0.00008	0.00815	1.33678	0.00109

ตาราง 34 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 90 องศาเซลเซียส กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 0 วัตต์ และความเร็วรอบของจานหมุนเท่ากับ 8 รอบต่อนาที

Models	Statistical parameters for model selection				
	R ²	χ^2	RMSE	%P	MSE
1. Lewis	0.9662	0.00181	0.04125	7.05066	-0.00880
2. Page	0.9986	0.00008	0.00826	1.20634	0.00182
3. Modified Page	0.9662	0.00193	0.04125	7.05070	-0.00880
4. Henderson & Pabis	0.9789	0.00121	0.03261	5.42156	0.00164
5. Wang & Singh	0.9990	0.00006	0.00714	1.15531	-0.00147
6. Logarithm	0.9992	0.00005	0.00619	0.88941	0.00011
7. Two-Term with 4 parameters	0.9790	0.00139	0.03261	5.42158	0.00164
8. Two-Term Exponential	0.9654	0.00198	0.04177	7.15400	-0.00864
9. Midilli et al.	0.9992	0.00005	0.00637	1.11227	-0.00011
10. Approximation of diffusion	0.9987	0.00008	0.00812	1.29584	0.00130
11. Verma et al.	0.9987	0.00008	0.00815	1.29590	0.00125

จากตาราง 5 - 34 พบว่า แบบจำลองหรือสมการการอบแห้งที่นำมาศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้ ส่วนใหญ่มีค่า R² มากกว่า 0.9 โดยเฉพาะอย่างยิ่งสมการที่ประกอบด้วยพารามิเตอร์มากกว่า 2 ตัวขึ้นไปมีค่า R² มากที่สุดและค่าความผิดพลาดต่ำที่สุด เมื่อพิจารณาค่า R² และค่าความผิดพลาดทั้งหมดแล้ว พบว่า แบบจำลองที่ 9 (Midilli et al.) เหมาะสมที่สุดสำหรับ Fit ข้อมูลที่ได้จากการอบแห้งในทุกสภาวะการอบแห้ง อย่างไรก็ตาม เนื่องจากสมการการอบแห้งของ Midilli et al. ประกอบด้วยพารามิเตอร์ 4 ตัว ซึ่งใช้สำหรับปรับเส้นโค้งให้เข้ากันได้กับข้อมูลจากการทดลอง ดังนั้น การนำไปใช้ในทางปฏิบัติเพื่อศึกษาพฤติกรรมและศึกษาออกแบบสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งของถั่วแดงหุงสุกเร็วในวิทยานิพนธ์นี้อาจเกิดความยุ่งยาก ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการศึกษาในหัวข้อต่อไป จึงได้นำแบบจำลองการอบแห้งของ Page (แบบจำลองหมายเลข 2) ซึ่งมีค่า R² สูงกว่า 0.99 และมีค่า χ^2 ค่า RMSE ค่า %P และค่า MSE ต่ำในทุกสภาวะการอบแห้ง ไปใช้เพื่อศึกษาพฤติกรรมการอบแห้งของถั่วแดงหุงสุกเร็วที่เตรียมด้วยวิธีการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟต่อไป

4.1.4 สมการความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ของแบบจำลองการอบแห้งของ Page

แบบจำลองการอบแห้งของ Page เป็นแบบจำลองการอบแห้งที่ใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับการอธิบายพฤติกรรมการอบแห้งของวัสดุชีวภาพ [53] สมการนี้ได้นำมาเปรียบเทียบกับอัตราส่วนความชื้นของการทดลองโดยมี 3 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิลมร้อน 3 ระดับ ได้แก่ 70 80 และ 90 องศาเซลเซียส ร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ 3 ระดับ ได้แก่ 150 300 และ 450 วัตต์

และความเร็วรอบของถังหมุน 3 ระดับ ได้แก่ 4 8 และ 12 รอบต่อนาที ซึ่งจะได้พารามิเตอร์ของสมการของ Page คือ ค่าคงที่อัตรา (k) ค่าคงที่เลขชี้กำลัง (n) ดังสมการที่ 2 ในตาราง 2 ในแต่ละสภาวะการอบแห้ง นอกจากนี้สามารถประมาณเวลาการอบแห้ง (DT) และค่าสัมประสิทธิ์แพร่ความชื้นประสิทธิผล (D_e) แสดงดังตาราง 35

ตาราง 35 พารามิเตอร์ของสมการการอบแห้งของ Page เวลาการอบแห้ง และค่าสัมประสิทธิ์แพร่ความชื้นประสิทธิผลที่สภาวะการอบแห้งแตกต่างกัน

Drying conditions			Drying model estimates			D_e X10 ⁻⁸ m ² /s	R ²
T	MW	RPM	k	n	Predicted DT		
70	150	4	0.002802	1.397115	105.712	555.38	0.9787
70	150	8	0.002803	1.387709	107.174	535.08	0.9758
70	150	12	0.003084	1.319745	129.607	464.23	0.9893
70	300	4	0.006746	1.392789	56.7186	1092.04	0.9850
70	300	8	0.004220	1.580077	47.3371	1470.95	0.9616
70	300	12	0.006387	1.420842	54.4745	1170.48	0.9844
70	450	4	0.007472	1.492377	40.897	1564.41	0.9795
70	450	8	0.004270	1.753675	31.8488	2773.76	0.9244
70	450	12	0.006236	1.640494	32.0669	2444.91	0.9700
80	150	4	0.002937	1.448254	86.9294	750.02	0.9806
80	150	8	0.002237	1.516264	84.4959	736.21	0.9631
80	150	12	0.003762	1.365127	95.2404	657.19	0.9878
80	300	4	0.006357	1.463095	49.0349	1308.12	0.9788
80	300	8	0.005647	1.492967	49.0979	1276.18	0.9759
80	300	12	0.005319	1.512866	48.3273	1376.12	0.9781
80	450	4	0.005123	1.714137	31.229	2658.94	0.9668
80	450	8	0.006844	1.614946	32.184	2306.27	0.9706
80	450	12	0.006944	1.585731	34.2269	2031.17	0.9724
90	150	4	0.003191	1.447512	82.4305	774.70	0.9824
90	150	8	0.002666	1.507646	77.7639	778.83	0.9699
90	150	12	0.002258	1.602854	65.7675	1145.49	0.9580

Drying conditions			Drying model estimates			D_e X10 ⁻⁸ m ² /s	R ²
T	MW	RPM	k	n	Predicted DT		
90	300	4	0.008354	1.414633	45.8688	1363.60	0.9798
90	300	8	0.005082	1.575765	42.745	1517.50	0.9678
90	300	12	0.002495	1.845476	36.1059	2464.57	0.9477
90	450	4	0.009247	1.510644	33.5597	1927.83	0.9730
90	450	8	0.005556	1.711526	29.8701	2613.52	0.9490
90	450	12	0.005431	1.727952	29.3326	2508.25	0.9710
70	0	8	0.002843	1.289464	152.507	359.48	0.9886
80	0	8	0.003027	1.337769	121.593	461.05	0.9793
90	0	8	0.002987	1.368375	110.841	509.27	0.9779

ตาราง 35 แสดงค่าคงที่อัตราการอบแห้ง (k) ค่าคงที่เลขชี้กำลัง (n) ของสมการการอบแห้งของ Page เวลาการอบแห้งที่ทำนายจากสมการการอบแห้งของ Page และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (D_e) ที่สภาวะการอบแห้งแตกต่างกัน จากตาราง 35 พบว่า ผลการทดลองทั้งหมดมีค่าเปลี่ยนแปลงตามสภาวะการอบแห้ง

ค่าคงที่อัตรา (k) บ่งบอกถึงประสิทธิภาพการอบแห้ง โดยที่อัตราการอบแห้งสูงจะแสดงด้วยค่า k ที่สูง ดังนั้นพารามิเตอร์นี้ใช้เพื่อกำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดโดยยึดตามค่า k สูงสุด จากตาราง 35 พบว่า ค่าคงที่อัตราการอบแห้งมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 0.002237-0.009247 ซึ่งค่าต่ำสุดได้จากการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส ร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟที่ 150 วัตต์ และใช้ความเร็วรอบของจานหมุนเท่ากับ 8 รอบต่อนาที ในขณะที่ค่าสูงสุดได้จากการอบแห้งภายใต้อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 90 องศาเซลเซียส ร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ 450 วัตต์ และความเร็วรอบการหมุนของจานเท่ากับ 4 รอบต่อนาที เมื่อพิจารณาผลของการให้ความร้อนเสริมจากคลื่นไมโครเวฟ พบว่า ค่าคงที่อัตราการอบแห้งสำหรับการอบแห้งถั่วแดงหุงสุกเร็วด้วยการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ มีค่าคงที่อัตราการอบแห้ง (0.002237-0.009247) เฉลี่ยสูงกว่าการใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียว (0.002843-0.003027) จากผลการทดลองดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าการเพิ่มการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟนั้นทำให้อัตราการอบแห้งมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟทำให้โมเลกุลของน้ำภายในวัสดุเกิดการหมุนและความร้อนที่ระดับอุณหภูมิกำลังหนึ่งซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกดูดซับด้วยโมเลกุลน้ำ ทำให้น้ำในวัสดุเกิดการระเหยและเคลื่อนที่ออกสู่อากาศภายนอกอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้อัตราการอบแห้งหรือ

ค่าคงที่อัตราการอบแห้ง นั้นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะการอบแห้งที่ใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียว [54]

เนื่องจากปริมาณความร้อนเชิงปริมาตร (Volumetric heat) ที่เกิดจากคลื่นไมโครเวฟแปรผันตามกำลังวัตต์ ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ศึกษาอัตราการอบแห้งที่ส่งผลจากการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังวัตต์ไมโครเวฟ โดยตัวแปรที่ศึกษาอยู่ในช่วง 150 – 450 วัตต์ จากตาราง 35 พบว่า ที่ระดับอุณหภูมิของลมร้อนและระดับความเร็วรอบของจานหมุนคงที่ ค่าคงที่อัตราการอบแห้งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อกำลังวัตต์ของไมโครเวฟเพิ่มขึ้น มีความสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ [10], [42], [55] ซึ่งสามารถอธิบายได้จากโมเลกุลของน้ำ (ความชื้น) ภายในถั่วแดงหุงสุกดูดซับปริมาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามากขึ้น ส่งผลให้ความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน

นอกจากอุณหภูมิลมร้อนและกำลังวัตต์ไมโครเวฟแล้ว วิทยานิพนธ์นี้ยังได้ศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบของจานหมุนต่อพฤติกรรมการอบแห้งของถั่วแดงหุงสุก จากตาราง 35 พบว่า สภาวะการอบแห้งที่อุณหภูมิลมร้อนและกำลังวัตต์ไมโครเวฟคงที่ ส่วนใหญ่ค่าคงที่อัตราการอบแห้งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วรอบของจานหมุนมีค่าลดลง ยกเว้นที่สภาวะการอบแห้งที่อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 70 องศาเซลเซียส ร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟที่ 150 วัตต์ สภาวะอุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส ร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟที่ 150 วัตต์ และสภาวะอุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส ร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟที่ 450 วัตต์ ค่าคงที่อัตราการอบแห้งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วรอบของจานหมุนมีค่าเพิ่มขึ้น

ตาราง 36 พารามิเตอร์ทางสถิติสำหรับการสมการความสัมพันธ์ที่เหมาะสมของค่าคงที่อัตราการอบแห้ง k

Models	Statistical parameters		
	R ²	RMSE	%P
Linear	0.5928	0.00121	22.80440
Logarithm	0.6501	0.00113	20.45674
Power	0.6425	0.00114	21.51428
Quadratic	0.7844	0.00090	16.39056
Arrhenius	0.6425	0.00114	21.52744

ตาราง 37 พารามิเตอร์ทางสถิติสำหรับการสมการความสัมพันธ์ที่เหมาะสมของค่าคงที่เลขชี้กำลัง n

Models	Statistical parameters		
	R ²	RMSE	%P
Linear	0.5477	0.08791	4.48884
Logarithm	0.5397	0.08858	4.71647
Power	0.5449	0.08818	4.65688
Quadratic	0.7219	0.06860	3.34008
Arrhenius	0.5459	0.08809	4.64289

ตาราง 36 และตาราง 37 แสดงพารามิเตอร์ทางสถิติสำหรับสมการความสัมพันธ์ที่แตกต่างกัน ซึ่งประกอบด้วยสมการเส้นตรง (Linear) สมการพหุนามกำลังสอง (Quadratic) สมการลอการิทึม (Logarithm) สมการกำลัง (Power) และสมการอาร์เรเนียส (Arrhenius) ของค่าคงที่อัตราการอบแห้ง (k) และค่าคงที่เลขชี้กำลัง (n) ตามลำดับ จากตาราง 36 และตาราง 37 พบว่า สมการพหุนามกำลังสองมีความเหมาะสมที่สุดเมื่อพิจารณาค่า R² สูงสุด และค่า RMSE และ %P ต่ำสุด ดังนั้น สมการการอบแห้งของ Page สำหรับใช้ในการอธิบายพฤติกรรมรอบแห้งถั่วแดงหุงสุกด้วยวิธีการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ จึงสามารถเขียนได้ดังนี้

$$MR = \exp(-kt^n) \quad (16)$$

โดยที่

$$k = -0.014975 + 0.000291(T) + 0.00003(MW) + 0.000687(RPM) - 0.000019(T)(RPM) - 0.000001(T)^2 + 0.000054(RPM)^2 \quad (17)$$

$$n = 2.276936 - 0.02678(T) + 0.001602(MW) - 0.062837(RPM) - 0.000022(T)(MW) + 0.001468(T)(RPM) + 0.000034(MW)(RPM) + 0.000168(T)^2 + 0.000001(MW)^2 - 0.003401(RPM)^2 \quad (18)$$

4.2 ผลการศึกษาสถานะการอบแห้งที่เหมาะสม

4.2.1 ผลตอบสนอง

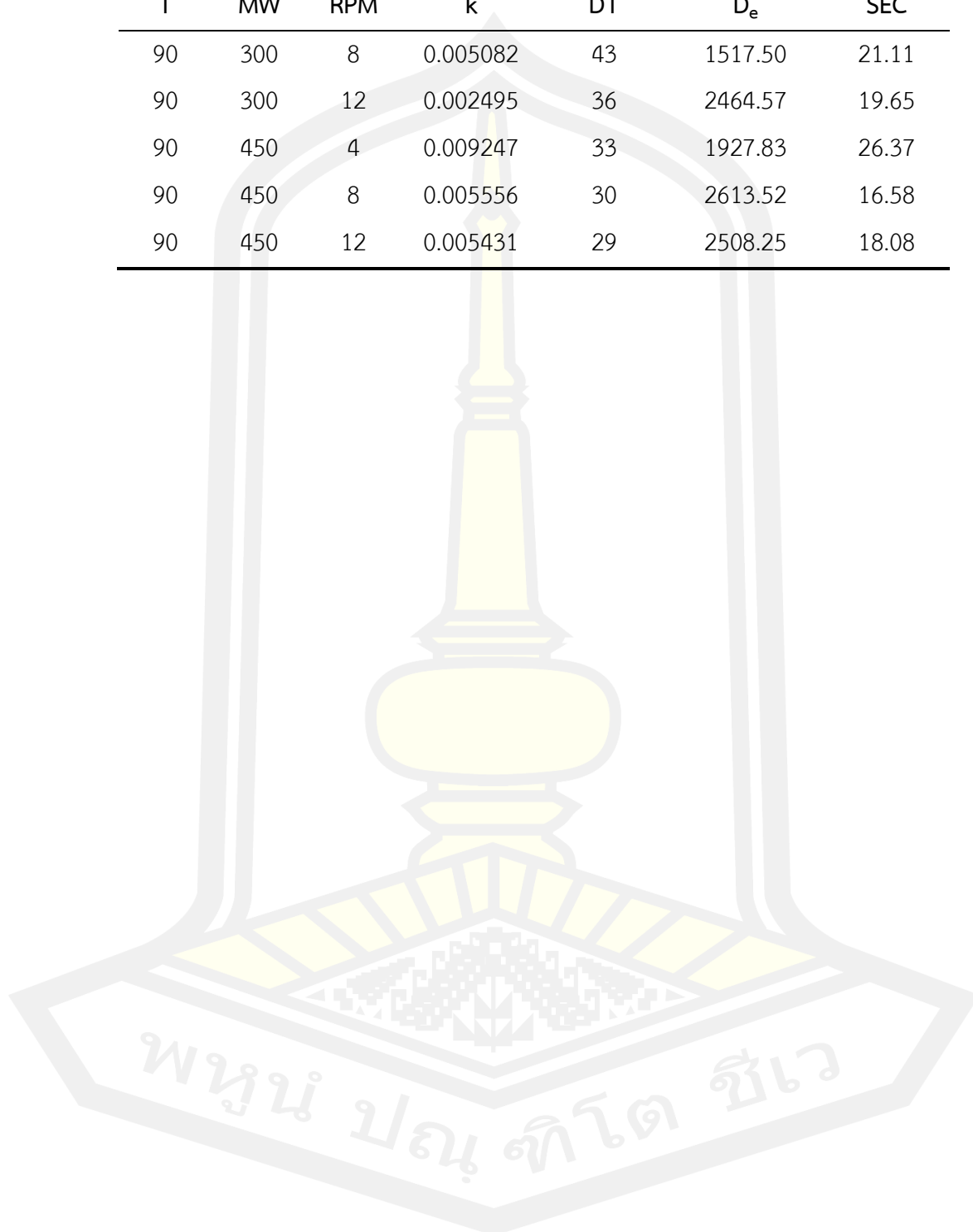
ผลตอบสนองที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย ค่าคงที่อัตราการอบแห้ง (k) ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (D_e) ค่าเวลาประมาณการอบแห้ง (DT) และค่าการใช้พลังงานจำเพาะ (SEC) ที่

ปัจจัยสภาวะการอบแห้งที่ศึกษาประกอบด้วย 3 ปัจจัย 3 ระดับ คือ อุณหภูมิลมร้อน (X_1) กำลังวัตต์ ไมโครเวฟ (X_2) และความเร็วรอบของจานหมุน (X_3) โดยใช้สมการพหุนามกำลังสอง (Quadratic equation) ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองของแต่ละผลตอบสนองแสดงในตาราง 38

ตาราง 38 ผลตอบสนองที่พารามิเตอร์การอบแห้งแตกต่างกัน

Drying conditions				Responses		
T	MW	RPM	k	DT	D_e	SEC
70	150	4	0.002802	106	555.38	38.50
70	150	8	0.002803	107	535.08	27.85
70	150	12	0.003084	130	464.23	68.06
70	300	4	0.006746	57	1092.04	29.94
70	300	8	0.004220	47	1470.95	22.90
70	300	12	0.006387	54	1170.48	25.74
70	450	4	0.007472	41	1564.41	20.07
70	450	8	0.004270	32	2773.76	17.99
70	450	12	0.006236	32	2444.91	24.89
80	150	4	0.002937	87	750.02	56.59
80	150	8	0.002237	84	736.21	42.44
80	150	12	0.003762	95	657.19	61.10
80	300	4	0.006357	49	1308.12	32.03
80	300	8	0.005647	49	1276.18	19.90
80	300	12	0.005319	48	1376.12	22.83
80	450	4	0.005123	31	2658.94	25.91
80	450	8	0.006844	32	2306.27	19.94
80	450	12	0.006944	34	2031.17	18.03
90	150	4	0.003191	82	774.70	61.81
90	150	8	0.002666	78	778.83	40.16
90	150	12	0.002258	66	1145.49	36.78
90	300	4	0.008354	46	1363.60	35.46

Drying conditions				Responses		
T	MW	RPM	k	DT	D _e	SEC
90	300	8	0.005082	43	1517.50	21.11
90	300	12	0.002495	36	2464.57	19.65
90	450	4	0.009247	33	1927.83	26.37
90	450	8	0.005556	30	2613.52	16.58
90	450	12	0.005431	29	2508.25	18.08



ตาราง 39 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน ANOVA ของ Fitted model สำหรับผลตอบสนองทั้งหมดที่ใช้ในการหาสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสม

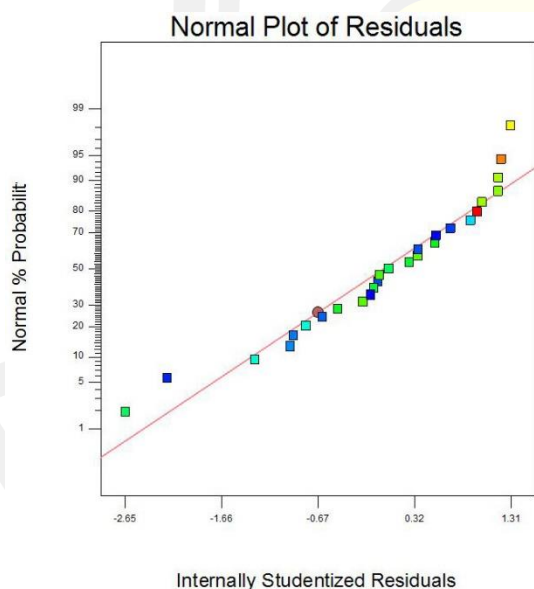
Source	ค่าสัมประสิทธิ์โดยประมาณ			
	k	DT	D _e	SEC
Model (p value)	0.0004 ^d	<0.0001 ^d	<0.0001 ^d	<0.0001 ^d
Intercept				
(a ₀)	5.12×10 ⁻³	44.59	1478.25	21.12
Linear terms				
(a ₁) X ₁	1.44×10 ^{-4ns}	-9.06 ^d	167.95 ^a	3.33×10 ^{-3ns}
(a ₂) X ₂	1.74×10 ^{-3d}	-30.06 ^d	801.77 ^d	-13.67 ^d
(a ₃) X ₃	-5.73×10 ^{-4a}	-0.44 ^{ns}	125.97 ^{ns}	-1.75 ^{ns}
Interaction terms				
(a ₁₂) X ₁ X ₂	2.36×10 ^{-4ns}	8.67 ^d	-73.15 ^{ns}	-0.52 ^{ns}
(a ₁₃) X ₁ X ₃	-7.75×10 ^{-4a}	-3.50 ^{ns}	98.70 ^{ns}	-6.61 ^c
(a ₂₃) X ₂ X ₃	-2.84×10 ^{-4ns}	-2.17 ^{ns}	53.86 ^{ns}	-1.70 ^{ns}
Quadratic terms				
(a ₁₁) X ₁ ²	-1.13×10 ^{-4ns}	1.72 ^{ns}	53.62 ^{ns}	-2.53 ^{ns}
(a ₂₂) X ₂ ²	-1.02×10 ^{-4a}	15.06 ^d	63.73 ^{ns}	9.00 ^c
(a ₃₃) X ₃ ²	8.61×10 ^{-4ns}	2.89 ^{ns}	-97.73 ^{ns}	9.12 ^c
F value				
Model	6.87	57.55	13.27	12.16
X ₁	2.89×10 ⁻³	37.71	4.78	4.39×10 ⁻⁶
X ₂	42.18	415.42	109.00	73.44
X ₃	4.55	0.091	2.69	1.21
X ₁ X ₂	0.51	23.03	0.60	0.072
X ₁ X ₃	5.55	3.76	1.10	11.50
X ₂ X ₃	0.74	1.44	0.33	0.76
X ₁ ²	0.059	0.45	0.16	0.85
X ₂ ²	4.81	34.75	0.23	10.67

Source	ค่าสัมประสิทธิ์โดยประมาณ			
	k	DT	D _e	SEC
χ^2_3	3.43	1.28	0.54	10.94
R ²	0.7844	0.9682	0.8754	0.8656
Adj.R ²	0.6702	0.9514	0.8094	0.7944
Predicted R ²	0.4558	0.8979	0.6634	0.5973
Adeq. Precision	9.599	23.521	11.32	10.96
C.V. (%)	23.04	10.84	21.85	21.42
Std. Dev.	1.14×10^{-3}	6.26	325.81	6.75

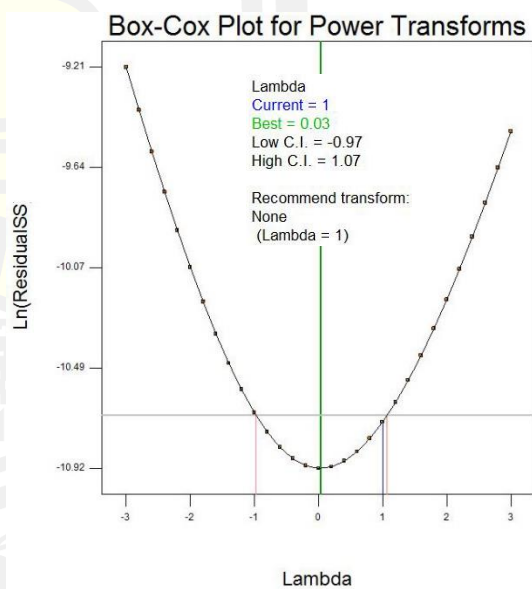
หมายเหตุ : a แทนนัยสำคัญที่ระดับ $p < 0.05$ b แทนนัยสำคัญที่ระดับ $p < 0.01$ c แทนนัยสำคัญที่ระดับ $p < 0.005$ และ d แทนนัยสำคัญที่ระดับ $p < 0.001$

ตาราง 39 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของปัจจัยการอบแห้งโดยพิจารณาสมการความสัมพันธ์พหุนามกำลังสองของผลตอบสนองทั้งหมด เมื่อพิจารณาผลตอบสนองค่าคงที่ อัตราการอบแห้ง (k) จากตาราง 39 พบว่าค่า F value ของแบบจำลองมีค่าเท่ากับ 6.87 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองดังกล่าวมีนัยสำคัญ โดยที่มีโอกาสเพียงร้อยละ 0.04 เท่านั้นที่ค่า Model F-Value ที่มีค่ามากเกิดขึ้นจากสิ่งรบกวน (Noise) ค่าของ “Prob > F” มีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่าเทอมของแบบจำลองมีนัยสำคัญ ซึ่งจากตาราง 39 เทอมของกำลังวัตต์ไมโครเวฟและความเร็วรอบมีนัยสำคัญ ค่า Pred R-Squared มีค่าเท่ากับ 0.4558 ซึ่งมีค่าแตกต่างจาก Adj R-Squared (0.6702) เล็กน้อย ค่าที่มีความแตกต่างกันเช่นนี้อาจแสดงผลของบล็อกที่มีค่ามาก หรืออาจจะเกิดจากปัญหาที่แบบจำลองหรือข้อมูล หรือทั้งสองอย่าง ดังนั้นความเป็นไปได้ที่จะทำให้ค่าดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงนั้น คือ การลดจำนวนเทอมของแบบจำลอง การเปลี่ยนฟังก์ชันของผลตอบสนอง หรือการพิจารณาข้อมูลที่มีโอด (Outlier) เป็นต้น ค่า Adeq Precision ใช้สำหรับวัดอัตราส่วนของสัญญาณต่อสิ่งรบกวน (Signal to noise ratio) ซึ่งปกติอัตราส่วนที่ต้องการมีค่ามากกว่า 4 จากตาราง 39 จะเห็นได้ว่าค่า Adeq Precision มีค่าเท่ากับ 9.599 ซึ่งแสดงสัญญาณที่เพียงพอ (Adequate signal) ดังนั้นแบบจำลองนี้จึงสามารถที่จะนำมาใช้เพื่อนำทางไปยังสิ่งที่ต้องการออกแบบได้ จากตาราง 39 จะเห็นได้ว่าค่า F value ของปัจจัยกำลังวัตต์ไมโครเวฟมีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 42.18 รองลงมา คือ ปัจจัยความเร็วรอบของจานหมุนเท่ากับ 4.55 และอุณหภูมิลมร้อนมีค่าต่ำที่สุดเท่ากับ 0.003 แสดงให้เห็นว่าปัจจัยของกำลังวัตต์ไมโครเวฟส่งผลต่อค่าคงที่อัตราการอบแห้งมากที่สุด รองลงมา คือ ความเร็วรอบของจานหมุน และอุณหภูมิลมร้อน ตามลำดับ

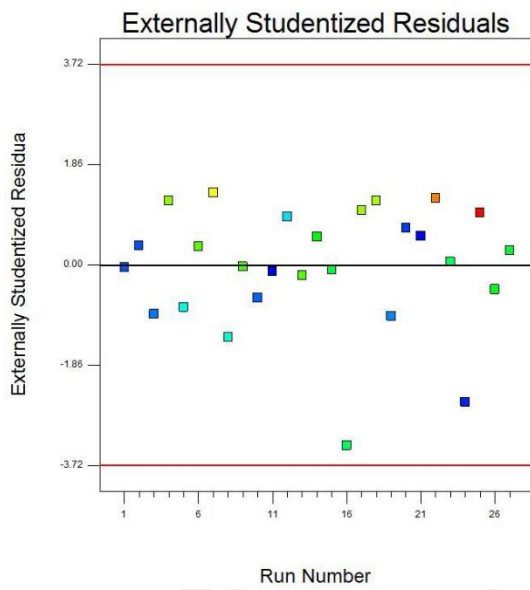
ภาพประกอบ 14 แสดงกราฟสรุปการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อตรวจสอบการแจกแจงปกติของเศษเหลือ (ภาพประกอบ 14(ก)) เพื่อตรวจสอบการแปลงฟังก์ชันโดยใช้การพล็อตแบบ Box-Cox (ภาพประกอบ 14(ข)) เพื่อหาข้อมูลที่ไม่เข้าพวก (ภาพประกอบ 14(ค)) และเพื่อตรวจสอบค่าผิดพลาดของค่าคงที่ (ภาพประกอบ 14(ง)) จากภาพประกอบ 14(ก) จะเห็นได้ว่าค่าเศษเหลือมีค่าอยู่ใกล้กับเส้นทแยงมุมซึ่งแทนข้อมูลที่มีการกระจายแบบปกติ ภาพประกอบ 14(ข) แสดงพล็อตการแปลงฟังก์ชันกำลังของ Box-Cox ซึ่งเป็นการแปลงปรับข้อมูลให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันกำลัง ทำให้ข้อมูลที่มีการกระจายเป็นแบบปกติ [61] จากภาพประกอบดังกล่าว พบว่า ค่าปัจจุบันมีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งมีค่าต่างจากค่าที่ดีที่สุดที่มีค่าเท่ากับ 0.03 อย่างไรก็ตามเนื่องจากค่าปัจจุบันอยู่ในช่วงค่าต่ำสุด (-0.97) และค่าสูงสุด (1.07) ดังนั้น แบบจำลองนี้จึงไม่จำเป็นต้องทำการแปลงฟังก์ชันกำลัง ภาพประกอบ 14(ค) และ 14(ง) แสดงการพล็อตระหว่างค่าเศษเหลือ (Residuals) กับหมายเลขการทดลอง (Run number) และค่าเศษเหลือกับค่าคงที่อัตราการอบแห้งที่ทำนายได้จากแบบจำลอง (Predicted drying-rate constant) จากภาพประกอบดังกล่าวจะเห็นได้ว่าค่าเศษเหลือมีการกระจายแบบสุ่มรอบเส้นค่าที่เท่ากับ 0 ดังนั้นจึงถือได้ว่าเป็นการพล็อตเศษเหลือที่ดีและเป็นข้อยืนยันว่าแบบจำลองของค่าคงที่อัตราการอบแห้งสามารถนำไปใช้ในการประมาณค่าได้อย่างดีโดยไม่มีค่าผิดพลาดมาก



(ก)

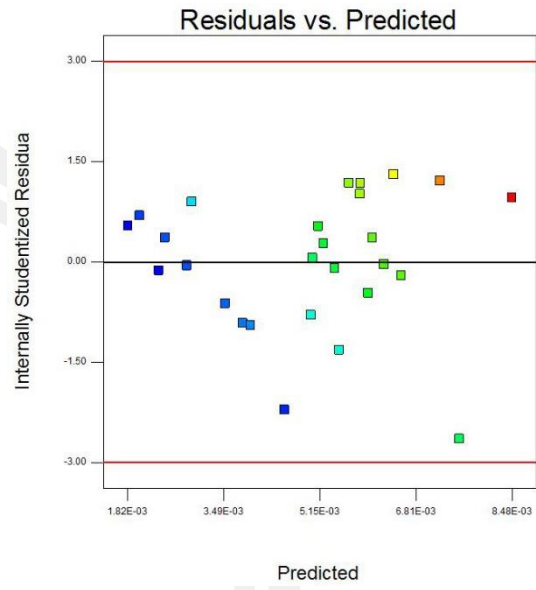


(ข)



Run Number

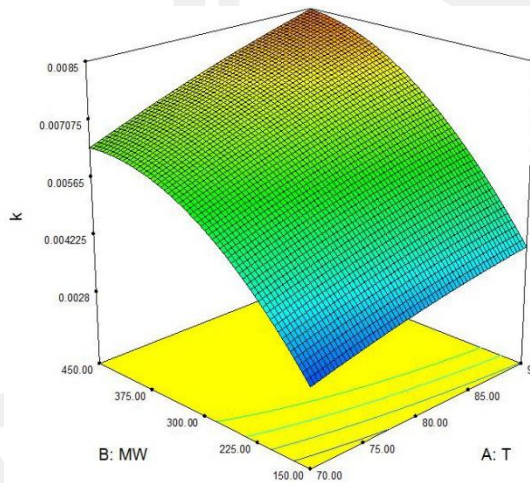
(ค)



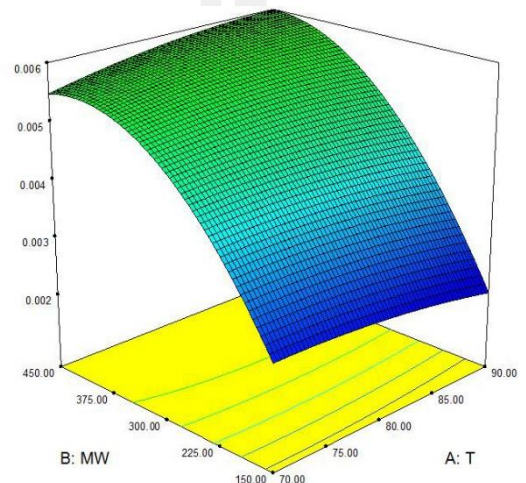
Predicted

(ง)

ภาพประกอบ 14 พล็อตของ (ก) Normal probability vs. Studentized residuals (ข) Box-Cox for power transformation (ค) Residual against run number และ (ง) Residuals against predicted drying-rate constant

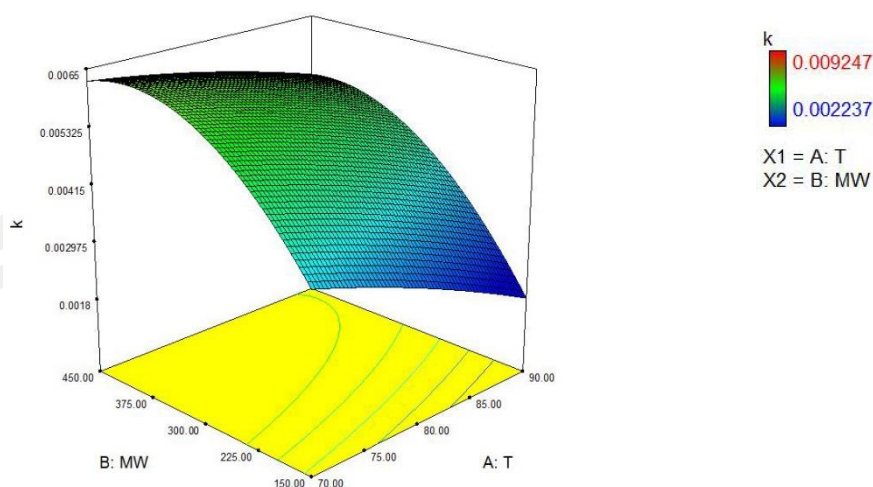


(ก)



(ข)

พหุคูณ บณุ ทิโต ชีว



(ค)

ภาพประกอบ 15 ผลของอุณหภูมิและกำลังวัตต์ไมโครเวฟต่อค่าคงที่อัตราการอบแห้งที่ความเร็วรอบของจานหมุนเท่ากับ (ก) 4 รอบต่อนาที (ข) 8 รอบต่อนาที และ (ค) 12 รอบต่อนาที

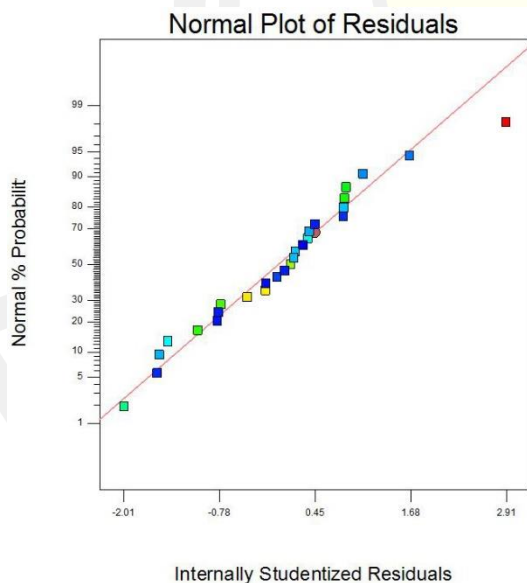
ภาพประกอบ 15 แสดงกราฟ 3 มิติของผลตอบสนองค่าคงที่อัตราการอบแห้งที่ส่งผลจากปัจจัยอุณหภูมิลมร้อน (T) และกำลังวัตต์ไมโครเวฟ (MW) ที่ความเร็วรอบของจานหมุนเท่ากับ 4 รอบต่อนาที (ภาพประกอบ 15(ก)) 8 รอบต่อนาที (ภาพประกอบ 15(ข)) และ 12 รอบต่อนาที (ภาพประกอบ 15(ค)) จากภาพประกอบ 15 พบว่า กำลังวัตต์ไมโครเวฟมีผลกระทบในเชิงบวกอย่างชัดเจนต่อค่าคงที่อัตราการอบแห้ง โดยที่ค่าคงที่อัตราการอบแห้งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อกำลังวัตต์ไมโครเวฟเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะที่ความเร็วรอบของจานหมุนเท่ากับ 4 รอบต่อนาที ซึ่งจะเห็นได้ว่าอิทธิพลในเชิงบวกเห็นได้เด่นชัดเมื่อเปรียบเทียบที่ความเร็วรอบที่สูงขึ้น ภาพประกอบ 15(ก) แสดงกราฟเส้นรูปร่าง (Contour plot) ของค่าคงที่อัตราการอบแห้งที่ความเร็วรอบเท่ากับ 4 รอบต่อนาที จากภาพดังกล่าวพบว่าปัจจัยของกำลังวัตต์ไมโครเวฟมีอิทธิพลมากที่อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 90 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าคงที่อัตราการอบแห้งสูงสุดประมาณ 0.0085 ที่กำลังวัตต์เท่ากับ 450 วัตต์และอุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 90 องศาเซลเซียส ส่วนค่าต่ำสุดมีค่าประมาณ 0.0028 ที่สภาวะอุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 70 องศาเซลเซียส และกำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 150 วัตต์ เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิลมร้อนที่ระดับความเร็วรอบ 4 รอบต่อนาที นี้พบว่าพารามิเตอร์ดังกล่าวนี้มีอิทธิพลเชิงบวกแบบเชิงเส้น กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิลมร้อนเพิ่มขึ้นค่าคงที่อัตราการอบแห้งมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน แต่อย่างไรก็ตาม อิทธิพลของปัจจัยอุณหภูมิลมร้อนนี้ส่งผลต่อค่าคงที่อัตราการอบแห้งน้อยกว่าอิทธิพลของกำลังวัตต์ไมโครเวฟ ซึ่งสังเกตได้จากความชันของกราฟเส้นรูปร่าง สอดคล้องกับค่า F value ดังแสดงในตาราง 39 ที่มีค่าสูงถึง 42.18 ในขณะที่ค่า F value ของปัจจัยอุณหภูมิลมร้อนมีค่าเพียง 2.89×10^{-3} นอกจากนี้ อิทธิพลของกำลังวัตต์ไมโครเวฟที่ส่งผลต่อค่าคงที่อัตราการอบแห้งมากกว่าปัจจัยอุณหภูมิลมร้อนนั้น

ยังสอดคล้องกับการศึกษาลักษณะการอบแห้งด้วยวิธีลมร้อนและไมโครเวฟสำหรับผลกีวี่ [62] และทับทิม [63] เมื่อเพิ่มความเร็วรอบของถังหมุนเป็น 8 รอบต่อนาที (ดังแสดงในภาพประกอบ 15(ข)) พบว่า ค่าคงที่อัตราการอบแห้งมีค่าสูงสุดประมาณ 0.006 ภายใต้สภาวะการอบแห้งโดยใช้ลมร้อน อุณหภูมิเท่ากับ 90 องศาเซลเซียส ร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟที่กำลังวัตต์เท่ากับ 450 วัตต์ ในขณะที่ค่าต่ำสุดมีค่าประมาณ 0.002 ที่สภาวะอุณหภูมิหมุนเท่ากับ 90 องศาเซลเซียส และกำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 150 วัตต์ เมื่อพิจารณาลักษณะของกราฟเส้นรูปร่างดังแสดงในภาพประกอบ 15(ข) แล้ว จะสังเกตได้ว่าปัจจัยกำลังวัตต์ไมโครเวฟมีอิทธิพลเชิงบวกต่อค่าคงที่อัตราการอบแห้งเช่นเดียวกับที่ความเร็วรอบ 4 รอบต่อนาที ในขณะที่อิทธิพลของอุณหภูมิหมุนกลับมีความแตกต่างเล็กน้อย โดยมีแนวโน้มเชิงลบแบบเชิงเส้นกับค่าคงที่อัตราการอบแห้งที่ระดับกำลังวัตต์ไมโครเวฟต่ำลง ลักษณะของอิทธิพลเชิงลบของอุณหภูมิหมุนดังกล่าวนี้สังเกตได้ชัดเจนมากขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วรอบของจานหมุนเท่ากับ 12 รอบต่อนาที (ดังแสดงในภาพประกอบ 15(ค)) โดยที่ทุกระดับของกำลังวัตต์ไมโครเวฟที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ ค่าคงที่อัตราการอบแห้งมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิหมุน งานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่มักตรงกันข้ามกับผลอิทธิพลในเชิงลบของอุณหภูมิหมุนที่มีต่อค่าคงที่อัตราการอบแห้งนี้ [10], [63]–[67] จากภาพประกอบ 15(ค) ค่าคงที่อัตราการอบแห้งมีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.0065 ที่อุณหภูมิหมุนเท่ากับ 70 องศาเซลเซียส และกำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 450 วัตต์ ในขณะที่ค่าต่ำสุดซึ่งมีค่าประมาณ 0.0018 ได้จากการอบแห้งที่อุณหภูมิหมุนเท่ากับ 90 องศาเซลเซียส ร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟที่ระดับ 150 วัตต์

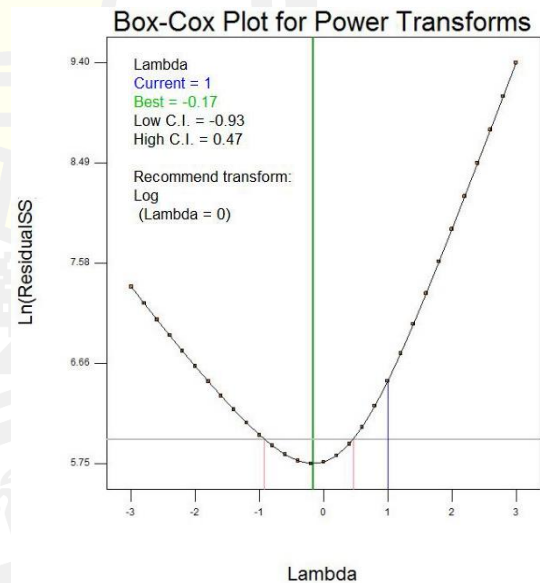
เมื่อพิจารณาผลตอบสนองเวลาการอบแห้ง (DT) จากตาราง 39 พบว่าค่า F value ของแบบจำลองมีค่าเท่ากับ 57.55 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองดังกล่าวมีนัยสำคัญ โดยที่มีโอกาสเพียง 0.01% เท่านั้นที่ค่า Model F-Value ที่มีค่ามากเกิดขึ้นจากสิ่งรบกวน (Noise) ค่าของ “Prob > F” มีค่าน้อยกว่า 0.0001 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่าเทอมของแบบจำลองมีนัยสำคัญ ซึ่งจากตาราง 39 เทอมของพารามิเตอร์เชิงเดี่ยว (Monomial parameter) ของอุณหภูมิหมุน (X_1) กำลังวัตต์ไมโครเวฟ (X_2) และเทอมปฏิสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิหมุนและกำลังวัตต์ไมโครเวฟ (X_1X_2) มีนัยสำคัญที่ $p < 0.001$ ในขณะที่พารามิเตอร์เชิงเดี่ยวของความเร็วรอบของจานหมุน (X_3) และเทอมของปฏิสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิหมุนและความเร็วรอบของจานหมุน (X_1X_3) และระหว่างปัจจัยกำลังวัตต์ไมโครเวฟและความเร็วรอบ (X_2X_3) ไม่มีนัยสำคัญ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาเทอมกำลังสอง (Quadratic term) มีเพียงเทอมกำลังสองของกำลังวัตต์ไมโครเวฟ (X_2^2) เท่านั้นที่มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น $p < 0.001$ จากตาราง 39 ค่า Pred R-Squared มีค่าเท่ากับ 0.8979 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่า Adj R-Squared (0.9514) ค่า Adeq Precision ใช้สำหรับวัดอัตราส่วนของสัญญาณต่อสิ่งรบกวน (Signal to noise ratio) ซึ่งปกติอัตราส่วนที่ต้องการมีค่ามากกว่า 4 จากตาราง 39 จะเห็นได้ว่าค่า Adeq Precision มีค่าเท่ากับ 23.521 ซึ่งแสดงสัญญาณที่เพียงพอ (Adequate signal)

ดังนั้น แบบจำลองนี้จึงสามารถที่จะนำมาใช้เพื่อนำทางไปยังสิ่งที่ต้องการออกแบบได้ เมื่อพิจารณาค่า F value จากตาราง 39 พบว่าค่า F value ของปัจจัยของกำลังวัตต์ไมโครเวฟมีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 415.42 รองลงมา คือ อุณหภูมิความร้อนเท่ากับ 37.71 และความเร็วรอบของจานหมุนมีค่าต่ำที่สุดเท่ากับ 0.091 แสดงให้เห็นว่าปัจจัยของกำลังวัตต์ไมโครเวฟส่งผลต่อเวลาการอบแห้งมากที่สุด รองลงมา คือ อุณหภูมิความร้อน และความเร็วรอบของจานหมุน ตามลำดับ

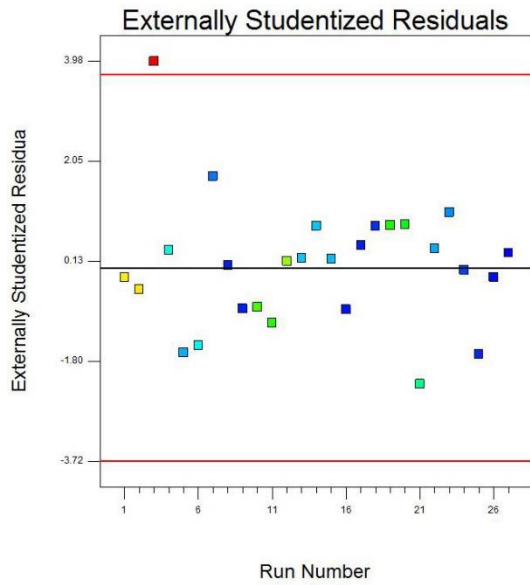
ภาพประกอบ 16(ก) แสดงตำแหน่งของเศษเหลือบนเส้นตรงซึ่งเป็นสิ่งยืนยันถึงการกระจายแบบปกติที่ดีของเศษเหลือ อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาพล็อตของ Box-Cox ในภาพประกอบ 16(ข) พบว่าค่าปัจจุบันของแลมดา (Lambda, λ) มีค่าเท่ากับ 1 ในขณะที่ค่าที่ดีที่สุดมีค่าเท่ากับ -0.17 ซึ่งมีค่าแตกต่างกันมาก อีกทั้งค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดในช่วงความเชื่อมั่น 95% (CI 95%) มีค่าอยู่ในช่วง -0.93 ถึง 0.47 ในกรณีเช่นนี้ ค่าแลมดาที่ดีที่สุดควรเลือกที่ค่าแลมดาเท่ากับ 0 ดังนั้น ควรใช้การแปลงฟังก์ชันแบบลอการิทึม (Logarithm transformation) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลตอบสนอง (Log DT) จากภาพประกอบ 16(ค) ค่าเศษเหลืออยู่ในช่วง (เส้นสีแดง) และกระจายอย่างสม่ำเสมอตามเส้นคงที่เท่ากับ 0 ยกเว้นการทดลองที่ 3 ที่อยู่นอกช่วง ส่วนกราฟระหว่างเศษเหลือและค่าจากการทำนาย ดังแสดงในภาพประกอบ 16(ง) นั้น พบว่าค่าเศษเหลือกระจายอย่างสม่ำเสมอตามเส้นคงที่เท่ากับ 0 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสิ่งที่ทำให้เกิดรูปแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear pattern) หรือความแปรปรวนที่ไม่เท่ากัน (Unequal variance) ไม่น่าจะเป็นไปได้และการประมาณแบบจำลองนั้นดีโดยไม่มีข้อผิดพลาดหลัก



(ก)

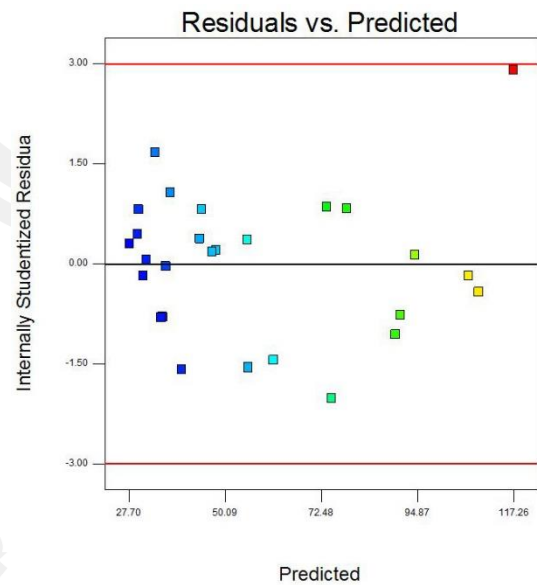


(ข)



Run Number

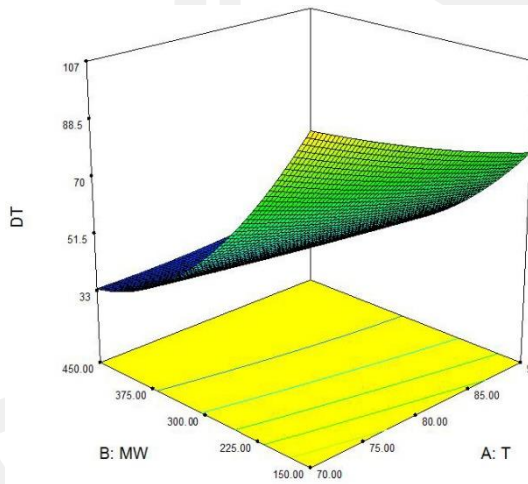
(ค)



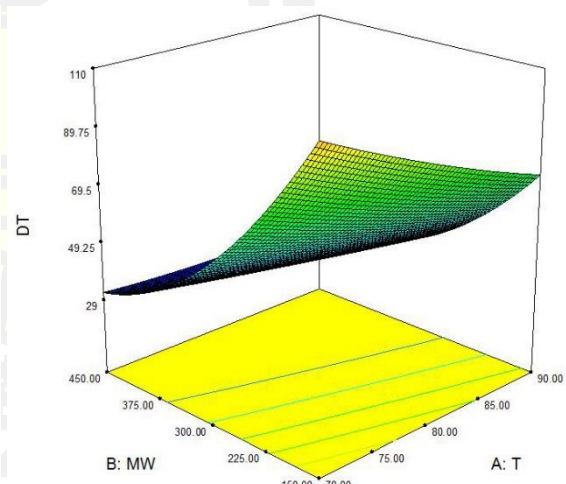
Predicted

(ง)

ภาพประกอบ 16 พล็อตของ (ก) Normal probability vs. Studentized residuals (ข) Box-Cox for power transformation (ค) Residual against run number และ (ง) Residuals against predicted drying time

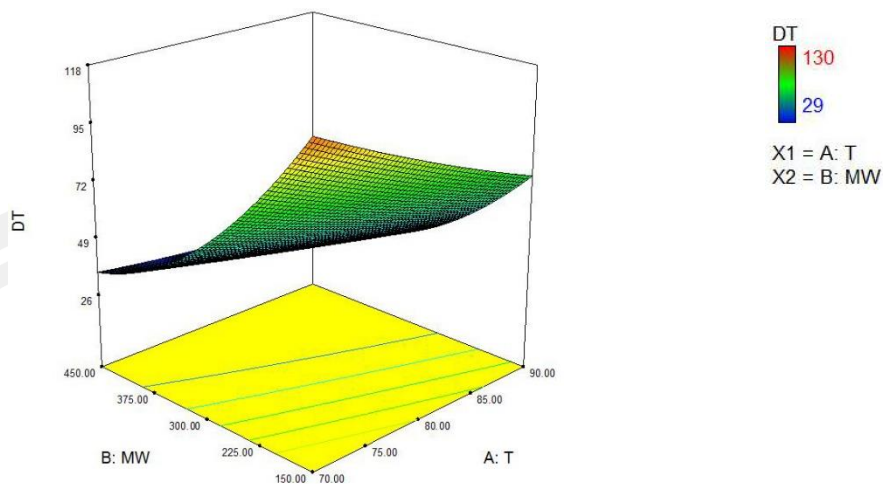


(ก)



(ข)

พหุคูณ บณุ ทิโต ชีว



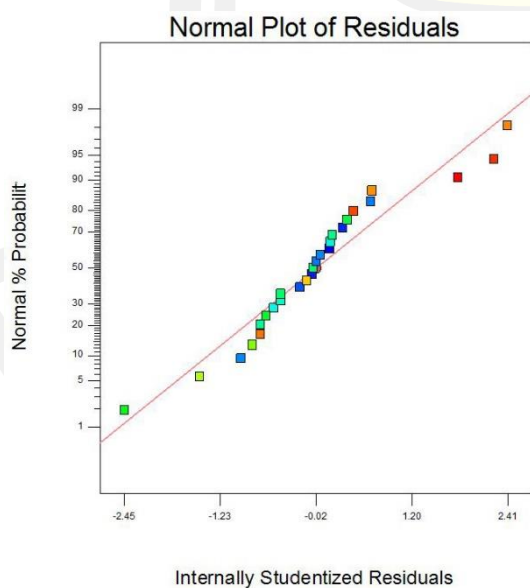
(ค)

ภาพประกอบ 17 ผลของอุณหภูมิและกำลังวัตต์ไมโครเวฟต่อเวลาการอบแห้งที่ความเร็วรอบของจานหมุนเท่ากับ (ก) 4 รอบต่อนาที (ข) 8 รอบต่อนาที และ (ค) 12 รอบต่อนาที

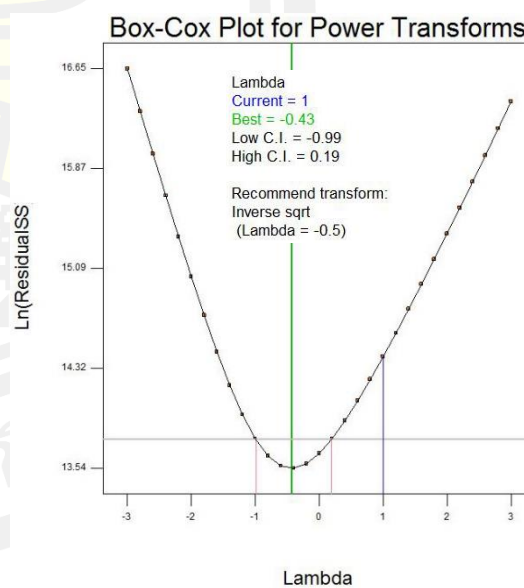
ภาพประกอบ 17 แสดงกราฟเส้นโค้งรูปร่างของเวลาการอบแห้ง (DT) ที่ทำนายจากสมการการอบแห้งของ Page โดยภาพประกอบ 17(ก) แสดงกราฟเส้นโค้งรูปร่างของเวลาการอบแห้งที่เป็นฟังก์ชันของปัจจัยอุณหภูมิลมร้อน (T) และปัจจัยกำลังวัตต์ไมโครเวฟ (MW) ที่ความเร็วรอบของจานหมุนเท่ากับ 4 รอบต่อนาที ส่วนภาพประกอบ 17(ข) และ 17(ค) แสดงผลการทดลองที่ความเร็วรอบเท่ากับ 8 และ 12 รอบต่อนาที ตามลำดับ จากภาพประกอบ 17 จะสังเกตเห็นว่าลักษณะของเส้นโค้งรูปร่าง 3 มิติที่ความเร็วรอบทั้งสามระดับมีลักษณะแนวโน้มไปในทางเดียวกัน โดยกำลังวัตต์ไมโครเวฟส่งผลในเชิงลบอย่างชัดเจนต่อเวลาการอบแห้ง ซึ่งสังเกตได้จากความชันของเส้นกราฟที่มีความชันค่อนข้างสูง ลักษณะของแนวโน้มเช่นนี้สอดคล้องกับค่าคงที่อัตราการอบแห้งซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปัจจัยทั้งสองเพิ่มขึ้น ในขณะที่อุณหภูมิของลมร้อนส่งผลเพียงเล็กน้อยหรือแทบจะไม่มีผลที่ระดับกำลังวัตต์ไมโครเวฟสูง ๆ เมื่อพิจารณาผลของความเร็วรอบที่มีต่อเวลาการอบแห้ง พบว่า ที่ความเร็วรอบ 4 รอบต่อนาที (ภาพประกอบ 17(ก)) เวลาการอบแห้งต่ำสุดมีค่าประมาณ 33 นาที ที่กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 450 วัตต์ ในขณะที่ใช้เวลานานที่สุดประมาณ 107 นาที โดยใช้ลมร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ร่วมกับการให้ความร้อนเสริมด้วยไมโครเวฟเท่ากับ 150 วัตต์ ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 8 รอบต่อนาที (ภาพประกอบ 17(ข)) และ 12 รอบต่อนาที (ภาพประกอบ 17(ค)) มีลักษณะเส้นโค้งรูปร่างคล้ายกันโดยค่าต่ำสุดได้จากสภาวะการอบแห้งที่ใช้ไมโครเวฟ 450 วัตต์ ในทุก ๆ ระดับของอุณหภูมิลมร้อน และใช้เวลานานที่สุดเมื่อใช้ลมร้อนอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ร่วมกับการใช้ไมโครเวฟ 150 วัตต์ ตามลำดับ เมื่อพิจารณาอิทธิพลของความเร็วรอบของจานหมุน พบว่า ที่

ความเร็วรอบ 4 รอบต่อนาที ใช้เวลาในการอบแห้งเฉลี่ยน้อยที่สุดซึ่งสอดคล้องกับค่าคงที่อัตราการอบแห้งที่สูงสุดที่สังเกตได้จากความเร็วรอบเดียวกันนี้

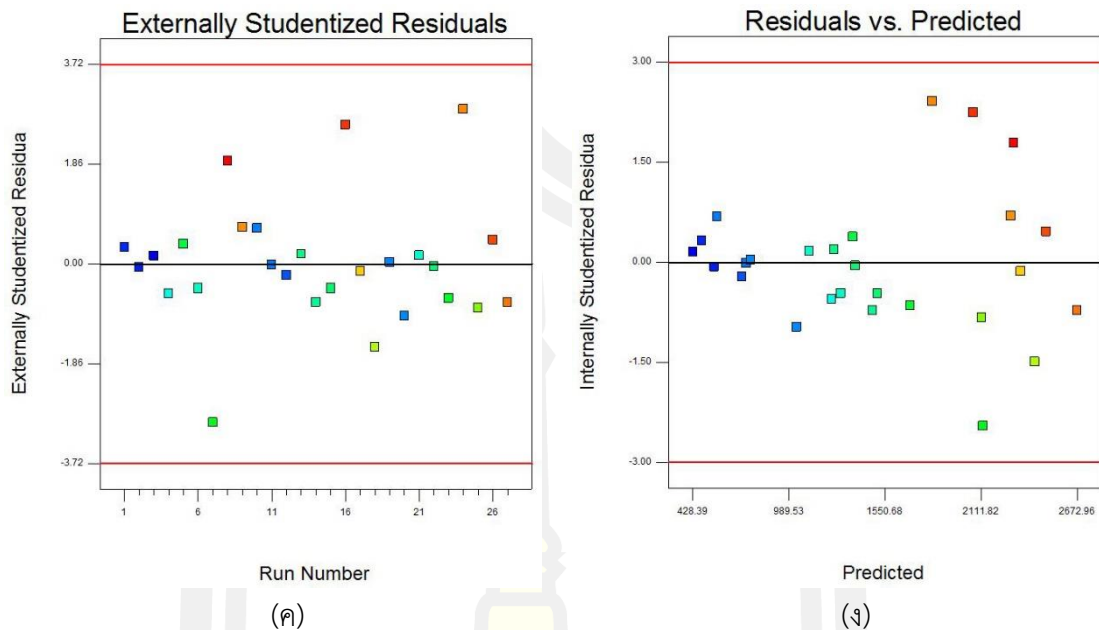
ค่า P value ของแบบจำลองกำลังสองของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (D_e) มีค่าน้อยกว่า 0.0001 (ดังแสดงในตาราง 39) ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.05 และค่า F value มีค่าเท่ากับ 13.27 (มีค่ามากกว่า 4) แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองดังกล่าวนี้มีนัยสำคัญ โดยมีโอกาสเพียงร้อยละ 0.01 เท่านั้นที่ค่า Model F-Value ที่มีค่ามากเกิดขึ้นจากสิ่งรบกวน (Noise) จากตาราง 39 เทอมของพารามิเตอร์เชิงเดียวของทุกปัจจัยยกเว้นปัจจัยความเร็วรอบของจานหมุนมีนัยสำคัญ โดยปัจจัยอุณหภูมิลมร้อนและกำลังวัตต์ไมโครเวฟมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น $p < 0.05$ และ $p < 0.001$ ตามลำดับ ในขณะที่ปัจจัยความเร็วรอบไม่มีนัยสำคัญที่ระดับ $p < 0.05$ อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาเทอมของปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยของแบบจำลองและเทอมกำลังสองของปัจจัย จะเห็นได้ว่าทุกเทอมไม่มีนัยสำคัญ ค่า Pred R-Squared มีค่าเท่ากับ 0.6634 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่า Adj R-Squared (0.8094) ส่วนค่า Adeq Precision มีค่าเท่ากับ 11.32 ซึ่งแสดงสัญญาณที่เพียงพอ (Adequate signal) ดังนั้น แบบจำลองนี้จึงสามารถที่จะนำมาใช้เพื่อนำทางไปยังสิ่งที่ต้องการออกแบบได้ เมื่อพิจารณาค่า F value จากตาราง 39 จะเห็นได้ว่าค่า F value ของปัจจัยของกำลังวัตต์ไมโครเวฟมีค่าสูงสุดเท่ากับ 109 รองลงมา คือ อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 4.78 และความเร็วรอบของจานหมุนมีค่าต่ำที่สุดเท่ากับ 2.69 แสดงให้เห็นว่าปัจจัยของกำลังวัตต์ไมโครเวฟส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลมากที่สุด รองลงมา คือ อุณหภูมิลมร้อน และความเร็วรอบของจานหมุน ตามลำดับ



(ก)



(ข)

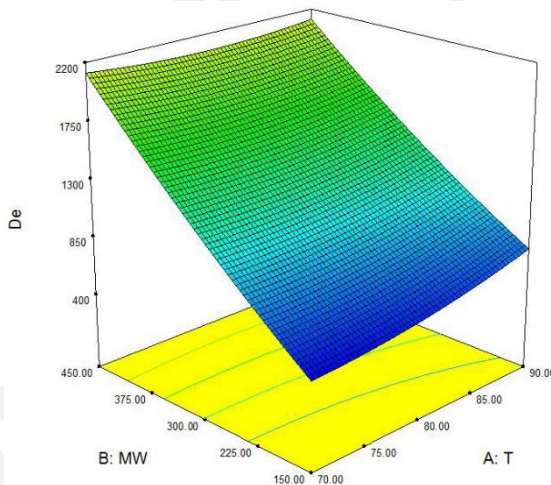


ภาพประกอบ 18 พล็อตของ (ก) Normal probability vs. Studentized residuals (ข) Box-Cox for power transformation (ค) Residual against run number และ (ง) Residuals against predicted effective diffusivity coefficient

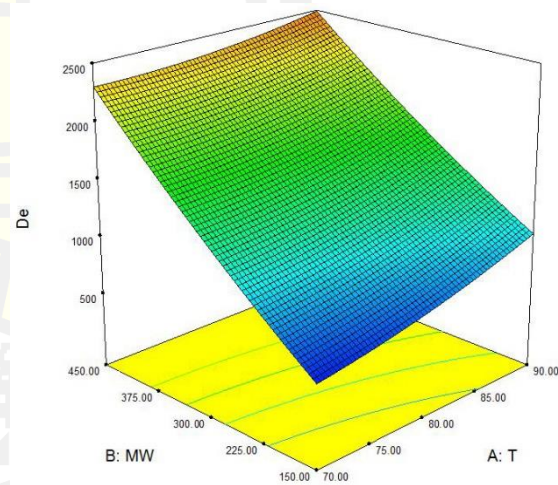
สรุปพล็อตการวินิจฉัย (Diagnostics plots) และสถิติของแบบจำลองสำหรับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (D_e) แสดงในภาพประกอบ 18 จากภาพประกอบ 18(ก) พบว่า ค่าเศษเหลือมีค่าอยู่บนตำแหน่งของเส้นทแยงมุมแสดงถึงการแจกแจงแบบปกติ อย่างไรก็ตาม จากค่าแลมดาปัจจุบัน (1) ดังแสดงในกราฟ Box-Cox (ภาพประกอบ 18(ข)) ซึ่งไม่อยู่ในช่วงของค่าต่ำสุดและสูงสุด -0.99 ถึง 0.19 แสดงให้เห็นว่าควรมีการแปลงฟังก์ชันเป็นฟังก์ชันส่วนกลับกำลังสอง (Inverse squared transform) ที่ระดับค่าแลมดาเท่ากับ -0.5 ภาพประกอบ 18(ค) และ 18(ง) แสดงการพล็อตระหว่างเศษเหลือกับหมายเลขการทดลองและระหว่างเศษเหลือกับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลที่ทำนายจากแบบจำลอง ตามลำดับ จากภาพประกอบดังกล่าวพบว่าค่าเศษเหลือกระจายรอบเส้นค่าคงที่เท่ากับ 0 แสดงให้เห็นว่าพล็อตเศษเหลือดังกล่าวนี้ดีซึ่งเป็นที่ยืนยันได้ว่าแบบจำลองเข้ากันได้ดีกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

ภาพประกอบ 19 แสดงเส้นโค้งแสดงรูปร่างสามมิติของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (D_e) ที่เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิความร้อน (T) และกำลังวัตต์ไมโครเวฟ (MW) ที่ระดับความเร็วรอบของจานหมุน 4 รอบต่อนาที (ภาพประกอบ 19(ก)) 8 รอบต่อนาที (ภาพประกอบ 19(ข)) และ 12 รอบต่อนาที (ภาพประกอบ 19(ค))

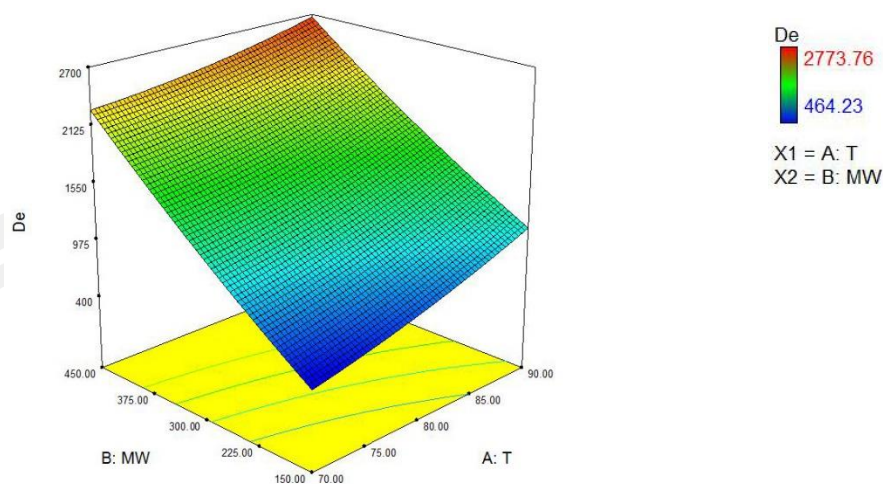
ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (D_e) คือพารามิเตอร์แสดงกลไกการอบแห้งของวัสดุ ในช่วงการอบแห้งแบบอัตราการลดลง (Falling-rate period) [68] ซึ่งค่าสูงสุดแสดงถึงน้ำหรือความชื้น ภายในวัสดุสามารถแพร่จากข้างในสู่ผิวภายนอกของวัสดุได้เร็ว ส่งผลให้อัตราการอบแห้งสูงและเวลา ในการอบแห้งสั้น จากภาพประกอบ 19 พบว่า ที่ทุกระดับของความเร็วรอบมีลักษณะของเส้นโค้ง แสดงรูปร่างคล้ายกัน คือ ทั้งปัจจัยอุณหภูมิลมร้อนและกำลังวัตต์ไมโครเวฟมีอิทธิพลเชิงบวกแบบเชิง เส้นต่อค่า D_e เมื่อพิจารณาที่ความเร็วรอบเท่ากับ 4 รอบต่อนาที (ดังแสดงในภาพประกอบ 19(ก)) พบว่า ค่า D_e มีค่าสูงสุดประมาณ $2200 \times 10^{-8} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ ที่กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 450 วัตต์ ในทุก ๆ ระดับอุณหภูมิของลมร้อน ในขณะที่ค่าต่ำสุดซึ่งมีค่าประมาณ $400 \times 10^{-8} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ ได้จากการอบแห้ง ภายใต้สภาวะอุณหภูมิลมร้อนและกำลังวัตต์ไมโครเวฟต่ำสุด เมื่อเพิ่มความเร็วรอบส่งผลให้ค่า D_e มี แนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยที่ความเร็วรอบเท่ากับ 8 รอบต่อนาที ค่า D_e อยู่ในช่วง $500 \times 10^{-8} - 2500 \times 10^{-8} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ และที่ความเร็วรอบเท่ากับ 12 รอบต่อนาที ค่า D_e อยู่ในช่วง $400 \times 10^{-8} - 2700 \times 10^{-8} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ โดยค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดได้จากสภาวะอุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 70 องศาเซลเซียส ร่วมกับไมโครเวฟ 150 วัตต์ และสภาวะอุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 90 องศาเซลเซียส ร่วมกับไมโครเวฟ 450 วัตต์ ตามลำดับ



(ก)



(ข)



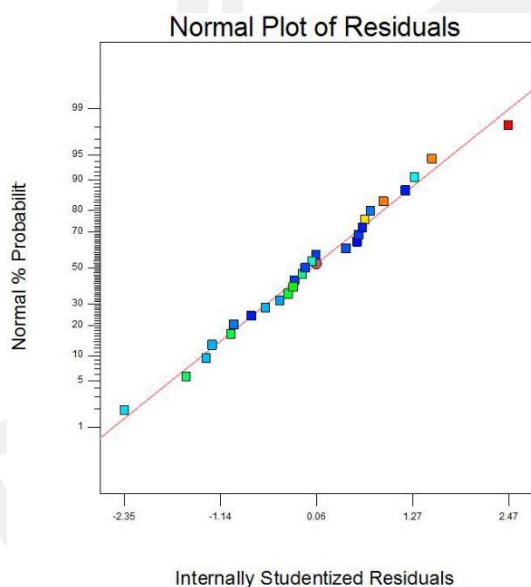
(ค)

ภาพประกอบ 19 ผลของอุณหภูมิและกำลังวัตต์ไมโครเวฟต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลที่ความเร็วรอบของจานหมุนเท่ากับ (ก) 4 รอบต่อนาที (ข) 8 รอบต่อนาที และ (ค) 12 รอบต่อนาที

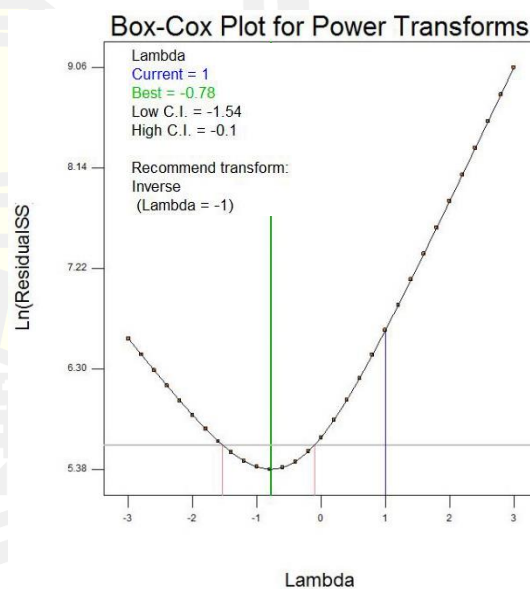
ในการพิจารณาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกระบวนการอบแห้งนั้น นอกจากใช้ค่าคงที่อัตราการอบแห้ง เวลาการอบแห้ง และสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลแล้ว งานวิจัยนี้ยังได้ใช้ค่าการใช้พลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) เพื่อวิเคราะห์หาเทคนิคและสถานะการอบแห้งที่เหมาะสม จากตาราง 39 จะเห็นได้ว่า แบบจำลองฟังก์ชันพหุนามอันดับสองของค่าการใช้พลังงานจำเพาะมีนัยสำคัญ โดยพิจารณาจาก ค่า P value ของแบบจำลองซึ่งมีค่าเท่ากับ <0.0001 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.05 และค่า F value มีค่าเท่ากับ 12.16 (มีค่ามากกว่า 4) แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองดังกล่าวมีนัยสำคัญ โดยมีโอกาสเพียงร้อยละ 0.01 เท่านั้นที่ค่า Model F-Value ที่มีค่ามากเกิดขึ้นจากสิ่งรบกวน (Noise) เมื่อพิจารณาเทอมของพารามิเตอร์เชิงเดี่ยวของทุกปัจจัยดังแสดงในตาราง 39 พบว่า มีเพียงปัจจัยของอุณหภูมิลมร้อนเท่านั้นที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.001$) เช่นเดียวกับผลตอบสนองทั้งสามที่ได้อธิบายไปแล้ว เมื่อพิจารณาเทอมของปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยของแบบจำลอง จะเห็นได้ว่ามีเพียงเทอมปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยอุณหภูมิลมร้อนและความเร็วรอบของจานหมุน ($X_1 X_3$) ที่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ $p < 0.005$ นอกจากนี้ จากตาราง 39 พบว่า ค่า Pred R-Squared มีค่าเท่ากับ 0.5973 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่า Adj R-Squared (0.7944) ส่วนค่า Adeq Precision มีค่าเท่ากับ 10.96 ซึ่งแสดงสัญญาณที่เพียงพอ (Adequate signal) ดังนั้นแบบจำลองนี้จึงสามารถที่จะนำมาใช้เพื่อนำทางไปยังสิ่งที่ต้องการออกแบบได้ เมื่อพิจารณาค่า F value จากตาราง 39 จะเห็นได้ว่าค่า F value ของปัจจัยของกำลังวัตต์ไมโครเวฟมีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 73.44 รองลงมา คือ ความเร็วรอบเท่ากับ 1.21 ส่วนค่า F value ของปัจจัยอุณหภูมิลมร้อนนั้นมีค่าต่ำที่สุดซึ่งค่าเพียง 4.39×10^{-6} แสดงให้เห็นว่าปัจจัยของกำลังวัตต์ไมโครเวฟส่งผลต่อค่าการใช้

พลังงานจำเพาะมากที่สุด รองลงมา คือ ความเร็วรอบของจานหมุนหมุน ส่วนอุณหภูมิลมร้อนนั้นแทบจะไม่มีอิทธิพลต่อค่า SEC ตามลำดับ ค่า F value ของปัจจัยของกำลังวัตต์ไมโครเวฟที่มีผลต่อการใช้พลังงานจำเพาะมากกว่าอุณหภูมิลมร้อนสอดคล้องกับงานวิจัยของ [69]

ภาพประกอบ 20 แสดงกราฟการวินิจฉัยทางสถิติเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของค่าการใช้พลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) ภาพประกอบ 20(ก) แสดงความน่าจะเป็นแบบปกติของเศษเหลือ จากภาพประกอบดังกล่าวจะเห็นได้จากค่าเศษเหลือกระจายตามเส้นทแยงมุม ซึ่งเป็นลักษณะที่ดีของการกระจายเศษเหลือแบบแจกแจงปกติ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาค่าแลมดาในกราฟ Box-Cox ดังแสดงในภาพประกอบ 20(ข) กลับพบว่า ค่าแลมดาปัจจุบันอยู่นอกช่วงค่าต่ำสุดและสูงสุดระหว่าง -1.54 และ -0.1 แสดงให้เห็นว่าควรมีการแปลงฟังก์ชันเป็นฟังก์ชันส่วนกลับ (Inverse, Lambda=-1) เมื่อพิจารณาภาพประกอบ 20(ค) และภาพประกอบ 20(ง) แสดงค่าเศษเหลือที่มีการกระจายแบบสุ่มรอบเส้นคงที่เท่ากับ 0 ภายในช่วงทั้งหมด ดังนั้น สิ่งที่จะทำให้เกิดรูปแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear pattern) หรือความแปรปรวนที่ไม่เท่ากัน (Unequal variance) ไม่น่าจะเป็นไปได้และการประมาณแบบจำลองนั้นดีโดยไม่มีข้อผิดพลาดหลัก

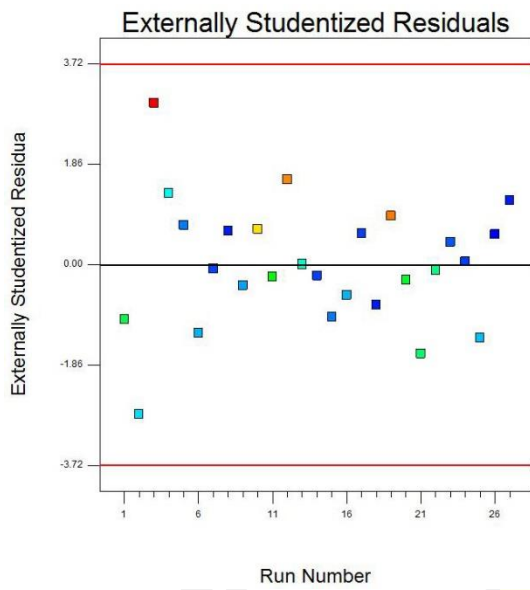


(ก)

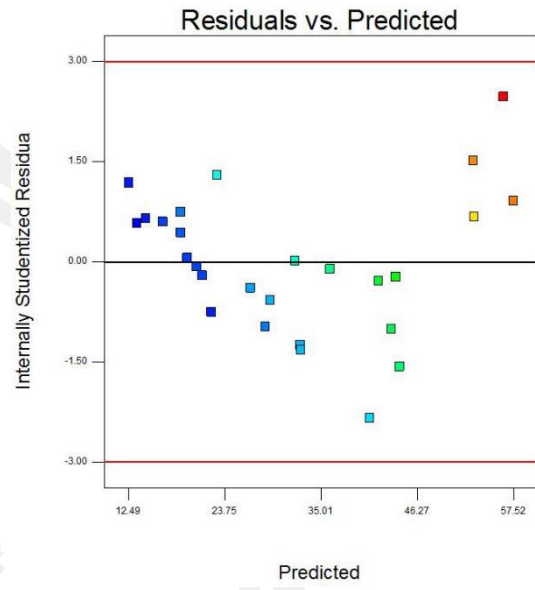


(ข)

(ข)

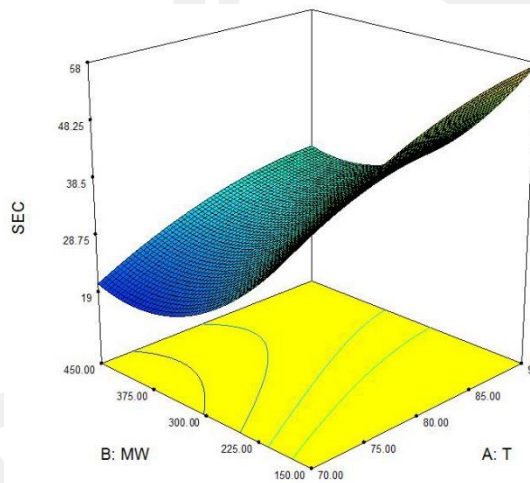


Run Number
(ค)

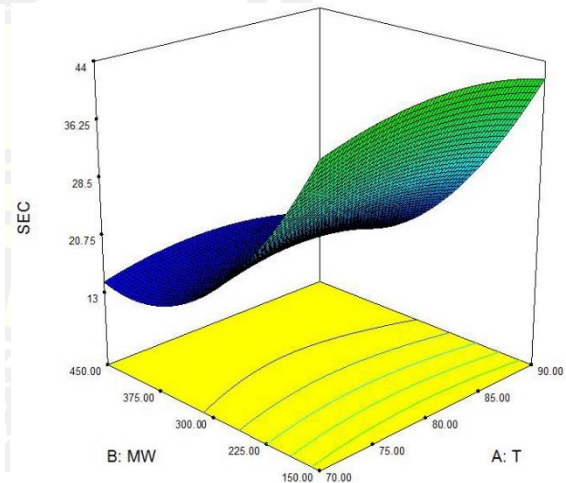


Predicted
(ง)

ภาพประกอบ 20 พล็อตของ (ก) Normal probability vs. Studentized residuals (ข) Box-Cox for power transformation (ค) Residual against run number และ (ง) Residuals against predicted specific energy consumption

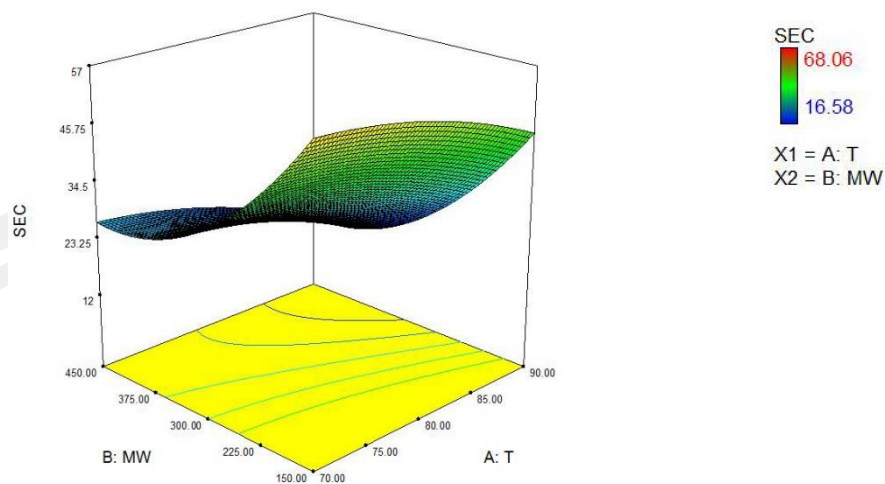


(ก)



(ข)

พหุคูณ บณุ ทิโต ชิง



(ค)

ภาพประกอบ 21 ผลของอุณหภูมิและกำลังวัตต์ไมโครเวฟต่อค่าการใช้พลังงานจำเพาะที่ความเร็วรอบของจานหมุนเท่ากับ (ก) 4 รอบต่อนาที (ข) 8 รอบต่อนาที และ (ค) 12 รอบต่อนาที

นอกจากอัตราการใช้พลังงานจำเพาะที่สูงซึ่งส่งผลให้เวลาในการอบแห้งสั้นแล้ว การออกแบบกระบวนการอบแห้งใหม่ ๆ จำเป็นต้องคำนึงถึงค่าการใช้พลังงานด้วยเช่นกัน ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาผลของสภาวะการอบแห้งต่อค่าการใช้พลังงานจำเพาะ (SEC) ดังแสดงในภาพประกอบ 21 ซึ่งเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิลมร้อน (T) และกำลังวัตต์ไมโครเวฟ (MW) ที่ระดับความเร็วรอบ 4 รอบต่อนาที (ภาพประกอบ 21(ก)) 8 รอบต่อนาที (ภาพประกอบ 21(ข)) และ 12 รอบต่อนาที (ภาพประกอบ 21(ค))

จากภาพประกอบ 21(ก) พบว่า ปัจจัยกำลังวัตต์ไมโครเวฟมีอิทธิพลเชิงลบต่อค่า SEC อย่างเห็นได้ชัด โดยมีเส้นโค้งแสดงรูปร่างมีลักษณะเป็นเส้นโค้งพาราโบลาที่ทุกระดับของอุณหภูมิลมร้อน ที่สภาวะการอบแห้งที่ใช้กำลังวัตต์ไมโครเวฟสูงจะให้อัตราการใช้พลังงานจำเพาะที่สูงและใช้เวลาการอบแห้งสั้น ในขณะที่ปัจจัยอุณหภูมิลมร้อนส่งผลต่อค่า SEC เพียงเล็กน้อย โดยสังเกตได้จากความชันของเส้นโค้งที่ต่ำกว่า ซึ่งค่า SEC มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จากผลการทดลองในภาพประกอบ 21(ก) ค่า SEC มีค่าต่ำสุดประมาณ 20 MJ/kg ที่สภาวะอุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 70 องศาเซลเซียส ร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ 450 วัตต์ และมีค่าสูงสุดประมาณ 58 MJ/kg ที่สภาวะอุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 90 องศาเซลเซียส และกำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 150 วัตต์ เมื่อเพิ่มความเร็วรอบเป็น 8 รอบต่อนาทีและ 12 รอบต่อนาที ค่าเฉลี่ยของ SEC มีค่าอยู่ในช่วง 14 - 44 MJ/kg และ 24-57 MJ/kg ตามลำดับ ดังนั้น จึงสามารถสรุปได้ว่า เมื่อพิจารณาค่าการใช้พลังงานจำเพาะจากภาพประกอบ 4.11 สภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากค่าการใช้พลังงานจำเพาะ คือ

การใช้ลมร้อนอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ร่วมกับการให้ความร้อนเสริมด้วยไมโครเวฟที่ 450 วัตต์ และใช้ความเร็วรอบของจานหมุนที่ 8 รอบต่อนาที อย่างไรก็ตาม การหาสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมนั้นจำเป็นต้องพิจารณาทุกปัจจัยที่ศึกษาซึ่งได้จะได้นำเสนอในหัวข้อต่อไป

จากตาราง 39 และกราฟสรุปการวินิจฉัยทางสถิติ (ภาพประกอบ 14 16 18 และ 20) สามารถสรุปได้ว่าเมื่อพิจารณาค่าพารามิเตอร์ทางสถิติทั้งหมดแล้ว แบบจำลองพหุนามกำลังสองสามารถนำไปใช้ในการออกแบบและวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งต่อไปได้ ถึงแม้ว่าจะมีบางเทอมในแบบจำลองที่ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ อย่างไรก็ตาม การเพิ่มคุณภาพของแบบจำลองก็สามารถทำได้เช่นเดียวกัน โดยการลดจำนวนเทอมหรือตัดพารามิเตอร์ที่ไม่มีนัยสำคัญออกจากแบบจำลอง

4.2.2 สภาวะการอบแห้งที่เหมาะสม

จากการวิเคราะห์ผลตอบสนองในหัวข้อที่ 4.2.1 พบว่า ปัจจัยที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ซึ่งประกอบด้วย อุณหภูมิลมร้อน กำลังวัตต์ไมโครเวฟ และความเร็วรอบของจานหมุน ต่างมีอิทธิพลต่อผลตอบสนองในทิศทางที่แตกต่างกัน การพิจารณาสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมนั้นจำเป็นต้องคำนึงถึงปัจจัยทั้งสามพร้อม ๆ กัน ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงได้กำหนดเกณฑ์เพื่อใช้ในการหาสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสม ดังนี้

1. ปัจจัยอุณหภูมิลมร้อนต้องอยู่ในช่วงที่ศึกษา คือ 70 – 90 องศาเซลเซียส
2. ปัจจัยกำลังวัตต์ไมโครเวฟต้องอยู่ในช่วงที่ศึกษา คือ 150 – 450 วัตต์
3. ปัจจัยความเร็วรอบของจานหมุนต้องอยู่ในช่วงที่ศึกษา คือ 4 – 12 รอบต่อนาที
4. ผลตอบสนองค่าคงที่อัตราการอบแห้ง (k) มีค่าสูงสุด
5. ผลตอบสนองค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (D_e) มีค่าสูงสุด
6. ผลตอบสนองเวลาการอบแห้ง (DT) มีค่าต่ำสุด
7. ผลตอบสนองค่าการใช้พลังงานจำเพาะ (SEC) มีค่าต่ำสุด

จากเกณฑ์ในการพิจารณาสภาวะการอบแห้งที่ดังกล่าวนี้ทำให้ได้ค่าในการออกแบบการทดลอง (Desirability) ที่แตกต่างกัน ซึ่งค่า Desirability มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 โดยที่ค่า 1 แสดงถึงค่าการออกแบบที่ดีที่สุดหรือค่าการออกแบบในอุดมคติ จากการทดลองและวิเคราะห์ค่า Desirability ในงานวิจัย พบว่า ค่าสูงสุดมีค่าเท่ากับ 0.837 ดังแสดงในตาราง 40 ซึ่งสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมและสอดคล้องกับค่า Desirability สูงสุดนี้ประกอบด้วย อุณหภูมิลมร้อน (T) เท่ากับ 90 องศาเซลเซียส กำลังวัตต์ไมโครเวฟ (MW) เท่ากับ 450 วัตต์ และความเร็วรอบของจานหมุนเท่ากับ 6.98 รอบต่อนาที อย่างไรก็ตาม เพื่อให้สะดวกในเชิงปฏิบัติความเร็วรอบของจานหมุนที่เหมาะสมจะใช้ที่ 7 รอบต่อนาที เนื่องจากการใช้กำลังวัตต์ไมโครเวฟที่สูงจะส่งผลให้บริเวณผิวหน้าหรือส่วนขอบของผลิตภัณฑ์เกิดความร้อนที่รวดเร็วมากจนเกิดการไหม้ และทำลายกลิ่นรสของผลิตภัณฑ์สุดท้ายได้

ดังนั้นจึงได้ศึกษาการอบแห้งด้วยลมร้อนและการให้กำลังวัตต์ไมโครเวฟแบบขั้นตอนสำหรับการศึกษาในหัวข้อต่อไป

ตาราง 40 สภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมและค่าผลตอบสนอง

Factors				Responses			Desirability
T	MW	RPM	k	DT	D _e	SEC	
90	450	6.98	0.006456	32.67	2415.00	16.58	0.837
90	450	6.88	0.006509	32.86	2406.58	16.96	0.836
90	448.86	6.89	0.006505	32.78	2400.72	16.90	0.836
90	447.24	6.96	0.006466	32.54	2397.86	16.58	0.836
89.92	446.98	6.97	0.006461	32.48	2395.52	16.58	0.835
90	450	6.45	0.006749	33.74	2369.17	18.72	0.835
90	444.70	6.94	0.006474	32.43	2382.22	16.58	0.834
89.60	446.80	7.00	0.006437	32.29	2391.51	16.58	0.834
90	450	6.24	0.006873	34.18	2350.24	19.64	0.833
90	441.20	6.92	0.006482	32.28	2360.93	16.58	0.833

4.3 ผลการศึกษาการอบแห้งถั่วแดงหุงสุกแบบขั้นตอน

จากตาราง 40 สภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากค่า Desirability สูงสุด (0.837) คือ การอบแห้งโดยใช้ลมร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟที่ระดับ 450 วัตต์ และความเร็วนวนของจานหมุนเท่ากับ 6.98 รอบต่อนาที หรือประมาณ 7 รอบต่อนาที เพื่อสะดวกในการกำหนดค่าความเร็วในทางปฏิบัติ ในหัวข้อนี้ได้ออกแบบการอบแห้งแบบขั้นตอนโดยแบ่งช่วงการอบแห้งเป็น 2 ช่วง โดยเวลาช่วงที่ 1 ความชื้นเริ่มต้น ประมาณ 60% ฐานเปียก และความชื้นสุดท้ายของช่วงแรกใช้ 70% ของความชื้นเริ่มต้น ส่วนเวลาช่วงที่ 2 ใช้ความชื้นสุดท้ายของช่วงที่ 1 เป็นความชื้นเริ่มต้นของช่วงที่ 2 และความชื้นสุดท้ายของช่วงที่สองคือ 10% ฐานเปียก โดยเวลาการอบแห้งแต่ละช่วงประมาณจากสมการการอบแห้งของ Page (สมการ 16) ดังแสดงในตาราง 41

ตาราง 41 การประมาณเวลาในการอบที่อุณหภูมิอากาศ 90 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบของจานหมุนเท่ากับ 7 รอบต่อนาทีและกำลังวัตต์ไมโครเวฟที่แตกต่างกัน

No.	ช่วงที่ 1		ช่วงที่ 2	
	MW	Time	MW	Time
1	450	1195	-	-
2	150	1288	300	1663
3	150	1288	450	1054
4	300	671	450	1054
5	450	447	150	3281
6	450	447	300	1663
7	300	671	150	3281

หมายเหตุ: MW คือ กำลังวัตต์ของไมโครเวฟ (วัตต์), Time คือ เวลาในการอบ (วินาที)

ตาราง 42 แสดงอัตราการระเหยของน้ำ (W_{evap}) การใช้พลังงาน อัตราการระเหยของน้ำต่อหนึ่งหน่วยพลังงานที่ใช้ไป (SMER) และค่าการใช้พลังงานจำเพาะต่อหนึ่งหน่วยน้ำที่ระเหยไป (SEC) ที่สภาวะการอบแห้งที่แตกต่างกัน

ตาราง 42 ค่าการใช้พลังงานที่สภาวะการอบแห้งที่แตกต่างกัน

Stepwise Mode		W_{evap}	การใช้พลังงาน		SMER	SEC
ช่วงที่1	ช่วงที่2		(kWh)	(MJ)		
450	-	0.316 ± 0.012^a	0.87 ± 0.00^d	3.13 ± 0.00^d	0.363 ± 0.013^a	9.91 ± 0.36^s
150	300	0.127 ± 0.001^e	1.02 ± 0.01^a	3.67 ± 0.05^a	0.124 ± 0.002^e	28.92 ± 0.58^c
150	450	0.159 ± 0.002^d	0.97 ± 0.00^{bc}	3.49 ± 0.00^{bc}	0.163 ± 0.002^d	22.01 ± 0.22^d
300	450	0.216 ± 0.004^b	0.96 ± 0.00^c	3.46 ± 0.00^c	0.225 ± 0.004^b	15.98 ± 0.30^f
450	150	0.101 ± 0.001^f	1.01 ± 0.04^a	3.64 ± 0.15^a	0.100 ± 0.006^f	36.15 ± 2.01^b
450	300	0.183 ± 0.001^c	0.99 ± 0.01^{ab}	3.56 ± 0.05^{abc}	0.184 ± 0.002^c	19.53 ± 0.22^e
300	150	0.095 ± 0.001^f	1.00 ± 0.00^a	3.60 ± 0.00^{ab}	0.095 ± 0.001^f	37.74 ± 0.49^a

หมายเหตุ: Stepwise Mode คือ โหมดแบบขั้นตอน (วัตต์), W_{evap} คือ ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากข้าวหอมมะลิแดง (กรัม), SMER คือ อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (กรัมต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง), SEC คือ ค่าการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)

อัตราการระเหยของน้ำต่อหนึ่งหน่วยเวลา (W_{evap}) แสดงถึงสมรรถนะของระบบการอบแห้งที่สามารถดึงเอาความชื้นออกได้มากน้อยเพียงใดในช่วงเวลาหนึ่งๆ จากตาราง 42 จะเห็นได้ว่าที่สภาวะการอบแห้งแตกต่างกัน น้ำในวัสดุตัวอย่างถูกระเหยออกด้วยอัตราที่แตกต่างกันซึ่งอยู่ในช่วง $0.095 \pm 0.001 - 0.316 \pm 0.012$ kg/h โดยที่สภาวะการอบแห้งโดยใช้กำลังวัตต์ไมโครเวฟคงที่ที่ 450 วัตต์ มีอัตราการระเหยของน้ำต่อชั่วโมงมากที่สุด ในขณะที่สภาวะการอบแห้งที่มีการลดกำลังวัตต์ของไมโครเวฟ (step-down) จาก 450 วัตต์ ลดลงเป็น 150 วัตต์ และจาก 300 วัตต์ ลดลงเป็น 150 วัตต์ มีค่า W_{evap} ต่ำที่สุด จากผลการทดลองดังกล่าวนี้สามารถอธิบายได้โดยกำลังวัตต์ที่สูง (450 วัตต์) ทำให้เกิดพลังงานความร้อนเนื่องจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้มากกว่า ในขณะที่ที่สภาวะการอบแห้งแบบ step-down นั้น กำลังวัตต์ที่ 450 วัตต์ และ 300 วัตต์ใช้เพียงแค่ช่วงแรกของการอบแห้งเท่านั้น หลังจากนั้นระบบการอบแห้งจะลดกำลังวัตต์ลงเท่ากับ 150 วัตต์จนสิ้นสุดกระบวนการซึ่งใช้เวลาในการอบแห้งหลักเท่ากับ 88% และ 83% ตามลำดับ กลไกการอบแห้งเมื่อใช้คลื่นไมโครเวฟที่มีกำลังไฟฟ้ามกขึ้นนี้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ [10], [42], [56], [60]

การอบแห้งเป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานค่อนข้างสูง ซึ่งกระบวนการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ มีการใช้พลังงานหลักจากแหล่งให้ความร้อนกับลมร้อน การให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟและระบบการจ่ายลม จากตาราง 42 จะเห็นได้ว่าที่สภาวะการอบแห้งแตกต่างกันมีการใช้พลังงานรวมที่แตกต่างกัน โดยค่าการใช้พลังงานรวมมีค่าอยู่ในช่วง $0.87 \pm 0.00 - 1.02 \pm 0.01$ kWh หรือ $3.13 \pm 0.00 - 3.67 \pm 0.05$ MJ ที่สภาวะการอบแห้งแบบใช้กำลังวัตต์ไมโครเวฟคงที่เท่ากับ 450 วัตต์ มีการใช้พลังงานต่ำที่สุดเนื่องจากใช้เวลาในการอบแห้งน้อยที่สุดเพียง 1195 วินาที หรือประมาณ 20 นาที เท่านั้น

ค่า SMER และ ค่า SEC เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ทั่วไปสำหรับประเมินสมรรถนะการใช้พลังงานของระบบอบแห้ง โดยค่า SMER สูง และค่า SEC ต่ำ บ่งบอกถึงประสิทธิภาพการใช้พลังงานที่ดีของกระบวนการอบแห้ง จากตาราง 42 จะเห็นได้ว่าค่า SMER อยู่ในช่วง $0.095 \pm 0.001 - 0.363 \pm 0.013$ กิโลกรัมน้ำต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง และค่า SEC อยู่ในช่วง $9.91 \pm 0.36 - 37.74 \pm 0.49$ เมกะจูลต่อกิโลกรัม น้ำ เมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพในการใช้พลังงานในระหว่างการอบแห้ง จากตาราง 42 สามารถสรุปได้ว่าสภาวะการอบแห้งโดยใช้กำลังวัตต์ไมโครเวฟคงที่เท่ากับ 450 วัตต์ เป็นสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมที่สุด ข้อสรุปดังกล่าวนี้สามารถอธิบายได้จากสภาวะการอบแห้งที่มีการใช้กำลังวัตต์ไมโครเวฟสูง ส่งผลให้เกิดความร้อนภายในวัสดุขึ้นมากและทำให้อัตราการอบแห้งสูงเช่นเดียวกันในช่วงเวลาการอบแห้งที่สั้น [10], [42], [55]

จากตาราง 42 ถึงแม้ว่าสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมที่สุดในการเตรียมถั่วแดงหุงสุกเร็วเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในการใช้พลังงานเป็นเกณฑ์ แต่ปัจจัยที่จำเป็นต้องพิจารณาเช่นกันคือคุณภาพทั้งทางกายภาพและคุณภาพการคั้นรูป ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวนี้เป็นคุณสมบัติที่สำคัญมากต่อการยอมรับของผู้บริโภค ดังนั้น การพิจารณาว่าสภาวะการอบแห้งใดมีความเหมาะสมที่สุดจำเป็นต้องนำคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ประกอบการประเมินด้วย

ตาราง 43 และ 44 แสดงคุณภาพของถั่วแดงหลังการอบแห้งที่สภาวะการอบแห้งแตกต่างกัน และคุณภาพการคั้นรูปและเนื้อสัมผัสหลังการคั้นรูปของถั่วแดงหุงสุกเร็วที่ผ่านการอบแห้งที่สภาวะแตกต่างกัน ตามลำดับ จากตารางดังกล่าวจะเห็นได้ว่าสภาวะการอบแห้งที่แตกต่างกันส่งผลให้คุณภาพของถั่วแดงแห้งและคุณสมบัติการคั้นรูปแตกต่างกัน

สภาวะการอบแห้งที่ศึกษาแสดงในตาราง 41 เป็นสภาวะที่ต้องการลดความชื้นจากความชื้นเริ่มต้นประมาณ 60% เหลือความชื้นสุดท้ายประมาณ 10% ดังนั้น จากตาราง 43 จะเห็นได้ว่าค่าความชื้นสุดท้ายของตัวอย่างทั้งหมดมีค่าอยู่ในช่วง 10.24 ± 0.01 - $11.92 \pm 0.87\%$ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าความชื้นที่ได้ทำนายไว้และใกล้เคียงกับวัตถุดิบถั่วแดง ($11.68 \pm 0.07\%$) ส่วนค่าความชื้นของถั่วแดงหุงสุกที่ผ่านการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งนั้นมีค่าเท่ากับ $3.53 \pm 0.11\%$ ซึ่งความชื้นของวัสดุแห้งทั่วไปที่ผ่านการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งปลอดภัยในการเก็บรักษา [70]–[72] นอกจากนี้ ตาราง 43 ยังแสดงค่าปริมาณน้ำอิสระ (a_w) ของตัวอย่างที่ผ่านการอบแห้งแตกต่างกัน พบว่าค่าปริมาณน้ำอิสระอยู่ในช่วง 0.4149 ± 0.001 - 0.5541 ± 0.007 ซึ่งมีค่าอยู่ในระดับที่ปลอดภัยต่อการเก็บรักษา (< 0.6) ส่วนค่าปริมาณน้ำอิสระของวัตถุดิบถั่วแดงและถั่วแดงหุงสุกที่ผ่านการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีค่าเท่ากับ 0.3940 ± 0.003 และ 0.2419 ± 0.006 ตามลำดับ

คุณภาพทางกายภาพของวัสดุอบแห้งถือได้ว่าเป็นคุณสมบัติที่เป็นปัจจัยสำคัญในการยอมรับของผู้บริโภค ตาราง 43 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การแตกหัก (%Break) ค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัว (%Shrinkage) ค่าสีและค่าความแตกต่างของสี

เมื่อพิจารณา %Break จากตาราง 43 พบว่าถั่วแดงหุงสุกหลังผ่านการอบแห้งที่สภาวะแตกต่างกันเกิดการแตกหักของเมล็ดปริมาณมากน้อยแตกต่างกัน โดยมีค่าอยู่ในช่วง 32.63 ± 3.22 - $45.74 \pm 3.57\%$ ซึ่งสภาวะการอบแห้งที่ใช้กำลังวัตต์ไมโครเวฟคงที่เท่ากับ 450 วัตต์ มีค่าสูงสุดในขณะที่สภาวะการอบแห้งที่ใช้กำลังวัตต์ไมโครเวฟแบบขั้นตอน (stepwise) มีเปอร์เซ็นต์การแตกหักของเมล็ดถั่วแดงหุงสุกไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ผลการทดลองดังกล่าวนี้สามารถอธิบายได้จากการใช้กำลังวัตต์ไมโครเวฟที่ 450 วัตต์ ในช่วงแรกของการอบแห้งทำให้ความชื้นหรือปริมาณน้ำภายในวัสดุลดลงอย่างรวดเร็ว ในช่วงสุดท้ายของการอบแห้งความชื้นของตัวอย่างมีค่าต่ำ ในขณะที่ยังใช้กำลังวัตต์ไมโครเวฟสูงเท่าเดิม ดังนั้นอาจทำให้เกิดกลไกการพองตัว (puffing)

จนกระทั่งเกิดการแตกของเมล็ดถั่วแดง [73] ส่วนเปอร์เซ็นต์การแตกหักของเมล็ดถั่วแดงหุงสุกที่ผ่านอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีค่าเพียง $15.48 \pm 3.08\%$

การหดตัวของวัสดุอาหารในระหว่างการทำแห้งเป็นปรากฏการณ์ทางกายภาพทั่วไป ซึ่งส่งผลต่อคุณภาพเนื้อสัมผัสและรสชาติของผลิตภัณฑ์อบแห้ง ซึ่งหนึ่งในหลายปัจจัยที่ส่งผลต่อการหดตัวของวัสดุอาหารคือสภาวะของกระบวนการอบแห้ง [74] จากตาราง 43 พบว่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวที่สภาวะการอบแห้งแบบขั้นตอนจาก 150 วัตต์ เพิ่มเป็น 300 วัตต์ และจาก 450 วัตต์ ลดลงเป็น 300 วัตต์ มีค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวสูงสุดเท่ากับ $43.79 \pm 2.86\%$ และ $44.17 \pm 3.04\%$ ตามลำดับ ในขณะที่สภาวะการอบแห้งแบบขั้นตอนที่ลดกำลังวัตต์ไมโครเวฟจาก 450 วัตต์ เป็น 150 วัตต์ มีค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวต่ำสุดเท่ากับ $22.80 \pm 2.17\%$ ซึ่งมีค่าสูงกว่าการหดตัวของตัวอย่างที่ผ่านการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง ($16.78 \pm 0.48\%$) เล็กน้อย

ผู้บริโภคส่วนใหญ่นิยมเลือกผลิตภัณฑ์แปรรูปที่ยังคงสีตามธรรมชาติ โดยไม่คล้ำหรือซีดเกินไป งานวิจัยนี้จึงได้ใช้ค่าการเปลี่ยนแปลงสี (ΔE) เป็นหนึ่งในพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับประเมินประสิทธิภาพการอบแห้ง จากตาราง 43 จะเห็นได้ว่าสภาวะการอบแห้งที่แตกต่างกันส่งผลให้ค่าความสว่าง (L^*) ค่าความเป็นสีแดง (a^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) มีค่าแตกต่างกันซึ่งส่งผลให้ค่าการเปลี่ยนแปลงสีมีค่าแตกต่างกันเช่นเดียวกัน ค่าสี L^* a^* และ b^* ของตัวอย่างถั่วแดงที่ผ่านการอบแห้งถูกนำมาเปรียบเทียบกับสีธรรมชาติของวัตถุดิบถั่วแดง จากตาราง 43 พบว่าค่าการเปลี่ยนแปลงสีมีค่าอยู่ในช่วง $1.35 \pm 0.07 - 7.76 \pm 0.56$ โดยที่สภาวะการอบแห้งแบบใช้กำลังวัตต์ไมโครเวฟแบบ step-down จาก 300 วัตต์ เป็น 150 วัตต์ ให้ค่าการเปลี่ยนแปลงสีน้อยที่สุด ส่วนที่สภาวะการอบแห้งอื่นๆ นั้นให้ค่าการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างสูง โดยมีค่าสูงกว่า 3.0 ซึ่งแสดงถึงสีมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับสีธรรมชาติจากวัตถุดิบถั่วแดง [75] ค่า ΔE มีค่าสูงสุดโดยใช้กำลังวัตต์ไมโครเวฟคงที่เท่ากับ 450 วัตต์ และใช้กำลังวัตต์แบบ step-up จาก 150 วัตต์ เพิ่มเป็น 450 วัตต์ การเปลี่ยนแปลงที่มีค่าค่อนข้างสูงนี้สามารถอธิบายได้จากการใช้กำลังวัตต์คงที่ตลอดระยะเวลาการอบแห้ง หรือการใช้กำลังวัตต์สูงในช่วงการอบแห้งสุดท้ายทำให้น้ำหนักวัสดุลดลงเนื่องจากการระเหยของน้ำ ในขณะที่กำลังวัตต์ที่ใช้ยังคงที่ ทำให้ความหนาแน่นของกำลังวัตต์มีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดความร้อนที่มากเกินไปในวัสดุซึ่งอาจทำให้เกิดการไหม้และทำให้สีเกิดการเปลี่ยนแปลงในที่สุด [76]

จากตาราง 43 สามารถสรุปได้ว่าถึงแม้การอบแห้งโดยใช้กำลังวัตต์ไมโครเวฟคงที่เท่ากับ 450 วัตต์ มีความเหมาะสมในแง่ของประสิทธิภาพการใช้พลังงาน แต่เมื่อพิจารณาถึงคุณภาพทางกายภาพแล้วกลับมีคุณภาพที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเปรียบเทียบกับวัตถุดิบหรือตัวอย่างที่ผ่านการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งซึ่งถือว่าเป็นวิธีการอบแห้งที่ดีที่สุด

ตาราง 43 คุณภาพของถั่วแดงหลังการอบแห้งที่สภาวะการอบแห้งแตกต่างกัน

Stepwise Mode		MC	a _w	%Break	%Shrinkage	Color			ΔE
ช่วงที่ 1	ช่วงที่ 2					L*	a*	b*	
450	-	10.74±0.93	0.4167±0.002	45.74±3.57 ^a	32.76±2.38 ^d	69.48±0.78 ^a	1.44±0.07 ^d	10.33±0.05 ^d	7.76±0.56 ^a
150	300	10.24±0.01	0.4149±0.001	33.17±0.94 ^b	43.79±2.86 ^a	65.75±1.68 ^d	1.46±0.13 ^d	9.27±0.25 ^s	5.08±0.85 ^b
150	450	11.78±0.07	0.5233±0.004	37.04±1.71 ^b	37.92±1.82 ^{bc}	69.45±0.22 ^a	1.69±0.02 ^c	10.30±0.03 ^d	7.67±0.30 ^a
300	450	11.92±0.87	0.5476±0.008	35.57±2.63 ^b	36.49±1.16 ^c	68.23±0.79 ^{ab}	1.46±0.05 ^d	9.91±0.12 ^e	6.73±0.48 ^b
450	150	11.55±0.48	0.4752±0.003	33.80±1.08 ^b	22.80±2.17 ^e	66.84±0.31 ^{cd}	1.54±0.01 ^d	9.54±0.05 ^f	5.64±0.16 ^{cd}
450	300	10.90±0.44	0.4524±0.002	35.31±1.85 ^b	44.17±3.04 ^a	67.55±0.70 ^{bc}	1.73±0.08 ^c	9.93±0.06 ^e	6.03±0.07 ^c
300	150	11.53±0.47	0.5541±0.007	32.63±3.22 ^b	41.06±0.42 ^{ab}	62.13±0.37 ^e	2.42±0.01 ^b	11.43±0.08 ^c	1.35±0.07 ^e
Raw		11.68±0.07	0.3940±0.003	-	-	62.24±0.26 ^e	3.60±0.06 ^a	12.08±0.03 ^b	-
Freeze-dried		3.53±0.11	0.2419±0.006	15.48±3.08 ^c	16.78±0.48 ^f	62.26±0.20 ^e	3.62±0.00 ^a	13.08±0.01 ^a	1.00±0.02 ^e

ตาราง 44 คุณภาพการคืนรูปและเนื้อสัมผัสหลังการคืนรูปของข้าวแดงหุงสุกเร็วที่ผ่านการอบแห้งที่สภาวะแตกต่างกัน

Stepwise Mode		Rehydration time		Rehydration	Textural properties				
ช่วงที่ 1	ช่วงที่ 2	(min)	ratio		Hardness (g)	Adhesiveness (g.sec)	Springiness	Cohesiveness	Chewiness
450	-	6.00±0.00 ^a	1.08±0.06 ^c	43449±2469 ^c	-30.13±12.33 ^b	0.58±0.02 ^{bc}	0.52±0.03 ^b	13579±1949 ^c	
150	300	5.67±0.58 ^{ab}	1.34±0.02 ^b	49240±1044 ^{ab}	-7.84±1.23 ^c	0.77±0.07 ^a	0.58±0.01 ^a	20530±163 ^{ab}	
150	450	5.33±0.58 ^{abc}	1.36±0.17 ^{ab}	49333±2139 ^{ab}	-8.13±2.10 ^c	0.83±0.04 ^a	0.57±0.02 ^a	23498±1774 ^{ab}	
300	450	4.67±0.58 ^{cde}	1.34±0.02 ^b	49342±2866 ^{ab}	-4.71±1.41 ^c	0.83±0.11 ^a	0.59±0.02 ^a	24328±2182 ^{ab}	
450	150	5.00±0.00 ^{bcd}	1.41±0.01 ^{ab}	50256±1705 ^a	-8.06±3.29 ^c	0.70±0.12 ^{ab}	0.59±0.03 ^a	24022±3174 ^{ab}	
450	300	4.33±0.58 ^{de}	1.46±0.07 ^{ab}	46257±1447 ^{bc}	-4.82±2.42 ^c	0.73±0.03 ^a	0.58±0.01 ^a	20303±1306 ^b	
300	150	5.00±0.00 ^{bcd}	1.35±0.09 ^{ab}	50134±2546 ^a	-9.23±2.18 ^c	0.73±0.06 ^a	0.60±0.03 ^a	24710±3567 ^a	
Conventionally cooked		-	-	51770±1643 ^a	-17.64±9.65 ^{bc}	0.83±0.10 ^a	0.5±0.02 ^b	21023±2856 ^{ab}	
Freeze-dried		4.00±0.00 ^e	1.49±0.01 ^a	35244±821 ^d	-194.25±15.65 ^a	0.56±0.05 ^c	0.52±0.01 ^b	10260±619 ^c	

คุณภาพการคិនรูปและเนื้อสัมผัสหลังการคិនรูปถือเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของผลิตภัณฑ์อาหารหุงสุกเร็วหรือหุงสุกเร็ว ตาราง 44 แสดงเวลาการคិនรูป (RT) อัตราส่วนการคិនรูป (RR) และเนื้อสัมผัสหลังการคិនรูปของตัวอย่างที่ผ่านการอบแห้งแตกต่างกัน

จากตาราง 44 พบว่าเวลาการคិនรูปของตัวอย่างที่ผ่านการอบแห้งที่แตกต่างกัน มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก โดยใช้เวลาคិនรูปสูงสุด (6 นาที) เมื่อผ่านการอบแห้งโดยใช้กำลังวัตต์คงที่เท่ากับ 450 วัตต์ ส่วนตัวอย่างที่ผ่านการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งนั้นใช้เวลาเพียง 4 นาที ซึ่งสามารถอธิบายได้จากความเป็นรูพรุนของวัสดุที่ผ่านการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง สามารถดูดน้ำได้เร็วในระหว่างการคិនรูป เมื่อพิจารณาอัตราการคិនรูปจากตาราง 44 จะเห็นได้ว่าค่า RR สอดคล้องกับเวลาคិនรูป โดยที่สภาวะการอบแห้งแบบกำลังวัตต์คงที่มีอัตราการคិនรูปต่ำที่สุด (1.08 ± 0.06) ซึ่งสามารถอธิบายได้จากความสามารถในการดูดซับน้ำที่ต่ำกว่าเช่นเดียวกัน [77]

สำหรับเนื้อสัมผัสของถั่วแดงหลังการคិនรูป งานวิจัยนี้ได้เปรียบเทียบกับถั่วแดงที่ทำการหุงสุกด้วยวิธีดั้งเดิมรวมถึงถั่วแดงหุงสุกที่ผ่านการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง จากตาราง 44 พบว่าค่าเนื้อสัมผัสของถั่วแดงที่ผ่านการอบแห้งด้วยวิธีที่นำเสนอมีค่าแตกต่างกันเมื่อสภาวะการอบแห้งแตกต่างกัน ดังนี้ ค่า Hardness มีค่าอยู่ในช่วง 43449 ± 2469 - 50256 ± 1705 g ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับถั่วแดงที่หุงสุกด้วยวิธีดั้งเดิม (51770 ± 1643 g) ในขณะที่ตัวอย่างที่ผ่านการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีค่าค่อนข้างต่ำกว่า (35244 ± 821 g) ส่วนค่า Adhesiveness มีค่าอยู่ในช่วง 4.71 ± 1.41 - 30.13 ± 12.33 ค่า Springiness อยู่ในช่วง 0.58 ± 0.02 - 0.83 ± 0.11 ค่า Cohesiveness อยู่ในช่วง 0.52 ± 0.03 - 0.60 ± 0.03 และค่า Chewiness อยู่ในช่วง 13579 ± 1949 - 24710 ± 3567 จากตาราง 44 สามารถสรุปได้ว่าสภาวะการอบแห้งทุกสภาวะยกเว้นสภาวะการอบแห้งที่ใช้กำลังวัตต์สูงสุดคงที่เท่ากับ 450 วัตต์ ตลอดระยะเวลาการอบแห้ง ส่งผลให้เนื้อสัมผัสหลังการคិនรูปมีค่าใกล้เคียงกับเนื้อสัมผัสของถั่วแดงที่หุงด้วยวิธีดั้งเดิม

4.4 การวิเคราะห์การประเมินสังเคราะห์ (Synthetic evaluation analysis)

หัวข้อนี้เป็นการประเมินสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้ดัชนีการประเมินสังเคราะห์ (Synthetic evaluation index, S) โดยเกณฑ์ที่ใช้ในการพิจารณาจากการยอมรับของผู้บริโภคเป็นหลัก (Consumer's acceptability aspect) ซึ่งใช้สมการการประเมิน [78] ดังนี้

$$S = \sum_{i=1}^n \lambda_i Y_i \quad (19)$$

โดยที่ λ คือ ค่าน้ำหนักของผลลัพธ์

Y_i คือ ผลลัพธ์สัมพัทธ์

n คือ จำนวนผลลัพธ์ทั้งหมดที่นำมาพิจารณา (n = 7)

สำหรับงานวิจัยนี้ได้เลือกผลลัพธ์ที่นำมาประเมินสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสม ประกอบด้วย

- 1) SEC
- 2) %Break
- 3) %Shrink
- 4) ΔE
- 5) Hardness
- 6) Rehydration time (RT)
- 7) Rehydration ratio (RR)

4.4.1 Consumer's acceptability aspect

สำหรับหัวข้อนี้ได้จัดอันดับความสำคัญของผลลัพธ์โดยพิจารณาค่าการยอมรับของผู้บริโภคเป็นอันดับแรก ซึ่งโดยปกติแล้วผู้บริโภคจะให้ความสำคัญกับลักษณะปรากฏก่อนแล้วตามด้วยลักษณะของเนื้อสัมผัส ดังนั้นสมการดัชนีการประเมินสังเคราะห์ (S) สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$S_c = \sum_{i=1}^7 \lambda_i Y_i \quad (21)$$

โดยที่

$$Y_1 = 1 - \frac{\%Break - \%Break_{min}}{\%Break_{max} - \%Break_{min}} \quad Y_2 = 1 - \frac{\Delta E - \Delta E_{min}}{\Delta E_{max} - \Delta E_{min}}$$

$$Y_3 = \frac{Hardness - Hardness_{min}}{Hardness_{max} - Hardness_{min}} \quad Y_4 = 1 - \frac{RT - RT_{min}}{RT_{max} - RT_{min}}$$

$$Y_5 = \frac{RR - RR_{min}}{RR_{max} - RR_{min}} \quad Y_6 = 1 - \frac{\%Shrink - \%Shrink_{min}}{\%Shrink_{max} - \%Shrink_{min}}$$

$$Y_7 = 1 - \frac{SEC - SEC_{min}}{SEC_{max} - SEC_{min}}$$

และ

λ_1 คือ ค่าน้ำหนักของ %Break ($\lambda_1 = 0.7$)

λ_2 คือ ค่าน้ำหนักของ ΔE ($\lambda_2 = 0.6$)

λ_3 คือ ค่าน้ำหนักของ Hardness ($\lambda_3 = 0.5$)

λ_4 คือ ค่าน้ำหนักของ RT ($\lambda_4 = 0.4$)

λ_5 คือ ค่าน้ำหนักของ RR ($\lambda_5 = 0.3$)

λ_6 คือ ค่าน้ำหนักของ %Shrink ($\lambda_6 = 0.2$)

λ_7 คือ ค่าน้ำหนักของ SEC ($\lambda_7 = 0.1$)

ตาราง 45 ผลลัพธ์ของการประเมินสังเคราะห์ (S) ของสภาวะการอบแห้งแตกต่างกัน

Stepwise Mode		S_c
ช่วงที่1	ช่วงที่2	
450	-	0.21 ± 0.00^e
150	300	1.64 ± 0.14^c
150	450	1.38 ± 0.13^d
300	450	1.74 ± 0.06^c
450	150	2.06 ± 0.18^b
450	300	1.68 ± 0.06^c
300	150	2.30 ± 0.20^a

ตาราง 45 แสดงผลลัพธ์ของการประเมินสังเคราะห์เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการใช้การยอมรับของผู้บริโภคเป็นเกณฑ์ (S_c) ของสภาวะการอบแห้งแตกต่างกัน จากตารางดังกล่าวพบว่าค่า S_c มีค่าอยู่ในช่วง $0.21 \pm 0.00 - 2.30 \pm 0.20$ โดยมีค่าสูงสุดที่สภาวะการอบแห้งแบบ step-down จาก 300 วัตต์ เป็น 150 วัตต์ ดังนั้น จากตาราง 45 สามารถสรุปได้ว่าสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมที่สุดโดยพิจารณาจากคุณภาพที่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคเป็นหลัก สภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมที่สุดคือ การอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 90°C ร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟแบบ step-down จาก 300 วัตต์เป็นเวลา 671 วินาที (ประมาณ 11 นาที) ตามด้วยการลดกำลังวัตต์เป็น 150 วัตต์จนถึงสิ้นสุดการอบแห้งหรือประมาณ 55 นาที

พหุบัณฑิต ชีวะ

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองจากบทที่ผ่านมา บทนี้จะกล่าวถึงข้อสรุปและข้อเสนอแนะของการทดลอง ซึ่งได้แก่การศึกษาจลนศาสตร์การอบแห้งถั่วแดงหุงสุกเร็วด้วยวิธีการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ การศึกษาสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสม การศึกษาการอบแห้งแบบขั้นตอน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

5.1 สรุปผล

5.1.1 สรุปผลการศึกษาจลนศาสตร์การอบแห้งถั่วแดงหุงสุกเร็วด้วยวิธีการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ

แบบจำลองหรือสมการการอบแห้งที่นำมาศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้ ใช้แบบจำลองเอมพิริคัลหรือสมการการอบแห้งแบบกึ่งทฤษฎีที่นำเสนอในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งต่าง ๆ จำนวน 12 สมการ นำสมการดังกล่าวนี้มาเปรียบเทียบกับอัตราส่วนความชื้น (MR) โดยมีปัจจัยการอบแห้ง 3 ปัจจัย ๆ ละ 3 ระดับ ได้แก่ อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 70 80 และ 90 องศาเซลเซียส กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 150 300 และ 450 วัตต์ และความเร็วยรอบของจานหมุนเท่ากับ 4 8 และ 12 รอบ ต่อนาที ออกแบบการทดลองแบบ Full factorial ดังนั้นจะได้จำนวนการทดลองทั้งหมด 27 การทดลอง พบว่า (Midilli et al.) เหมาะสมที่สุดสำหรับ Fit ข้อมูลที่ได้จากการอบแห้งในทุกสภาวะการอบแห้ง อย่างไรก็ตาม เนื่องจากสมการการอบแห้งของ Midilli et al. ประกอบด้วยพารามิเตอร์ 4 ตัว ซึ่งใช้สำหรับปรับเส้นโค้งให้เข้ากันได้กับข้อมูลจากการทดลอง ดังนั้น การนำไปใช้ในทางปฏิบัติเพื่อศึกษาพฤติกรรมและศึกษาออกแบบสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งของถั่วแดงหุงสุกเร็วในวิทยานิพนธ์นี้อาจเกิดความยุ่งยาก ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการศึกษาในหัวข้อต่อไป จึงได้นำแบบจำลองการอบแห้งของ Page ซึ่งมีค่า R^2 สูงกว่า 0.99 และมีค่า χ^2 ค่า RMSE ค่า %P และค่า MSE ต่ำในทุกสภาวะการอบแห้ง ไปใช้เพื่อศึกษาพฤติกรรมการอบแห้งของถั่วแดงหุงสุกเร็วที่เตรียมด้วยวิธีการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ

5.1.2 ผลการศึกษาสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสม

การศึกษาสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสม ค่า Desirability ในงานวิจัย พบว่า ค่าสูงสุดมีค่าเท่ากับ 0.837 ดังแสดงในตาราง 40 ซึ่งสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมและสอดคล้องกับค่า

Desirability สูงสุดนี้ประกอบด้วย อุณหภูมิลมร้อน (T) เท่ากับ 90 องศาเซลเซียส กำลังวัตต์ ไมโครเวฟ (MW) เท่ากับ 450 วัตต์ และความเร็วรอบของจานหมุนเท่ากับ 6.98 รอบต่อนาที แต่ในสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมดังกล่าวทำให้เกิดลักษณะ Puffing ของผลิตภัณฑ์

5.1.3 การศึกษาการอบแห้งแบบขั้นตอน

การศึกษากการอบแห้งแบบขั้นตอน สมรรถนะของระบบการอบแห้งที่สามารถดึงเอาความชื้นด้วยอัตราที่แตกต่างกันซึ่งอยู่ในช่วง 0.095 ± 0.001 - 0.316 ± 0.012 kg/h โดยที่สภาวะการอบแห้งโดยใช้กำลังวัตต์ไมโครเวฟคงที่ที่ 450 วัตต์ ทำให้เกิดพลังงานความร้อนเนื่องจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้มากกว่า ในขณะที่ที่สภาวะการอบแห้งแบบ step-down นั้น กำลังวัตต์ที่ 450 วัตต์ และ 300 วัตต์ใช้เพียงแค่ช่วงแรกของการอบแห้งเท่านั้น หลังจากนั้นระบบการอบแห้งจะลดกำลังวัตต์ลงเท่ากับ 150 วัตต์จนสิ้นสุดกระบวนการซึ่งใช้เวลาในการอบแห้งหลักเท่ากับ 88% และ 83% โดยค่าการใช้พลังงานรวมมีค่าอยู่ในช่วง 0.87 ± 0.00 - 1.02 ± 0.01 kWh หรือ 3.13 ± 0.00 - 3.67 ± 0.05 MJ ที่สภาวะการอบแห้งแบบใช้กำลังวัตต์ไมโครเวฟคงที่เท่ากับ 450 วัตต์ มีการใช้พลังงานต่ำที่สุดเนื่องจากใช้เวลาในการอบแห้งน้อยที่สุดเพียง 1195 วินาที หรือประมาณ 20 นาที ค่าปริมาณน้ำอิสระอยู่ในช่วง 0.4149 ± 0.001 - 0.5541 ± 0.007 ซึ่งมีค่าอยู่ในระดับที่ปลอดภัยต่อการเก็บรักษา (< 0.6) ส่วนค่าปริมาณน้ำอิสระของวัตถุดิบถั่วแดงและถั่วแดงหุงสุกที่ผ่านการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีค่าเท่ากับ 0.3940 ± 0.003 และ 0.2419 ± 0.006 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีมีค่าอยู่ในช่วง 1.35 ± 0.07 - 7.76 ± 0.56 โดยที่สภาวะการอบแห้งแบบใช้กำลังวัตต์ไมโครเวฟแบบ step-down จาก 300 วัตต์ เป็น 150 วัตต์ ให้ค่าการเปลี่ยนแปลงสีน้อยที่สุด

5.1.3 การวิเคราะห์การประเมินสังเคราะห์

การวิเคราะห์การประเมินสังเคราะห์ สภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมที่สุดโดยพิจารณาจากคุณภาพที่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคเป็นหลัก สภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมที่สุดคือ การอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 98°C ร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟแบบ step-down จาก 300 วัตต์เป็นเวลา 671 วินาที (ประมาณ 11 นาที) ตามด้วยการลดกำลังวัตต์เป็น 150 วัตต์จนสิ้นสุดการอบแห้งหรือประมาณ 55 นาที

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรมีการศึกษากการอบแห้งถั่วแดงหุงสุกเร็วด้วยวิธีการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟต่อการนำไปใช้ในระดับอุตสาหกรรมและมีความเป็นไปได้ในด้านธุรกิจให้มากขึ้น

5.2.2 การประเมินสถานะที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งถั่วแดงหุงสุกเร็วด้วยวิธีการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ จากคุณสมบัติต่างๆ ได้แก่ ประสิทธิภาพการใช้พลังงาน คุณภาพด้านสี ร้อยละการหดตัว คุณสมบัติการคืนรูป และคุณสมบัติเนื้อสัมผัส คุณสมบัติสารต้านอนุมูลอิสระเป็นหนึ่งในคุณสมบัติที่สำคัญจำเป็นต่อพิจารณาสถานะที่เหมาะสมด้วย

5.2.3 สำหรับการวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัสโดยใช้คุณภาพของถั่วแดงสุกเป็นเกณฑ์ ยังไม่สามารถใช้ประเมินคุณภาพของถั่วแดงได้ดีมากนัก จึงควรใช้การทดสอบทางประสาทสัมผัสควบคู่ไปด้วยก่อนผลิตเพื่อการจำหน่ายจริง



บรรณานุกรม



- [1] ศูนย์วิทยบริการเพื่อส่งเสริมการเกษตร, “ถั่วแดงหลวง,” *กรมส่งเสริมการเกษตร*, 2558. <https://esc.doae.go.th/wp-content/uploads/2015/02/redbean.pdf>
- [2] B. Carbas *et al.*, “Nutrients, Antinutrients, Phenolic Composition, and Antioxidant Activity of Common Bean Cultivars and their Potential for Food Applications,” *Antioxidants (Basel, Switzerland)*, vol. 9, no. 2, Feb. 2020, doi: 10.3390/antiox9020186.
- [3] J. Zhang, J. Shi, S. Ilic, S. Jun Xue, and Y. Kakuda, “Biological Properties and Characterization of Lectin from Red Kidney Bean (*Phaseolus Vulgaris*),” *Food Rev. Int.*, vol. 25, no. 1, pp. 12–27, Dec. 2008, doi: 10.1080/87559120802458115.
- [4] E. A. Shimelis and S. K. Rakshit, “Effect of Processing on Antinutrients and In vitro Protein Digestibility of Kidney Bean (*Phaseolus vulgaris* L.) Varieties Grown in East Africa,” *Food Chem.*, vol. 103, no. 1, pp. 161–172, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.08.005>.
- [5] L. Kan *et al.*, “Nutrients, Phytochemicals and Antioxidant Activities of 26 Kidney Bean Cultivars,” *Food Chem. Toxicol.*, vol. 108, pp. 467–477, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fct.2016.09.007>.
- [6] R. K. Gupta, A. Sharma, P. Kumar, R. K. Vishwakarma, and R. T. Patil, “Effect of Blanching on Thin Layer Drying Kinetics of Aonla (*Emblica officinalis*) Shreds,” *J. Food Sci. Technol.*, vol. 51, no. 7, pp. 1294–1301, 2014, doi: 10.1007/s13197-012-0634-y.
- [7] Á. Calín-Sánchez, A. Figiel, A. Wojdyło, M. Szarycz, and Á. A. Carbonell-Barrachina, “Drying of Garlic Slices Using Convective Pre-drying and Vacuum-Microwave Finishing Drying: Kinetics, Energy Consumption, and Quality Studies,” *Food Bioprocess Technol.*, vol. 7, no. 2, pp. 398–408, 2014, doi: 10.1007/s11947-013-1062-3.
- [8] A. K. Haghi and N. Amanifard, “Analysis of Heat and Mass Transfer During Microwave Drying of Food Products,” *Brazilian J. Chem. Eng.*, vol. 25, pp. 491–501, Sep. 2008, doi: 10.1590/S0104-66322008000300007.
- [9] T. Le and W. Jittanit, “Drying Characteristics of Cooked Jasmine Brown Rice and True Densities of Dried Products,” *Kasetsart J. - Nat. Sci.*, vol. 46, pp. 256–271, Feb. 2012.

- [10] A. Jiao, X. Xu, and Z. Jin, “Modelling of Dehydration–Rehydration of Instant Rice in Combined Microwave-Hot Air Drying,” *Food Bioprod. Process.*, vol. 92, no. 3, pp. 259–265, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2013.08.002>.
- [11] M. E. C. Oliveira and A. S. Franca, “Microwave Heating of Foodstuffs,” *J. Food Eng.*, vol. 53, no. 4, pp. 347–359, 2002, doi: [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(01\)00176-5](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(01)00176-5).
- [12] Ampro Heath, “คุณประโยชน์ของถั่วแดงหลวง (Kidney Bean),” 2017. <https://amprohealth.com/food/kidney-bean/>
- [13] Medthai, “ถั่วแดง,” 2017. <https://medthai.com/ถั่วแดง>
- [14] Puechkaset.com, “ถั่วแดง/ถั่วแดงหลวง ประโยชน์ และสรรพคุณถั่วแดงหลวง,” 2017. <https://puechkaset.com/ถั่วแดง>
- [15] S. Mahatheeranont, S. Keawsa-ard, and K. Dumri, “Quantification of the Rice Aroma Compound, 2-Acetyl-1-pyrroline, in Uncooked Khao Dawk Mali 105 Brown Rice,” *J. Agric. Food Chem.*, vol. 49, no. 2, pp. 773–779, Feb. 2001, doi: 10.1021/jf000885y.
- [16] J. Meullenet, B. Marks, J.-A. Hankins, V. Griffin, and M. Daniels, “Sensory Quality of Cooked Long-Grain Rice as Affected by Rough Rice Moisture Content, Storage Temperature, and Storage Duration,” *Cereal Chem. - Cereal CHEM*, vol. 77, pp. 259–263, Mar. 2000, doi: 10.1094/CCHEM.2000.77.2.259.
- [17] อรอนงค์ นัยวิกุล, ข้าว: วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน คณะอุตสาหกรรมเกษตร ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร, 2004. [Online]. Available: https://kukr.lib.ku.ac.th:443/db/BKN/search_detail/exportBibTex/184608
- [18] A. K. Ozai-Durrani, “Quick-Cooking Rice and Process for Making Same,” 1948
- [19] R. L. Roberts, “Production of Quick-Cooking Rice,” 2,610,124, 1954
- [20] K. Yasumatsu, T. Sawada, K. Sawada, and S. Moritaka, “Preparation of Quick-Cooking Rice,” 3,582,352, 1971
- [21] R. L. Roberts, “Preparation of Pre-Cooked Rice,” 2,715,579, 1955
- [22] B. B. Reddy, B. C. Ghosh, and M. D. Reddy, “Effect of Transplanting Date and Seedling Age on Stand Establishment and Grain Yield of Rice in Rainfed Lowland

(Intermediate Deep-Water) Conditions,” *Exp. Agric.*, vol. 23, no. 2, pp. 201–206, 1987, doi: DOI: 10.1017/S0014479700016999.

[23] สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, *การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท*. กรุงเทพมหานคร: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2540.

[24] วิไล รังสาดทอง, *เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร*. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2547.

[25] Z. Berk, *Food Process Engineering and Technology*, 1st ed. Oxford: Academic Press, 2009. doi: 10.1016/B978-0-12-373660-4.00014-4.

[26] J. Srikiatden and J. S. Roberts, “Moisture Transfer in Solid Food Materials: A Review of Mechanisms, Models, and Measurements,” *Int. J. Food Prop.*, vol. 10, pp. 739–777, Oct. 2007, doi: 10.1080/10942910601161672.

[27] R. Singh and D. R. Heldman, *Introduction to food engineering*, 5th ed. Amsterdam: Academic Press, 2014. doi: <https://doi.org/10.1016/C2011-0-06101-X>.

[28] ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช, *พื้นฐานการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ*. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2551.

[29] M. . Okos, O. Campanella, G. Narsimhan, R. K. Singh, and A. C. Weitnauer, “Food Dehydration,” in *Handbook of Food Engineering*, 2nd ed., D. R. Heldman and D. B. Lund, Eds. Boca Raton: CRC press, 2007, pp. 601–744.

[30] J. Tang, “Unlocking Potentials of Microwaves for Food Safety and Quality,” *J. Food Sci.*, vol. 80, no. 8, pp. E1776–E1793, Aug. 2015, doi: 10.1111/1750-3841.12959.

[31] สายสนม ประดิษฐ์ดวง, “การให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟและการฉายรังสีอาหาร,” in *วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอาหาร*, 3rd ed., คณาจารย์ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร, Ed. กรุงเทพมหานคร: คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน, 2543, pp. 173–195.

[32] S. Chandrasekaran, S. Ramanathan, and T. Basak, “Microwave Food Processing—A Review,” *Food Res. Int.*, vol. 52, no. 1, pp. 243–261, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2013.02.033>.

[33] M. Zhang, J. Tang, A. S. Mujumdar, and S. Wang, “Trends in Microwave Related Drying of Fruits and Vegetables,” *Trends Food Sci. Technol.*, vol. 17, pp. 524–534, 2006.

- [34] C. Kumar, A. Karim, and M. U. H. Joardder (Omar), “Intermittent Drying of Food Products: A Critical Review,” *J. Food Eng.*, Aug. 2014, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2013.08.014.
- [35] สิริชัย ส่งเสริมพงษ์, เจริญเหรียญ สงวนศรี, and อรอนงค์ นัยวิกุล, “การพัฒนากระบวนการผลิตก๋วยเตี๋ยวเส้นเล็กและเส้นใหญ่แบบใหม่.” สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพมหานคร, 2554.
- [36] สิริชัย ส่งเสริมพงษ์, นพรัตน์ อธิสุนทรวัฒน์, and มั่นสนันท์ ซื่อประเสริฐ, “การอบแห้งเนื้อลำไยสีทองด้วยเครื่องอบแห้งไมโครเวฟแบบสายพานไหลต่อเนื่อง,” in *เทคนิควิจัย (01052491)*, ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2555.
- [37] สิริชัย ส่งเสริมพงษ์, ณัฐริชา ศรีสุกใส, and รังสิยา พรหมคณิน, “การเปรียบเทียบการอบแห้งกล้วยและขนุนด้วยไมโครเวฟและวิธีอบลมร้อน,” in *เทคนิควิจัย (01052491)*, ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2553.
- [38] สิริชัย ส่งเสริมพงษ์, นันทนิตย์ สุรพันธุ์, and จิราพร สุวรรณวงษ์, “การอบแห้งเครื่องต้มยำด้วยไมโครเวฟแบบสายพานไหลต่อเนื่อง,” in *เทคนิควิจัย (01052491)*, ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2553.
- [39] สิริชัย ส่งเสริมพงษ์, ชลธิชา เชื้อศิริ, and ฐิตาภา โพธิ์แจ่ม, “การอบแห้งกุ้งด้วยไมโครเวฟแบบสายพานไหลต่อเนื่อง,” in *เทคนิควิจัย (01052491)*, ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2554.
- [40] สิริชัย ส่งเสริมพงษ์, อุมาวดี เกตุงาม, and ธันย์ชนก วิศิษฐ์ศักดิ์, “เปรียบเทียบการทำแห้งมะพร้าวชิ้นเล็กอบแห้งและมะพร้าวเกล็ดโดยเครื่องไมโครเวฟแบบสายพานไหลต่อเนื่องกับเครื่องอบแห้งลมร้อน,” in *เทคนิควิจัย (01052491)*, ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2553.
- [41] D. Wray and H. S. Ramaswamy, “Novel Concepts in Microwave Drying of Foods,” *Dry. Technol.*, vol. 33, no. 7, pp. 769–783, May 2015, doi: 10.1080/07373937.2014.985793.
- [42] N. Therdthai and W. Zhou, “Characterization of Microwave Vacuum Drying and Hot Air Drying of Mint Leaves (*Mentha cordifolia* Opiz ex Fresen),” *J. Food Eng.*, vol. 91, pp. 482–489, Apr. 2009, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2008.09.031.

- [43] R. Wang, M. Zhang, and A. Mujumdar, "Effects of Vacuum and Microwave Freeze Drying on Microstructure and Quality of Potato Slices," *J. Food Eng.*, vol. 101, pp. 131–139, Nov. 2010, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2010.05.021.
- [44] L. Kahyaoglu, S. Sahin, and G. Sumnu, "Physical Properties of Parboiled Wheat and Bulgur Produced Using Spouted Bed and Microwave Assisted Spouted Bed Drying," *J. Food Eng.*, vol. 98, pp. 159–169, May 2010, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2009.12.022.
- [45] M. Li, B. Wang, W. Lv, R. Lin, and D. Zhao, "Characterization of Pre-Gelatinized Kidney Bean (*Phaseolus vulgaris* L.) Produced Using Microwave Hot-Air Flow Rolling Drying Technique," *LWT*, vol. 154, p. 112673, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112673>.
- [46] J. S. Wang and Y. Sen Xiong, "Microwave Drying Characteristics of Kidney Beans and the Effect of Different Microwave Powers on the Dried Quality of Kidney Beans," *Adv. Mater. Res.*, vol. 781–784, pp. 1469–1473, 2013, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.781-784.1469.
- [47] J. Wang, Y. W. Wang, J. W. Wang, and X. L. He, "Drying Characteristics and Drying Quality of Kidney Beans Using a Two-Stage Microwave Process," *J. Food Process Eng.*, vol. 31, no. 3, pp. 413–430, Jun. 2008, doi: <https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.2007.00170.x>.
- [48] İ. Doymaz, "Drying Behaviour of Green Beans," *J. Food Eng.*, vol. 69, no. 2, pp. 161–165, 2005, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.08.009>.
- [49] วีระ ศรีอริยะกุล, "อิทธิพลของการพ่นไอน้ำก่อนที่มีต่อการผลิตข้าวเหนียวโดยใช้เทคนิคฟลูอิดไดเซชันที่ใช้อากาศร้อน," มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2549.
- [50] 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.

- [51] M. Peleg, "An Empirical Model for the Description of Moisture Sorption Curves," *J. Food Sci.*, vol. 53, no. 4, pp. 1216–1217, Jul. 1988, doi: 10.1111/j.1365-2621.1988.tb13565.x.
- [52] A. Marabi, S. Livings, M. Jacobson, and I. S. Saguy, "Normalized Weibull Distribution for Modeling Rehydration of Food Particulates," *Eur. Food Res. Technol.*, vol. 217, pp. 311–318, Oct. 2003, doi: 10.1007/s00217-003-0719-y.
- [53] D. I. Onwude, N. Hashim, R. B. Janius, N. M. Nawi, and K. Abdan, "Modeling the Thin-Layer Drying of Fruits and Vegetables: A Review," *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.*, vol. 15, no. 3, pp. 599–618, May 2016, doi: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12196>.
- [54] P. Chupawa, T. Gaewsondee, and W. Duangkhamchan, "Drying Characteristics and Quality Attributes Affected by a Fluidized-Bed Drying Assisted with Swirling Compressed-Air for Preparing Instant Red Jasmine Rice," *Processes*, vol. 9, no. 10. 2021. doi: 10.3390/pr9101738.
- [55] Y. Soysal, "Microwave Drying Characteristics of Parsley," *Biosyst. Eng.*, vol. 89, no. 2, pp. 167–173, 2004, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2004.07.008>.
- [56] E. I. Goksu, G. Sumnu, and A. Esin, "Effect of Microwave on Fluidized Bed Drying of Macaroni Beads," *J. Food Eng.*, vol. 66, no. 4, pp. 463–468, 2005, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.04.017>.
- [57] J. Sripinyowanich and A. Noomhorm, "Effects of Freezing Pretreatment, Microwave-Assisted Vibro-Fluidized Bed Drying and Drying Temperature on Instant Rice Production and Quality," *J. Food Process. Preserv.*, vol. 37, no. 4, pp. 314–324, Aug. 2013, doi: 10.1111/j.1745-4549.2011.00651.x.
- [58] T. Gaewsondee and W. Duangkhamchan, "A Novel Process for Preparing Instant Riceberry Using Fluidized Bed Drying Assisted with Swirling Compressed-Air: Kinetic Aspects," *Food Bioprocess Technol.*, vol. 12, no. 8, pp. 1422–1434, 2019, doi: 10.1007/s11947-019-02306-x.
- [59] P. Luangmalawat, S. Prachayawarakorn, A. Nathakaranakule, and S. Soponronnarit, "Effect of Temperature on Drying Characteristics and Quality of Cooked Rice," *LWT - Food Sci. Technol.*, vol. 41, no. 4, pp. 716–723, 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2007.04.010>.

- [60] H. Feng and J. Tang, "Microwave Finish Drying of Diced Apples in a Spouted Bed," *J. Food Sci.*, vol. 63, no. 4, pp. 679–683, Jul. 1998, doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1998.tb15811.x>.
- [61] H. Majdi, J. A. Esfahani, and M. Mohebbi, "Optimization of Convective Drying by Response Surface Methodology," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 156, pp. 574–584, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.12.021>.
- [62] M. Maskan, "Drying, Shrinkage and Rehydration Characteristics of Kiwifruits During Hot Air and Microwave Drying," *J. Food Eng.*, vol. 48, no. 2, pp. 177–182, 2001, doi: [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00155-2](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00155-2).
- [63] E. Horuz and M. Maskan, "Hot Air and Microwave Drying of Pomegranate (*Punica granatum* L.) Arils," *J. Food Sci. Technol.*, vol. 52, no. 1, pp. 285–293, 2015, doi: 10.1007/s13197-013-1032-9.
- [64] I. İltter, S. Akyıl, E. Devseren, D. Okut, M. Koç, and F. Kaymak Ertekin, "Microwave and Hot Air Drying of Garlic Puree: Drying Kinetics and Quality Characteristics," *Heat Mass Transf.*, vol. 54, no. 7, pp. 2101–2112, 2018, doi: 10.1007/s00231-018-2294-6.
- [65] S. K. Giri and S. Prasad, "Drying Kinetics and Rehydration Characteristics of Microwave-Vacuum and Convective Hot-Air Dried Mushrooms," *J. Food Eng.*, vol. 78, no. 2, pp. 512–521, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.10.021>.
- [66] M. Toriki-Harchegani, D. Ghanbarian, A. Ghasemi Pirbalouti, and M. Sadeghi, "Dehydration Behaviour, Mathematical Modelling, Energy Efficiency and Essential Oil Yield of Peppermint Leaves Undergoing Microwave and Hot Air Treatments," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 58, pp. 407–418, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.078>.
- [67] S. Suna, "Effects of Hot Air, Microwave and Vacuum Drying on Drying Characteristics and Invitro Bioaccessibility of Medlar Fruit Leather (Pestil)," *Food Sci. Biotechnol.*, vol. 28, no. 5, pp. 1465–1474, 2019, doi: 10.1007/s10068-019-00588-7.
- [68] M. Zielinska and A. Michalska, "Microwave-Assisted Drying of Blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) Fruits: Drying kinetics, polyphenols, anthocyanins, antioxidant capacity, colour and texture.," *Food Chem.*, vol. 212, pp. 671–680, Dec. 2016, doi: 10.1016/j.foodchem.2016.06.003.

- [69] D. Kumar, S. Prasad, and G. S. Murthy, "Optimization of Microwave-Assisted Hot Air Drying Conditions of Okra Using Response Surface Methodology," *J. Food Sci. Technol.*, vol. 51, no. 2, pp. 221–232, 2014, doi: 10.1007/s13197-011-0487-9.
- [70] O. Rewthong, S. Soponronnarit, C. Taechapiroj, P. Tungtrakul, and S. Prachayawarakorn, "Effects of Cooking, Drying and Pretreatment Methods on Texture and Starch Digestibility of Instant Rice," *J. Food Eng.*, vol. 103, no. 3, pp. 258–264, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.10.022>.
- [71] F. Pei *et al.*, "Comparison of Freeze-Drying and Freeze-Drying Combined with Microwave Vacuum Drying Methods on Drying Kinetics and Rehydration Characteristics of Button Mushroom (*Agaricus bisporus*) Slices," *Food Bioprocess Technol.*, vol. 7, no. 6, pp. 1629–1639, 2014, doi: 10.1007/s11947-013-1199-0.
- [72] L. Yu, M. S. Turner, M. Fitzgerald, J. R. Stokes, and T. Witt, "Review of the Effects of Different Processing Technologies on Cooked and Convenience Rice Quality," *Trends Food Sci. Technol.*, vol. 59, pp. 124–138, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.11.009>.
- [73] 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.
- [74] M. Mahiuddin, M. I. H. Khan, C. Kumar, M. M. Rahman, and M. A. Karim, "Shrinkage of Food Materials During Drying: Current Status and Challenges," *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.*, vol. 17, no. 5, pp. 1113–1126, Sep. 2018, doi: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12375>.
- [75] P. B. Pathare, U. L. Opara, and F. A.-J. Al-Said, "Colour Measurement and Analysis in Fresh and Processed Foods: A Review," *Food Bioprocess Technol.*, vol. 6, no. 1, pp. 36–60, 2013, doi: 10.1007/s11947-012-0867-9.
- [76] L. M. Ahrné, N. R. Pereira, N. Staack, and P. Floberg, "Microwave Convective Drying of Plant Foods at Constant and Variable Microwave Power," *Dry. Technol.*, vol. 25, no. 7–8, pp. 1149–1153, Aug. 2007, doi: 10.1080/07373930701438436.

[77] J. Wang, J. S. Wang, and Y. Yu, "Microwave Drying Characteristics and Dried Quality of Pumpkin," *Int. J. Food Sci. Technol.*, vol. 42, no. 2, pp. 148–156, 2007, doi: 10.1111/j.1365-2621.2006.01170.x.

[78] Q. Hu, M. Zhang, A. S. Mujumdar, G. Xiao, and S. Jin-cai, "Drying of Edamames by Hot Air and Vacuum Microwave Combination," *J. Food Eng.*, vol. 77, no. 4, pp. 977–982, 2006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.08.025>.



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายวิษณุกรณ์ ทองฤทธิ์
วันเกิด	7 กุมภาพันธ์ 2531
สถานที่เกิด	อำเภอ คำม่วง
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	เลขที่ 9 หมู่ 8 บ้านโพนแพง ตำบลดินจี่ อำเภอคำม่วง จังหวัดกาฬสินธุ์ 46180
ตำแหน่งหน้าที่การงาน	ครูผู้ช่วย
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	วิทยาลัยการอาชีพหนองกุงศรี เลขที่ 25 หมู่ 2 ตำบลลำหนองแสน อำเภอหนองกุงศรี จังหวัดกาฬสินธุ์ 46220
ประวัติการศึกษา	พ.ศ.2549 ประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.) สาขาวิชาช่างยนต์ วิทยาลัยเทคนิคกาฬสินธุ์ พ.ศ.2551 ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) สาขาวิชาเครื่องกล วิทยาลัยเทคนิคกาฬสินธุ์ พ.ศ.2554 ประกาศนียบัตรครุเทคนิคชั้นสูง (ปทส.) สาขาวิชาเครื่องกล วิทยาลัยเทคนิคกาฬสินธุ์ พ.ศ.2566 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ทุนวิจัย	-
ผลงานวิจัย	-

พูนุ ปณฺ ทิโต ชีเว