



การอบแห้งแบบถ้งหมุนร่วมกับไมโครเวฟสำหรับการเตรียมลูกเต๋อยุ่สุกเร็ว

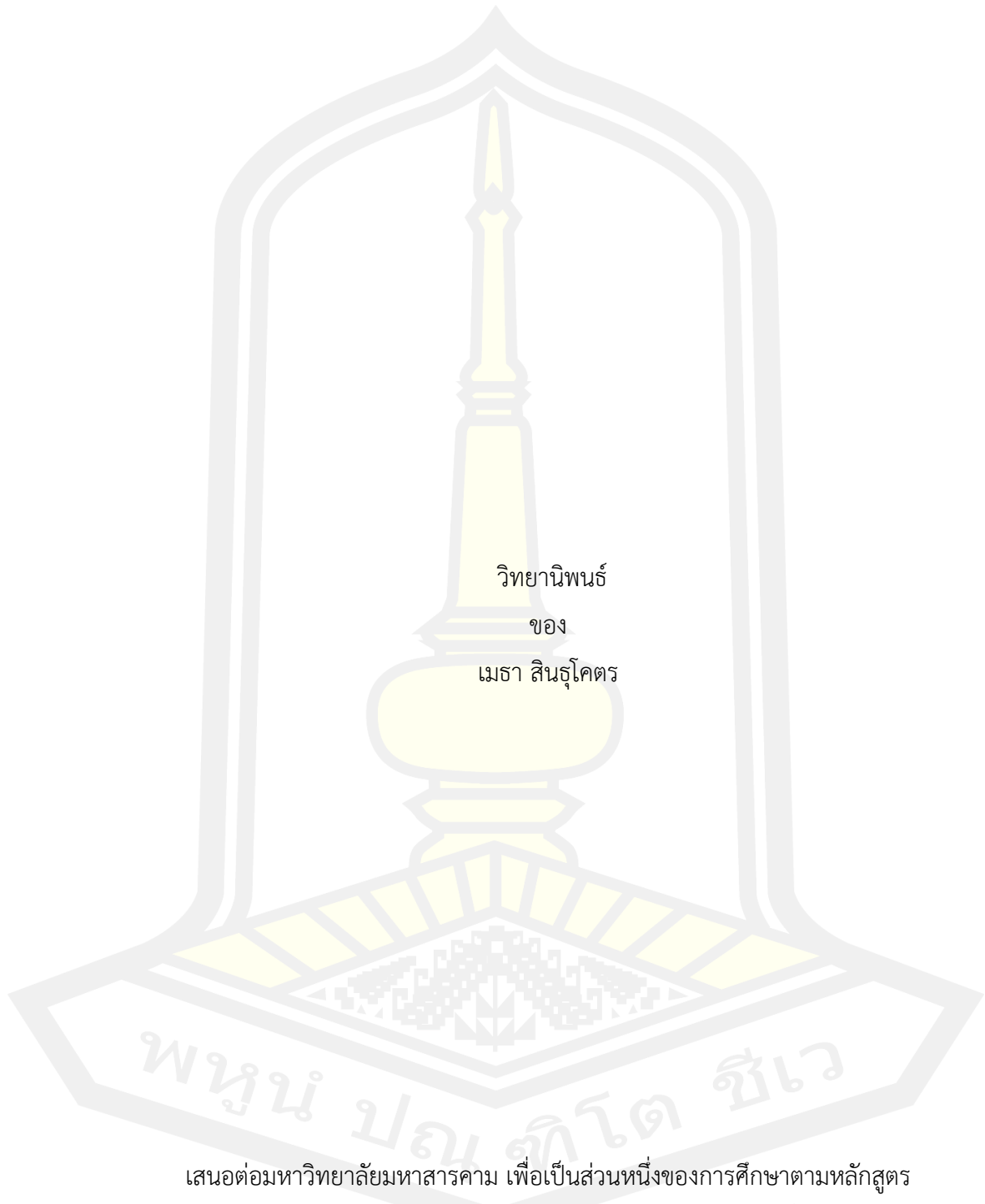
วิทยานิพนธ์
ของ
เมธา สิ้นธุโคตร

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

มกราคม 2566

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การอบแห้งแบบถ้งหมุนร่วมกับไมโครเวฟสำหรับการเตรียมลูกเต๋อยุ่สุกเร็ว



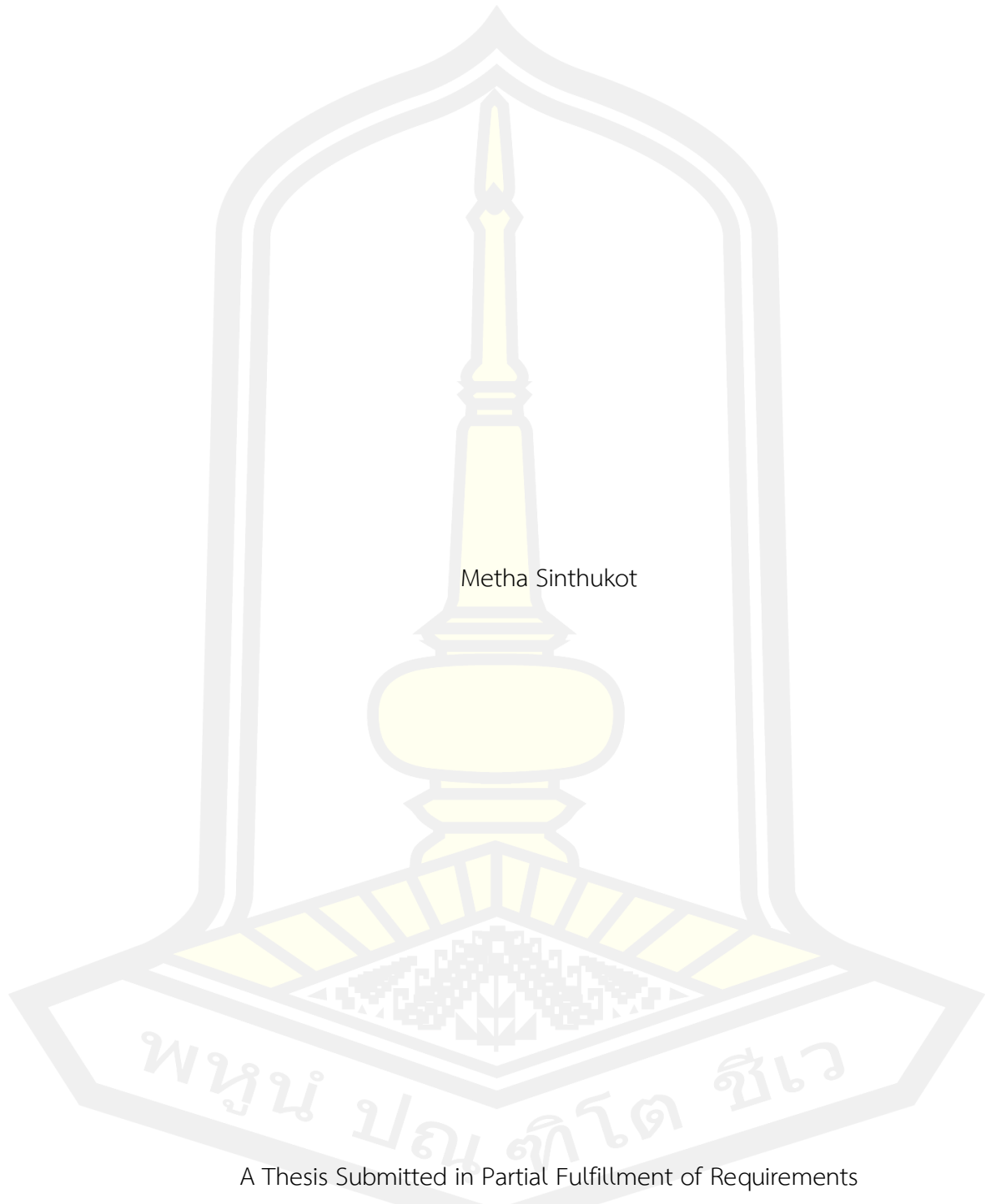
เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

มกราคม 2566

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Rotary drying combined with microwave for preparing quick-cooking job's tears



Metha Sinthukot

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

January 2023

Copyright of Maharakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายเมธา สินธุโคตร แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร. ดลฤดี ใจสุทธิ์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รศ. ดร. วสันต์ ดำรงคำจันทร์)

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. ละมุล วิเศษ)

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. อนุรักษ์ ภูมิสะอาด)

มหาวิทยาลัยอนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

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

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

.....
(รศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง	การอบแห้งแบบถึงหมุนร่วมกับไมโครเวฟสำหรับการเตรียมลูกเดี๋ยหุงสุกเร็ว		
ผู้วิจัย	เมธา สิริโคตร		
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. วสันต์ ดั่งคำจันทร์		
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต	สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม	ปีที่พิมพ์	2566

บทคัดย่อ

ลูกเดี๋ยเป็นธัญพืชที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง การบริโภคลูกเดี๋ยเพื่อให้ได้รสชาติและเนื้อสัมผัสที่ดีนั้นจำเป็นต้องใช้เวลาและขั้นตอนในการหุงสุกค่อนข้างมาก ดังนั้นผลิตภัณฑ์ลูกเดี๋ยกึ่งสำเร็จรูปจึงเป็นทางเลือกใหม่สำหรับผู้บริโภคที่ต้องการความเร่งด่วนและความสะดวกสบาย กระบวนการผลิตลูกเดี๋ยกึ่งสำเร็จรูป ได้แก่ การเตรียมตัวอย่าง การหุงสุก และการอบแห้ง ที่ผ่านมามีงานวิจัยที่พยายามแก้ปัญหาของเวลาการคั้นรูปที่ยาวนาน คุณสมบัติทางเนื้อสัมผัสที่เปลี่ยนแปลงไป และมุ่งเน้นศึกษาเทคนิคการอบแห้งที่มีความเป็นรูปสูงซึ่งเป็นคุณลักษณะที่สำคัญของผลิตภัณฑ์อาหารกึ่งสำเร็จรูป การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟเป็นหนึ่งในการอบแห้งที่สามารถลดระยะเวลาการอบแห้งที่สั้นลง แต่อย่างไรก็ตามวิธีดังกล่าวยังพบข้อจำกัดในการกระจายความร้อนที่ไม่สม่ำเสมอ ปริมาณน้ำที่สูญเสียนั้นจึงได้ศึกษากระบวนการอบแห้งในถึงหมุนร่วมกับไมโครเวฟเพื่อให้เกิดความสม่ำเสมอในการให้ความร้อน โดยมีปัจจัยการอบแห้ง 3 ปัจจัย ๆ ละ 3 ระดับ ได้แก่ 1) อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 70 80 และ 90 องศาเซลเซียส 2) กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 150 300 และ 450 วัตต์ 3) ความเร็วรอบของถึงหมุนเท่ากับ 10 20 และ 30 รอบต่อนาที การทดลองแบบ Full factorial design จะได้การทดลองทั้งหมด 27 การทดลอง

การออกแบบแบบจำลองการอบแห้งสำหรับลูกเดี๋ยหุงสุกเร็วที่นำเสนอ จำนวน 11 สมการ มาเปรียบเทียบกับอัตราส่วนความชื้น (MR) พบว่า แบบจำลองส่วนใหญ่มีค่า R^2 มากกว่า 0.98-0.99 โดยเฉพาะอย่างยิ่งสมการที่ประกอบด้วยพารามิเตอร์มากกว่า 2 ตัวขึ้นไป อย่างไรก็ตามสมการการอบแห้งดังกล่าวยากต่อการนำไปใช้ในทางปฏิบัติเพื่อศึกษาพฤติกรรมและศึกษาออกแบบสภาวะที่เหมาะสม เพื่อให้ง่ายต่อการศึกษาในหัวข้อต่อไป จึงได้นำแบบจำลองการอบแห้งของ Page ซึ่งมีค่า R^2 สูงกว่า 0.98 และมีความผิดพลาดต่ำในทุกสภาวะการอบแห้ง ไปใช้เพื่อศึกษาพฤติกรรมและศึกษาออกแบบสภาวะที่เหมาะสมของการอบแห้งของลูกเดี๋ยหุงสุกเร็วแบบถึงหมุนร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ ซึ่งจะได้พารามิเตอร์ของสมการของ Page คือ ค่าคงที่อัตรา (k) ค่าคงที่เลขชี้กำลัง (n) พบว่า การเพิ่มการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟนั้นทำให้อัตราการอบแห้งมีค่าสูงขึ้น

เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟทำให้โมเลกุลของน้ำภายในวัสดุเกิดการหมุนและความร้อนที่ระดับอุณหภูมิค่าหนึ่งซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกดูดซับด้วยโมเลกุลน้ำ ทำให้น้ำในวัสดุเกิดการระเหยและเคลื่อนที่ออกสู่อากาศภายนอกอย่างรวดเร็ว เมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะการอบแห้งที่ใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้สภาวะการอบแห้งที่ความเร็วรอบของถังหมุนที่ 10 รอบต่อนาทีเหมาะสมสำหรับกระบวนการอบแห้งที่นำเสนอในการศึกษานี้

กำหนดเกณฑ์เพื่อใช้ในการหาสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมจากปัจจัยการอบแห้ง 3 ปัจจัย ๆ ละ 3 ระดับ ที่มีผลการตอบสนองต่างๆ เช่น 1) ค่าคงที่อัตราการอบแห้ง (k) มีค่าสูงสุด 2) ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (De) มีค่าสูงสุด 3) การอบแห้ง (DT) มีค่าต่ำสุด และ 4) ค่าการใช้พลังงานจำเพาะ (SEC) มีค่าต่ำสุด พบว่า ค่าสูงสุดมีค่าเท่ากับ 0.85 ซึ่งสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมและสอดคล้องกับค่า Desirability สูงสุดนี้ประกอบด้วย อุณหภูมิลมร้อน (T) อยู่ในช่วง 76.40 – 76.59°C กำลังวัตต์ไมโครเวฟ (MW) อยู่ในช่วง 449.99 - 450 วัตต์ และความเร็วรอบของถังหมุนเท่ากับ 10 รอบต่อนาที อย่างไรก็ตาม เพื่อให้สะดวกในเชิงปฏิบัติสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมคือ อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 77°C กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 450 วัตต์ และความเร็วรอบของถังหมุนเท่ากับ 10 รอบต่อนาที สภาวะการอบแห้งดังกล่าวถูกวิเคราะห์คุณภาพด้านสี การคืนรูป และเนื้อสัมผัส พบว่า มีค่าใกล้เคียงกับตัวอย่างที่ผ่านการหุงสุกด้วยวิธีดั้งเดิมและการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าวิธีการเตรียมลูกเต๋อยุ่หุงสุกเร็วด้วยวิธีการอบแห้งแบบถังหมุนร่วมกับไมโครเวฟให้คุณภาพในระดับที่ยอมรับได้ในการศึกษานี้

คำสำคัญ : ลูกเต๋อยุ่พันธุ์ข้าวเหนียว, การอบแห้งแบบถังหมุนร่วมกับไมโครเวฟ, คุณลักษณะการอบแห้ง, คุณภาพการคืนรูป

TITLE	Rotary drying combined with microwave for preparing quick-cooking job's tears		
AUTHOR	Metha Sinthukot		
ADVISORS	Associate Professor Wasan Duangkhamchan , Ph.D.		
DEGREE	Master of Engineering	MAJOR	Mechanical Engineering
UNIVERSITY	Maharakham University	YEAR	2023

ABSTRACT

Adlay millet has high nutrition. Consuming adlay millet with good taste has to highly spend the time and process for cooking. For this problem, instant adlay millet becomes the better way for consumers by the convenience. The procedures of making instant adlay millet are preparing, cooking and drying. There have been many research for solving the problem of long-lasting rehydration and texture change and emphasizing the study of drying techniques with highly-porous characteristic which is the important factor of instant food. Drying by hot air with microwave is one of the methods which can shorten the time of drying. However, there is the limitation of the irregularity for heat radiation. This thesis mainly studied the process of drying in spinning tank with microwave for heat regularity, with the three main factors of drying with 3-level, 1) the hot air temperature of 70, 80 and 90 Celsius degree, 2) the watt power of microwave of 150, 300 and 450 watt, and 3) the speed of spinning tank of 10, 20 and 30 rounds per minute. There were 27 forms for full factorial design experiment.

The 11 equations of presented model of adlay millet drying compared with moisture ratio resulted that most of equations had the value of R^2 more than 0.98-0.99, especially the equations which had at least 2 parameters. However, the equations of adlay millet drying were quite hard to study for its states and suitable conditions. For the easier way of the next study, the author used Page's drying model, which had the value of R^2 more than 0.98 and low error, to study states and

suitable conditions of fast-cooking adlay millet drying using spinning tank with heat producing by microwave. It showed the parameter value of Page's equations at the stable rate (k) and stable exponent (n) that increasing the heat rate of microwave could improve the higher rate of drying. It was affected by microwave wave which affected the water molecules in the material spun and the heat depended on the electromagnetic wave absorbed by water molecules. It affected the water in the material evaporated and moved fast, compared to drying state with hot air. Moreover, ten-round-per-minute spinning tank of drying state was suitable for drying process for this study.

The determined criteria of suitable drying state with three main factors responded 1) the stable ration (k) had the highest value 2) coefficient value of effective diffusion (De) had the highest value 3) drying (DT) had the lowest value and 4) Specific Energy Consumption value had the lowest value. They showed that the highest value was 0.85, which the drying state related with desirability included with hot air temperature (T) with the rate of 76.40-76.59 °C, microwave watt (MW) with the rate of 449.99-450 watt and ten-round-per-minute spinning tank. However, the best-suitable drying state should be 77 °C for hot air temperature, 450 watt for microwave watt and 10 rounds per minute for spinning tank. This drying state was analyzed the color quality, rehydration and texture and showed that the approximate value with original cooking and frozen drying. It summarized that the preparing of fast-cooking adlay millet by using drying with spinning tank and microwave had the acceptable rate for this study.

Keyword : Sticky millet, Rotary drum drying with microwave, Drying characteristics, Recovery quality

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความอนุเคราะห์จากทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้อง ซึ่งผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยมหาสารคามสนับสนุนทุนสำหรับการทำวิจัย และภาควิชาเทคโนโลยีเครื่องกล วิทยาลัยเทคนิคมหาสารคาม สถาบันการอาชีวศึกษาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 3 อำนาจสถานี่สร้างเครื่องมือ ในการทดลอง ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.วสันต์ด้วง คำจันทร์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ซึ่งได้ชี้แนะแนวทาง ความกรุณาให้ความรู้คำแนะนำอย่างเอาใจใส่ในทุกขั้นตอนของการทำวิทยานิพนธ์ทั้งในการทดลอง การเขียนวิทยานิพนธ์ตลอดจนการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ตลฤดี ใจสุทธิ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพล ภูมิสะอาด และ ผู้ช่วย ศาสตราจารย์ ดร.ละมุล วิเศษ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ซึ่งให้ความกรุณาตรวจสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนการสอนวิชาการความรู้ต่าง ๆ แนะนำการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ และประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ในด้านต่าง ๆ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ บิดา และมารดา ที่คอยให้กำลังใจ เอาใจใส่ดูแลและสนับสนุนทุกสิ่งทุกอย่างด้วยดีโดยเฉพาะการให้กำลังใจ และคำแนะนำในการดำเนินชีวิตแก่ข้าพเจ้าตลอดมา

หากเนื้อหาหรือข้อมูลต่าง ๆ ในวิทยานิพนธ์นี้เป็นประโยชน์แก่ผู้สนใจศึกษาและผู้วิจัยท่านอื่น ๆ ข้าพเจ้าขอยกคุณความดีทั้งหลายนี้ให้แก่บุคคลทุกท่านที่กล่าวมา ท้ายสุดหากวิทยานิพนธ์เล่มนี้มีข้อบกพร่องหรือผิดพลาดประการใด ข้าพเจ้ากราบขอภัยไว้ ณ ที่นี้

เมธา สินธุ์โคตร

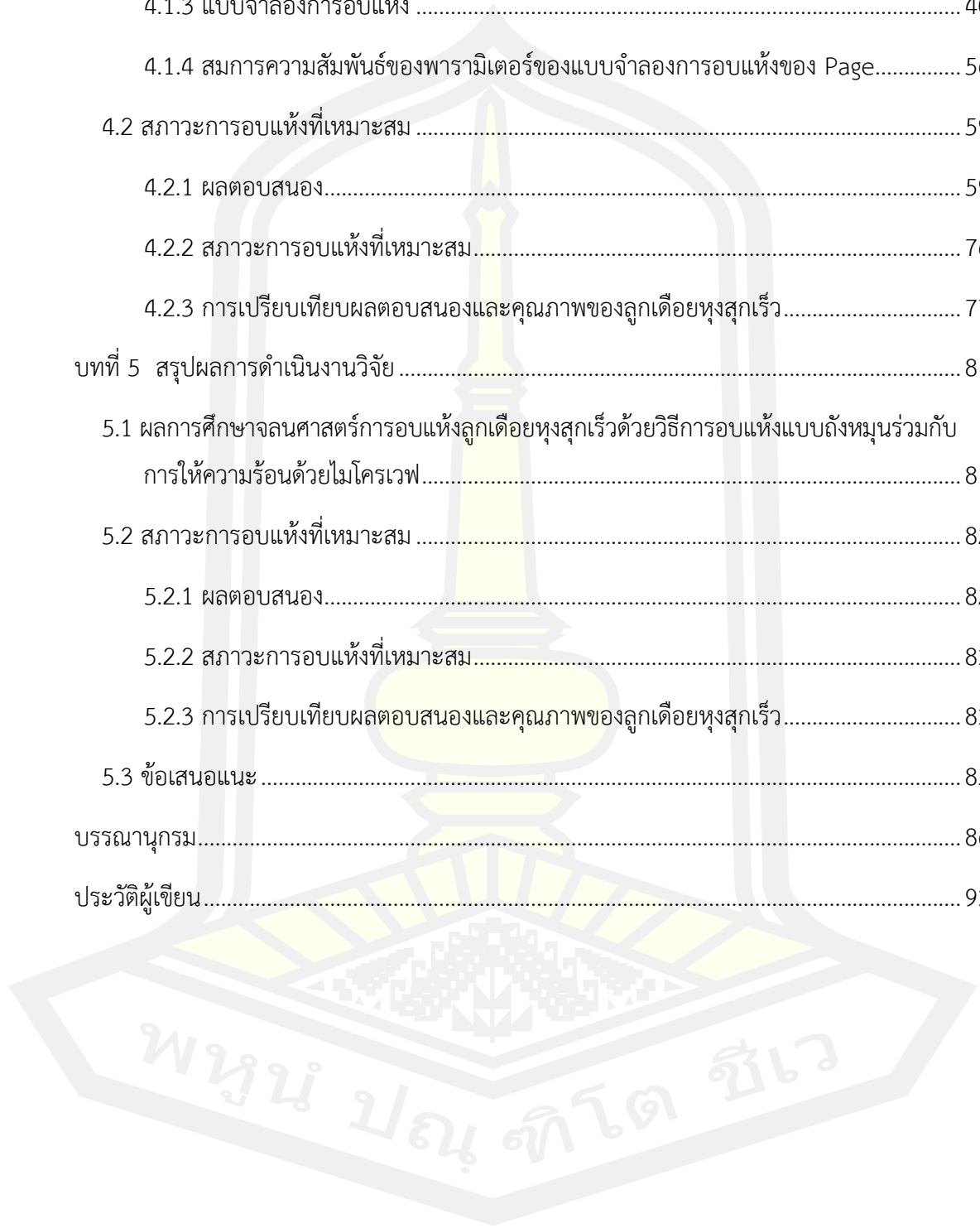
พหุบัน ปณฺ ทิโต ชิว

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ฉ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ฌ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ณ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 หลักการและเหตุผล.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.5 สถานที่ดำเนินการศึกษา.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับลูกเต๋อย.....	4
2.2 กระบวนการผลิตธัญพืชรឹងสำเร็จรูป.....	6
2.2.1 การแช่-ต้ม-ทำแห้ง.....	7
2.2.2 การทำให้เกิดการพองตัว (Puffing/pre-gelatinization).....	7
2.2.3 การใช้ puffing gun.....	8
2.2.4 วิธีการทำแห้งสำหรับธัญพืชรឹងสำเร็จรูป.....	8
2.3 ทฤษฎีการอบแห้ง.....	9
2.4 ทฤษฎีการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ.....	11

2.4.1 การอบแห้งด้วยไมโครเวฟ (microwave drying).....	12
2.4.2 ข้อจำกัดของการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ.....	13
2.4.3 การใช้พลังงานไมโครเวฟร่วมในการอบแห้งด้วยลมร้อน	13
2.4.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับการใช้คลื่นไมโครเวฟ.....	14
2.4.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้คลื่นไมโครเวฟร่วมกับระบบการอบแห้งชนิดอื่น ๆ	15
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการแปรรูปลูกเด็ยหุงสุกเร็วหรือกึ่งสำเร็จรูป	18
2.6 วิธีพื้นผิวตอบสนอง.....	19
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการศึกษา.....	20
3.1 วิธีการเตรียมตัวอย่าง.....	21
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	21
3.2.1 เครื่องอบแห้งแบบถังหมุนร่วมกับไมโครเวฟ	21
3.2.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองและเก็บรวบรวมข้อมูล	23
3.3 วิธีการทดลองและเก็บข้อมูล.....	23
3.3.1 การวางแผนการทดลอง.....	23
3.3.2 การวิเคราะห์คุณภาพ	25
3.3.3 ค่าการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ	27
3.4 การหาจลนศาสตร์การอบแห้งและการคืนตัว.....	28
3.4.1 จลนศาสตร์การอบแห้ง.....	28
3.4.2 การวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น	29
3.4.3 จลนศาสตร์การคืนรูป (Rehydration kinetics).....	30
3.5 การหาสภาวะที่เหมาะสม (Optimization).....	31
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	32
4.1 ผลการศึกษาจลนศาสตร์การอบแห้งลูกเด็ยหุงสุกเร็วด้วยวิธีการอบแห้งแบบถังหมุนร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ.....	32

4.1.2 พฤติกรรมการอบแห้งของลูกเต๋อยหุงสุก.....	33
4.1.3 แบบจำลองการอบแห้ง	40
4.1.4 สมการความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ของแบบจำลองการอบแห้งของ Page.....	56
4.2 สภาวะการอบแห้งที่เหมาะสม	59
4.2.1 ผลตอบสนอง.....	59
4.2.2 สภาวะการอบแห้งที่เหมาะสม.....	76
4.2.3 การเปรียบเทียบผลตอบสนองและคุณภาพของลูกเต๋อยหุงสุกเร็ว.....	77
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย	81
5.1 ผลการศึกษาจลนศาสตร์การอบแห้งลูกเต๋อยหุงสุกเร็วด้วยวิธีการอบแห้งแบบถึงหมูน่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ.....	81
5.2 สภาวะการอบแห้งที่เหมาะสม	82
5.2.1 ผลตอบสนอง.....	82
5.2.2 สภาวะการอบแห้งที่เหมาะสม.....	83
5.2.3 การเปรียบเทียบผลตอบสนองและคุณภาพของลูกเต๋อยหุงสุกเร็ว.....	83
5.3 ข้อเสนอแนะ	85
บรรณานุกรม.....	86
ประวัติผู้เขียน.....	93



สารบัญตาราง

หน้า

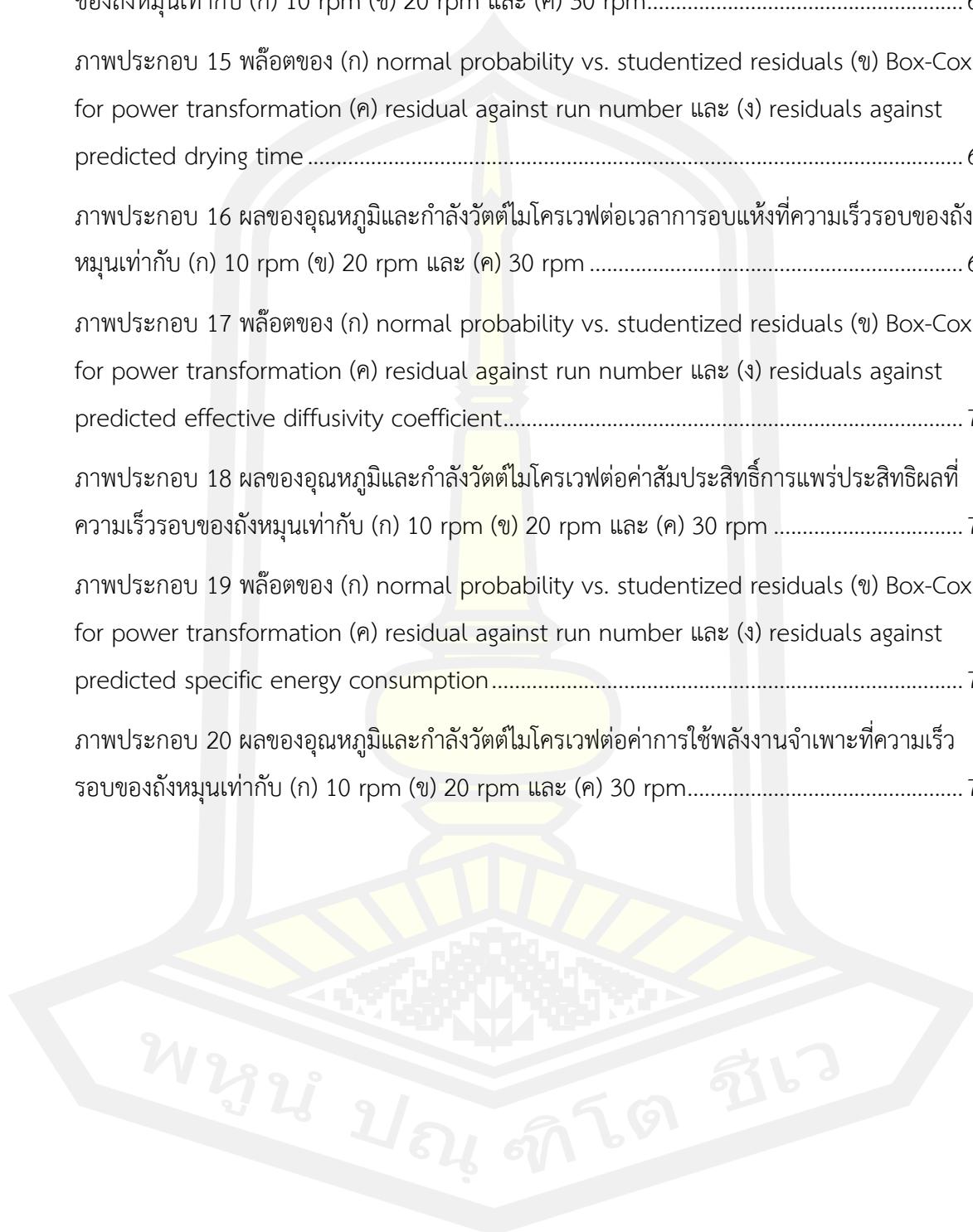
ตาราง 1	สภาวะการทดลองที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบ Full factorial design.....	24
ตาราง 2	รูปแบบสมการพื้นฐานที่ใช้ทำนายการอบแห้งวัสดุชิ้นบาง.....	29
ตาราง 3	พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 70°C กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 150 วัตต์ และความเร็วรอบของถังหมุนเท่ากับ 10 รอบต่อนาที	40
ตาราง 4	พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 70°C กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 150 วัตต์ และความเร็วรอบของถังหมุนเท่ากับ 20 รอบต่อนาที	41
ตาราง 5	พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 70°C กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 150 วัตต์ และความเร็วรอบของถังหมุนเท่ากับ 30 รอบต่อนาที	41
ตาราง 6	พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 70°C กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 300 วัตต์ และความเร็วรอบของถังหมุนเท่ากับ 10 รอบต่อนาที	42
ตาราง 7	พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 70°C กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 300 วัตต์ และความเร็วรอบของถังหมุนเท่ากับ 20 รอบต่อนาที	42
ตาราง 8	พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 70°C กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 300 วัตต์ และความเร็วรอบของถังหมุนเท่ากับ 30 รอบต่อนาที	43
ตาราง 9	พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 70°C กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 450 วัตต์ และความเร็วรอบของถังหมุนเท่ากับ 10 รอบต่อนาที	43

ตาราง 28 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 90°C กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 450 วัตต์ และความเร็วรอบของถังหมุนเท่ากับ 20 รอบต่อนาที	53
ตาราง 29 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 90°C กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 450 วัตต์ และความเร็วรอบของถังหมุนเท่ากับ 30 รอบต่อนาที	53
ตาราง 30 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 70°C กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 0 วัตต์ และความเร็วรอบของถังหมุนเท่ากับ 20 รอบต่อนาที	54
ตาราง 31 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 80°C กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 0 วัตต์ และความเร็วรอบของถังหมุนเท่ากับ 20 รอบต่อนาที	54
ตาราง 32 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 90°C กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 0 วัตต์ และความเร็วรอบของถังหมุนเท่ากับ 20 รอบต่อนาที	55
ตาราง 33 พารามิเตอร์ของสมการการอบแห้งของ Page เวลาการอบแห้ง และค่าสัมประสิทธิ์แปรผันความชื้นประสิทธิผลที่สภาวะการอบแห้งแตกต่างกัน.....	56
ตาราง 34 พารามิเตอร์ทางสถิติสำหรับการสมการความสัมพันธ์ที่เหมาะสมของค่าคงที่อัตราการอบแห้ง k	59
ตาราง 35 พารามิเตอร์ทางสถิติสำหรับการสมการความสัมพันธ์ที่เหมาะสมของค่าคงที่เลขชี้กำลัง n	59
ตาราง 36 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน ANOVA ของ Fitted Model สำหรับผลตอบสนองทั้งหมดที่ใช้ในการหาสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสม	60
ตาราง 37 สภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมและค่าผลตอบสนอง	77
ตาราง 38 การเปรียบเทียบผลตอบสนองและคุณภาพของลูกเต๋อยุ่สูงเร็วที่ได้จากการเทคนิคการอบแห้งที่แตกต่างกัน	78

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
ภาพประกอบ 1 อัตราการอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่และอัตราการอบแห้งลดลง	10
ภาพประกอบ 2 ระบบการอบแห้งด้วยไมโครเวฟเพื่อใช้ในการศึกษาต่าง ๆ	13
ภาพประกอบ 3 แผนผังการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ	17
ภาพประกอบ 4 ระบบการอบแห้งแบบสเปาเตดเบดร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ	17
ภาพประกอบ 5 ภาพรวมของขั้นตอนการศึกษา	20
ภาพประกอบ 6 ไดอะแกรมชุดอบแห้งแบบถึงหมุ่นร่วมกับไมโครเวฟ	21
ภาพประกอบ 7 ห้องอบแห้งแบบถึงหมุ่นร่วมกับไมโครเวฟ	22
ภาพประกอบ 8 ชุดสร้างลมร้อนและระบบควบคุมความเร็วและอุณหภูมิ	22
ภาพประกอบ 9 อัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นของลูกเดือยหุงสุกเร็วที่อบแห้งที่อุณหภูมิลมร้อน กำลังวัตต์ไมโครเวฟและ ความเร็วถึงหมุ่นแตกต่างกัน	32
ภาพประกอบ 10 กราฟอัตราส่วนความชื้นและเวลาการอบแห้งที่อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 70°C ที่ กำลังวัตต์ของไมโครเวฟแตกต่างกัน และความเร็วรอบของถึงหมุ่นเท่ากับ (ก) 10 รอบต่อนาที (ข) 20 รอบต่อนาที และ (ค) 30 รอบต่อนาที	35
ภาพประกอบ 11 กราฟอัตราส่วนความชื้นและเวลาการอบแห้งที่อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 80°C ที่ กำลังวัตต์ของไมโครเวฟแตกต่างกัน และความเร็วรอบของถึงหมุ่นเท่ากับ (ก) 10 รอบต่อนาที (ข) 20 รอบต่อนาที และ (ค) 30 รอบต่อนาที	38
ภาพประกอบ 12 กราฟอัตราส่วนความชื้นและเวลาการอบแห้งที่อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 90°C ที่ กำลังวัตต์ของไมโครเวฟแตกต่างกัน และความเร็วรอบของถึงหมุ่นเท่ากับ (ก) 10 รอบต่อนาที (ข) 20 รอบต่อนาที และ (ค) 30 รอบต่อนาที	39
ภาพประกอบ 13 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	63

ภาพประกอบ 14 ผลของอุณหภูมิและกำลังวัตต์ไมโครเวฟต่อค่าคงที่อัตราการอบแห้งที่ความเร็วรอบของถังหมุนเท่ากับ (ก) 10 rpm (ข) 20 rpm และ (ค) 30 rpm.....	64
ภาพประกอบ 15 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	67
ภาพประกอบ 16 ผลของอุณหภูมิและกำลังวัตต์ไมโครเวฟต่อเวลาการอบแห้งที่ความเร็วรอบของถังหมุนเท่ากับ (ก) 10 rpm (ข) 20 rpm และ (ค) 30 rpm	68
ภาพประกอบ 17 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.....	70
ภาพประกอบ 18 ผลของอุณหภูมิและกำลังวัตต์ไมโครเวฟต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลที่ความเร็วรอบของถังหมุนเท่ากับ (ก) 10 rpm (ข) 20 rpm และ (ค) 30 rpm	72
ภาพประกอบ 19 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	74
ภาพประกอบ 20 ผลของอุณหภูมิและกำลังวัตต์ไมโครเวฟต่อค่าการใช้พลังงานจำเพาะที่ความเร็วรอบของถังหมุนเท่ากับ (ก) 10 rpm (ข) 20 rpm และ (ค) 30 rpm.....	75



บทที่ 1

บทนำ

1.1 หลักการและเหตุผล

พืชที่ผู้คนทั่วโลกนิยมนำมาเป็นอาหารมากกว่าพืชชนิดอื่น ๆ และจัดว่าเป็นแหล่งพลังงานแก่มนุษย์มากที่สุด นั่นคือ “ธัญพืช” โดยรับประทานเป็นอาหารหลักหรือนำไปแปรรูปเป็นอาหารรูปแบบอื่น ลูกเดือยเป็นหนึ่งในธัญพืชที่ได้รับความนิยมในปัจจุบันเนื่องจากให้สารอาหารประเภทคาร์โบไฮเดรตสูงเช่นเดียวกับธัญพืชในกลุ่มข้าว มีฤทธิ์เป็นยาเย็น ช่วยแก้ร้อนใน บรรเทาอาการกระหายน้ำ บำรุงร่างกายและอวัยวะภายใน ช่วยลดระดับน้ำตาลในเลือดเนื่องจากประกอบด้วยไกลแคน (glycans) ซึ่งประกอบด้วย Coixan A Coixan B และ Coixan C ช่วยขับปัสสาวะและทำให้ระบบขับถ่ายดีขึ้นเพราะมีปริมาณกากใยสูง มีสารคอกซิโนไลด์ ที่ช่วยยับยั้งการเกิดเนื้องอก มีกรดอะมิโน ที่ร่างกายต้องการและไขมันชนิดไม่อิ่มตัวสูงมาก อย่างไรก็ตาม การบริโภคลูกเดือยเพื่อให้ได้รสชาติและเนื้อสัมผัสที่ดีนั้นจำเป็นต้องใช้เวลาและขั้นตอนในการหุงสุกค่อนข้างมาก เช่น แช่น้ำประมาณ 2-3 ชั่วโมง ต่อด้วยต้มในน้ำเดือดประมาณ 10-20 นาที ดังนั้น ผลิตภัณฑ์ลูกเดือยจึงสำเร็จรูปจึงเป็นทางเลือกใหม่สำหรับผู้บริโภคที่ต้องการความเร่งด่วนและความสะดวกสบายในการหุงต้ม

เนื่องจากลูกเดือยจัดเป็นธัญพืชที่ประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรตสูงเช่นเดียวกับธัญพืชในกลุ่มข้าว ดังนั้นการผลิตผลิตภัณฑ์ลูกเดือยจึงมีขั้นตอนหลักๆ เช่นเดียวกับการผลิตข้าวฮาง (parboiling rice) หรือผลิตภัณฑ์ประเภทธัญพืชอื่น ๆ ซึ่งประกอบด้วย การเตรียมตัวอย่าง (pretreatment) การหุงสุก (cooking) และการอบแห้ง (drying) [1]–[4] จากขั้นตอนดังกล่าวทั้ง 3 ขั้นตอน การอบแห้งถือได้ว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดที่ส่งผลต่อเวลาในการคั้นรูปและคุณภาพทางประสาทสัมผัสของข้าวกล้องกึ่งสำเร็จรูป [1]–[3], [5]

ที่ผ่านมา มีนักวิจัยมากมายที่พยายามแก้ปัญหาของเวลาการคั้นรูปที่ยาวนานและคุณสมบัติทางเนื้อสัมผัสที่เปลี่ยนแปลงไป [1], [5], [6] โดยงานวิจัยที่ผ่านมา มุ่งเน้นศึกษาเทคนิคการอบแห้งที่ให้ผลิตภัณฑ์อบแห้งที่มีความเป็นรูพรุนสูงซึ่งเป็นคุณลักษณะที่สำคัญของผลิตภัณฑ์อาหารกึ่งสำเร็จรูป Chen et al. (2014) [7] ใช้เทคนิคการอบแห้งด้วยไมโครเวฟในกระบวนการอบแห้งแบบหลายขั้นตอนเพื่อผลิตข้าวกึ่งสำเร็จรูป แต่ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างต่างจาก Le and Jittani (2012) [8] คือการแช่ข้าวก่อนการหุงต้ม แล้วล้างด้วยน้ำเย็นเพื่อป้องกันการเกาะติดของข้าวสุก จากนั้นนำข้าวสุกที่ได้อบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 90 °C จนกระทั่งได้ความชื้น 40% (ฐานเปียก) แล้วจึงทำการ

อบแห้งต่อด้วยไมโครเวฟจนกระทั่งความชื้นเท่ากับ 20% (ฐานเปียก) ขั้นตอนสุดท้ายทำโดยดึงความชื้นออกด้วยวิธีออสโมซิส Jiao et al. (2014) [9] ได้เปรียบเทียบเวลาและอัตราการคืนรูปของข้าวกล้องสำเร็จรูปที่เตรียมโดยใช้วิธีการอบแห้งที่แตกต่างกัน โดยก่อนการอบแห้ง ทำการหุงสุกข้าวในน้ำเดือด ตามด้วยทำให้เย็นในน้ำที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเป็นเวลา 5 นาที เพื่อป้องกันการเกาะติดของเมล็ดข้าวสุก จากผลการทดลองพบว่า การอบแห้งด้วยลมร้อนที่ 80°C ร่วมกับไมโครเวฟที่กำลังวัตต์เท่ากับ 300 วัตต์ เป็นสภาวะที่เหมาะสมเมื่อพิจารณาจากจลนศาสตร์การอบแห้งและการคืนรูป Le and Jittanit (2015) [2] ได้ทำการเตรียมตัวอย่างข้าวหลายขั้นตอนก่อนการอบแห้งโดยแช่แข็งที่ -18°C เป็นเวลา 90 นาที จากนั้นละลายน้ำแข็งที่ 6°C เป็นเวลา 40 นาที และปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเป็นเวลา 20 นาที จากนั้นนำเข้าสู่กระบวนการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ จากผลการศึกษาพบว่าสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมที่สุดคือใช้อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 89.99°C และกำลังไมโครเวฟเท่ากับ 499.8 วัตต์ ซึ่งเป็นสภาวะที่ให้คุณภาพด้านการคืนรูปและเนื้อสัมผัสที่ดีที่สุด

งานวิจัยนี้จึงได้มุ่งเน้นการอบแห้งลูกเดี๋ยโดยใช้ลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติการคืนรูป แต่อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการให้ความร้อนร่วมด้วยคลื่นไมโครเวฟยังมีข้อเสียคือ การกระจายคลื่นที่ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งอาจส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการคืนตัว ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษากระบวนการอบแห้งในถังหมุนร่วมกับไมโครเวฟเพื่อให้เกิดความสม่ำเสมอในการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1.2.1 เพื่อศึกษา และออกแบบ สร้างเครื่องอบแห้งแบบถังหมุนร่วมกับไมโครเวฟขนาดต้นแบบ
- 1.2.2 เพื่อศึกษาหาสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับเตรียมลูกเดี๋ยหุงสุกเร็ว
- 1.2.3 เพื่อศึกษาปัจจัยการอบแห้งที่มีผลต่อคุณภาพทางกายภาพ คุณสมบัติการคืนรูปและทางเนื้อสัมผัสของลูกเดี๋ยหุงสุกเร็วหลังการคืนตัว

1.3 ขอบเขตการศึกษา

- 1.3.1 ตัวแปรควบคุม
 - 1.3.1.1 ลูกเดี๋ยพันธุ์ข้าวเหนียว
 - 1.3.1.2 ความเร็วลมของลมร้อนเท่ากับ 0.5 เมตรต่อวินาที
 - 1.3.1.3 ความชื้นเริ่มต้นของลูกเดี๋ยหลังหุงสุกเท่ากับ 50-55% ฐานเปียก
 - 1.3.1.4 ความชื้นสุดท้ายหลังการอบแห้ง ต่ำกว่า 10% ฐานเปียก

1.3.2 ตัวแปรต้น

1.3.2.1 อุณหภูมิความร้อนเท่ากับ 70 80 และ 90°C

1.3.2.2 กำลังวัตต์ของไมโครเวฟเท่ากับ 150 300 และ 450 วัตต์

1.3.2.3 ความเร็วรอบของถังหมวนเท่ากับ 10 20 และ 30 รอบต่อนาที

1.3.3 ตัวแปรตาม

1.3.3.1 คุณภาพทางกายภาพ ได้แก่ ค่าสี

1.3.3.2 คุณภาพทางด้านการคืนรูป ได้แก่ เวลาการคืนรูป และอัตราการดูดน้ำกลับ

1.3.3.3 คุณภาพทางด้านเนื้อสัมผัส

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

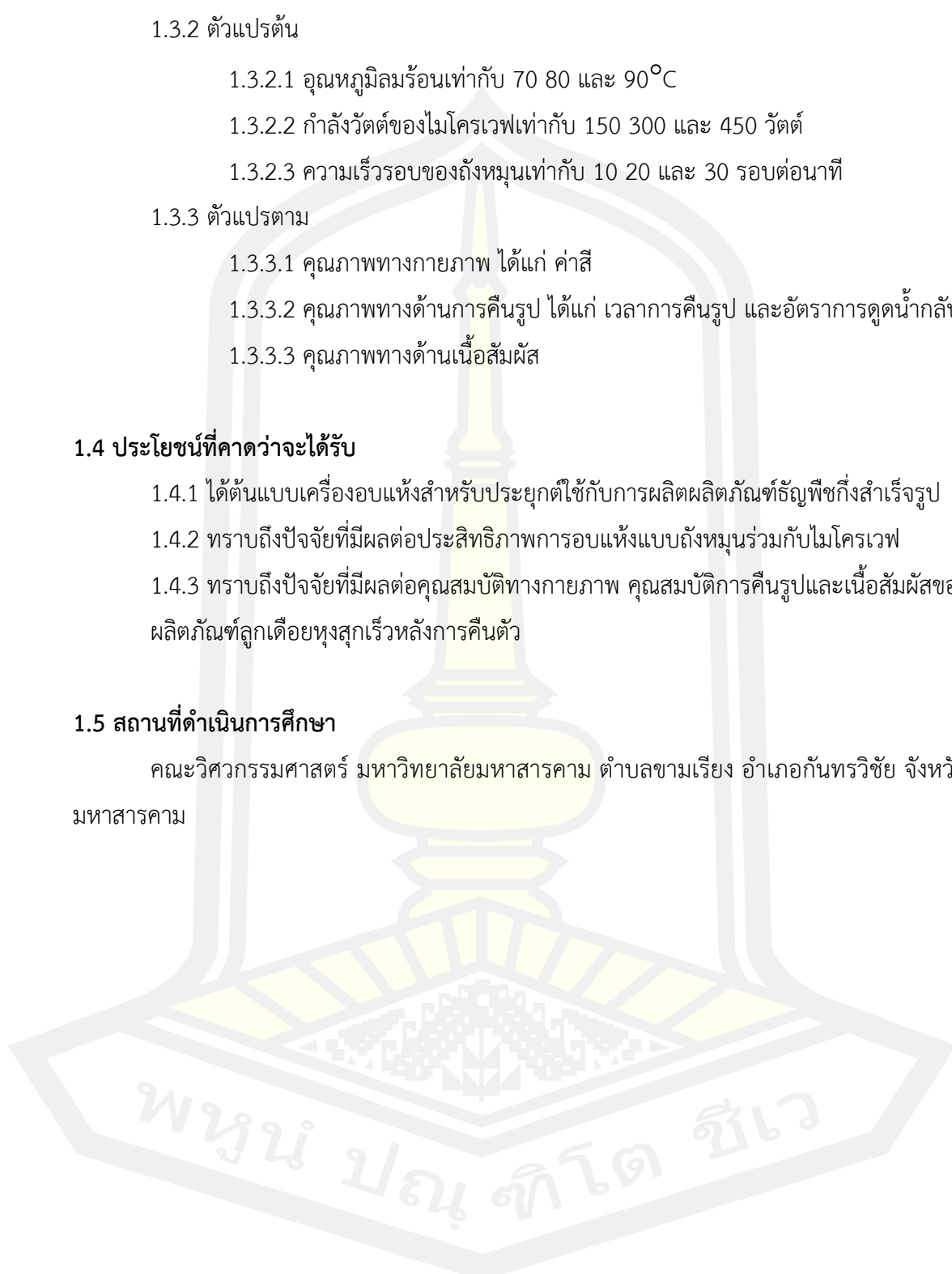
1.4.1 ได้ต้นแบบเครื่องอบแห้งสำหรับประยุกต์ใช้กับการผลิตผลิตภัณฑ์ธัญพืชสำเร็จรูป

1.4.2 ทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการอบแห้งแบบถังหมวนร่วมกับไมโครเวฟ

1.4.3 ทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติการคืนรูปและเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ลูกเต๋อยุ่สูงเร็วหลังการคืนตัว

1.5 สถานที่ดำเนินการศึกษา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ตำบลขามเรียง อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการและทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องซึ่งประกอบด้วย ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับลูกเดือย กระบวนการผลิตธัญพืชที่สำเร็จรูป ทฤษฎีการอบแห้ง ทฤษฎีการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ และ งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับลูกเดือย

ลูกเดือยเป็นธัญพืชชนิดหนึ่งในวงศ์ Gramineae/Poaceae ตระกูล Andropogoneae สกุล *Coix* มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Coix lachryma-jobi* L. var. *mayeun*. Stapf. และชื่อสามัญว่า Job's tears, coix, adlay, Chinese pearl barley และ hatomogi ซึ่งการเรียกที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับแต่ละประเทศ [10] ลูกเดือยเป็นธัญพืชที่มีแหล่งกำเนิดอยู่ในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ตามประวัติศาสตร์ของอินเดีย พบว่า ลูกเดือยเป็นธัญพืชที่ปลูกโดยชาวอารยันในแถบเทือกเขาหิมาลัย ต่อมานักเดินทางชาวอาหรับได้เดินทางไปยังดินแดนตะวันตก ส่งผลให้ลูกเดือยได้รับการเผยแพร่ไปยังประเทศในแถบยุโรป ต่อมานายพลชาวจีน พบว่า ลูกเดือยเป็นธัญพืชที่เจริญงอกงามดีจึงได้มีการนำกลับมาปลูกในประเทศจีนด้วย ส่งผลให้ลูกเดือยมีการเพาะปลูกทั้งในประเทศแถบเอเชียและยุโรป แต่โดยส่วนใหญ่นิยมเพาะปลูกในประเทศแถบเอเชียรวมทั้งประเทศไทยด้วย [11] จากข้อมูลทางพฤกษศาสตร์เรื่องวงศ์และตระกูล พบว่า ลูกเดือยมีความสัมพันธ์ใกล้เคียงกับข้าวโพดและข้าวฟ่าง [12]

นอกจากนี้จากข้อมูลทางสัณฐานวิทยาของพืชสามารถแบ่งลักษณะ *Coix lachryma-jobi* L. ออกเป็น 4 ชนิดใหญ่ๆ [13] คือ

1) *Coix lachryma-jobi* L. var. "typical" Stapf : เมล็ดมีรูปร่างกลมถึงคล้ายรูปไข่ เปลือกเมล็ดมีสีฟ้าอมขาว ผิวเมล็ดเรียบและแข็ง

2) *Coix lachryma-jobi* L. var. "stenocarpa" Stapf : เมล็ดมีรูปร่างกลมยาว เปลือกสีฟ้าอมขาว

3) *Coix lachryma-jobi* L. var. "ma-yuen" Stapf : เมล็ดมีลักษณะเป็นร่องตามแนวยาว เปลือกบางมาก มีสีขาวขุ่นถึงสีน้ำตาล สำหรับเมล็ดในสายพันธุ์นี้นิยมนำมาเพาะปลูกเพื่อนำมาบริโภค

สำหรับในประเทศไทย มีการเพาะปลูกลูกเดือย 3 ประเภท คือ ประเภทแรกเป็นลูกเดือยพันธุ์พื้นเมืองหรือลูกเดือยหิน ซึ่งประเภทนี้ไม่สามารถนำมารับประทานได้เนื่องจากภายในเมล็ดมีปริมาณของเอนโดสเปิร์ม (endosperm) น้อยและแข็ง ประเภทที่ 2 เป็นลูกเดือยเพาะปลูก ซึ่ง

เพาะปลูกมากทางภาคเหนือของประเทศไทย และนิยมรับประทานเฉพาะในท้องถิ่นเท่านั้น โดยลูกเดี่ยวประเภทนี้มีรูปร่างเมล็ดกลมและขนาดใหญ่ประมาณ 10-12 มิลลิเมตร ลักษณะเปลือกค่อนข้างแข็งและมีสีน้ำตาลเทา ลูกเดี่ยวประเภทนี้จำนำมารับประทานขณะเมล็ดอ่อน อาจนำมาต้มก่อนรับประทาน หรือรับประทานในรูปแบบสดก็ได้ ในบางครั้งลูกเดี่ยวประเภทนี้สามารถเรียกได้อีกอย่างว่า "ลูกเดี่ยวขบ" ประเภทสุดท้ายเป็นลูกเดี่ยวทางการค้า เป็นลูกเดี่ยวที่มีการเพาะปลูกอยู่ทั่วไปซึ่งจัดอยู่ในสายพันธุ์ *Coix lachryma-jobi* L. var. "ma-yuen" Stapf โดยมีลักษณะเป็นร่องตามแนวยาวคล้ายคลึงกับเมล็ดข้าวสาลี มีขนาดเมล็ดประมาณ 8-12 มิลลิเมตร ลักษณะเปลือกค่อนข้างบางมีสีตั้งแต่ขาวขุ่นจนถึงสีน้ำตาลทำให้สามารถแยกออกเป็นสายพันธุ์ต่างๆ ตามลักษณะของสีเปลือก [13] นอกจากลักษณะของสีเปลือกแล้วยังสามารถแบ่งพันธุ์ของลูกเดี่ยวทางการค้าได้ตามลักษณะรูปร่างเมล็ด ลำต้นและปริมาณอะไมโลสภายในเมล็ดได้เป็น 2 พันธุ์หลัก คือ ลูกเดี่ยวข้าวเหนียว (glutinous type) และลูกเดี่ยวข้าวเจ้า (nonglutinous type) [14] ซึ่งเมล็ดลูกเดี่ยวพันธุ์ข้าวเหนียวจะมีลักษณะกลม สั้น และมีขนาดเมล็ดใหญ่กว่าลูกเดี่ยวพันธุ์ข้าวเจ้า สำหรับเมล็ดลูกเดี่ยวสายพันธุ์ข้าวเจ้ามีลักษณะเมล็ดค่อนข้างยาวและเล็ก

ลูกเดี่ยวเป็นธัญพืชที่สามารถนำมาบริโภคได้ทั้งในรูปอาหาร และเป็นยาในการบำรุงสุขภาพ เนื่องจากลูกเดี่ยวเป็นธัญพืชที่มีคุณค่าทางด้านโภชนาการสูง โดยมีปริมาณโปรตีนและไขมันสูงกว่าธัญพืชชนิดอื่นๆ และเมื่อคิดเทียบต่อ 100 กรัม ลูกเดี่ยวสามารถให้พลังงานได้ 380 แคลลอรี่ ซึ่งในลูกเดี่ยวมีปริมาณโปรตีนประมาณ 15.4 กรัม ไขมัน 6.2 กรัม คาร์โบไฮเดรตทั้งหมด 65.3 กรัม ไฟเบอร์ 0.8 กรัม และปริมาตรน้ำ 1.9 กรัม นอกจากนี้ยังมีปริมาณฟอสฟอรัสสูงถึง 435 มิลลิกรัม เพื่อช่วยบำรุงกระดูก แคลเซียม 25 มิลลิกรัม เหล็ก 5 กรัม และยังมีวิตามินต่างๆ อาทิเช่น ไนอาซิน 4.3 มิลลิกรัม วิตามินบี 1 0.28 มิลลิกรัม ซึ่งเป็นปริมาณที่สูงกว่าในข้าวกล้อง วิตามินบี 2 0.19 มิลลิกรัม รองลงมาเป็นวิตามินเอ ช่วยบำรุงสายตา บำรุงธาตุ ใช้เป็นอาหารสำหรับคนไข้พักฟื้น ช่วยเจริญอาหาร รวมทั้งบำรุงเลือดลมในสตรีและหลังคลอด ช่วยรักษาอาการคลื่นไส้ อาเจียนและท้องร่วง [15] นอกเหนือจากนั้นในลูกเดี่ยวยังประกอบด้วยโปรตีนต่างๆ ซึ่งโปรตีนหลักในเมล็ดลูกเดี่ยวเป็นกลุ่มของโพรลามีน (prolamin) ที่เรียกว่า coixin ซึ่งมีปริมาณโปรตีนและลิซีนสูง แต่มีไลซีนในปริมาณที่ต่ำ และยังมีโปรตีนอัลบูมิน (albumin) โกลบูลิน (globulin) และอนุพันธุ์โปรตีนอื่นๆ อีก ซึ่งโปรตีนต่างๆ เหล่านี้ในลูกเดี่ยวประกอบด้วยกรดอะมิโนที่สูงเท่าความต้องการตามมาตรฐานขององค์การอนามัยโลก เช่น มีกรดกลูตามิกในปริมาณมากตามด้วยลูซีน อลานีน โพรลีน วาลีน ฟินิลอลานีน ไอโซลูซีน และอาร์จินีนลดหลั่นลงมา โดยกรดอะมิโนเหล่านี้เป็นสารสำคัญที่ช่วยให้สามารถหลับได้ง่ายขึ้น เพราะกรดอะมิโนสามารถเข้าไปกระตุ้นในเซลล์สมองหลังสารที่ทำให้เกิดการนอนหลับ [16] นอกจากนี้ในลูกเดี่ยวยังอุดมไปด้วยกรดไขมันจำเป็นชนิดที่ไม่อิ่มตัวด้วย เช่น กรดโอเลอิกและกรดลิโนเลอิก รวมแล้วมีปริมาณถึง 84% และประกอบด้วยกรดไขมันชนิดอิ่มตัว คือกรด

ปาร์มิติกและกรดสเตียริกเพียง 16% เท่านั้น [17] จากองค์ประกอบทางเคมีเกี่ยวกับสารอาหารต่าง ๆ ในลูกเต๋อยพบว่าสอดคล้องกับความเชื่อของชาวจีนและญี่ปุ่นตั้งแต่สมัยโบราณกาลที่กล่าวไว้ว่า ลูกเต๋อยเป็นอาหารเพื่อบำรุงสุขภาพ สำหรับในประเทศญี่ปุ่นมีการนำลูกเต๋อยทำเป็นเครื่องดื่มประเภท ข้าวหมักและให้ชื่อว่า dzu นำมาทำเป็นยาต้ม เป็นโจ๊ก ชาสำหรับขงคิมและใช้เป็นวัตถุดิบเพื่อหมัก สำหรับทำเป็นเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ โดยพบว่าในประเทศญี่ปุ่นมีแนวโน้มของการนำลูกเต๋อยมาผลิตเป็นอาหารประเภทอาหารเพื่อสุขภาพมากขึ้น เนื่องจากเป็นธัญพืชที่มีอัลบูมินและไขมันเป็นองค์ประกอบในปริมาณที่สูง นอกจากนี้ยังมีการนำลูกเต๋อยมาผลิตเป็นมิโซ ซึอิ้ว แครกเกอร์ ขนมปัง บิสกิต และอื่นๆ อีกมากมาย และในประเทศจีนก็มีการนำมาผลิตเป็นอาหารเพื่อสุขภาพเช่นเดียวกับ ประเทศญี่ปุ่น [18] นอกเหนือจากประเทศจีนและญี่ปุ่นแล้วในประเทศศรีลังกาก็มีการนำลูกเต๋อยมาใช้เป็นอาหารหลักแทนอาหารประเภทข้าว [13]

2.2 กระบวนการผลิตธัญพืชกึ่งสำเร็จรูป

ผลิตภัณฑ์ธัญพืชหุงสุกเร็วหรือกึ่งสำเร็จรูป มีคุณลักษณะที่สำคัญ ได้แก่

- 1) ผลิตภัณฑ์ควรแห้ง มีความชื้นประมาณ 10-12% ฐานเปียก [19]
- 2) รูปร่างเมล็ดสมบูรณ์ไม่แตกหักจนไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค
- 3) มีค่า bulk density ประมาณ 0.4-0.42 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โดยผลิตภัณฑ์ธัญพืชหุงสุกเร็วหรือกึ่งสำเร็จรูปที่มีค่า bulk density ต่ำจะมีความเป็นรูพรุนภายในมาก สามารถคืนรูปได้ดี [20]

4) ผลิตภัณฑ์ที่คืนรูปแล้ว มีเนื้อสัมผัส กลิ่น สี ใกล้เคียงกับธัญพืชที่หุงสุกด้วยวิธีธรรมดา

5) มีคุณค่าทางโภชนาการที่เหมาะสม

ลูกเต๋อยเป็นหนึ่งในธัญพืชที่นิยมบริโภคในปัจจุบันเนื่องจากประกอบด้วยคุณค่าทางโภชนาการที่สูง และมีประโยชน์ทางด้านสุขภาพมากมาย อย่างไรก็ตาม การบริโภคลูกเต๋อยยังประสบปัญหาที่สำคัญคือ การใช้เวลานานในการทำให้สุก ซึ่งโดยปกติแล้วจำเป็นต้องแช่เป็นเวลาประมาณ 4-5 ชั่วโมง ก่อนหุงสุกอีกประมาณ 45 นาที เนื่องจากลูกเต๋อยมีปริมาณอะไมโลสสูง เกิดโครงสร้างร่างแหในเม็ดแป้งที่แข็งแรง จึงมีกำลังการพองตัวต่ำ ดูดซับน้ำได้ช้าจึงส่งผลให้ใช้เวลานานในการหุงสุก [21]

โดยในปัจจุบันนี้มีวิธีการแปรรูปผลิตภัณฑ์ที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบโดยเฉพาะข้าวหุงสุกที่ใช้เวลาสั้นได้หลายวิธี เช่น กรรมวิธีการแช่น้ำ ต้ม ทำแห้ง การทำให้เมล็ดข้าวพองตัวและเกิดเจลลาตินในกรรมวิธีการอบ กรรมวิธีการให้ความร้อนแห้ง กรรมวิธีคืนรูปจากการแช่เยือกแข็ง เป็นต้น [21] เนื่องจากลูกเต๋อยเป็นธัญพืชที่ประกอบด้วยแป้งเป็นองค์ประกอบหลัก ดังนั้น จึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ลูกเต๋อยหุงสุกเร็วหรือกึ่งสำเร็จรูป ซึ่งสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

2.2.1 การแช่-ต้ม-ทำแห้ง

กระบวนการนี้เป็นขั้นตอนแรกที่ใช้ในการผลิตธัญพืชกึ่งสำเร็จรูป ตามวิธีของ Ozari-durrani (1984) [22] ซึ่งประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ การแช่ การให้ความร้อนเพื่อให้สุกและการทำแห้ง วิธีการนี้ถูกนำมาพัฒนาปรับปรุงต่อในหลายวิธี เช่น การพยายามทำให้เมล็ดธัญพืชเกิดรอยร้าวมากขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิแทรกซึมผ่านเข้าสู่เมล็ดธัญพืชได้ง่ายขึ้น ข้อดี คือ ช่วยลดเวลาในการหุงต้ม การแช่ (soaking) โดยทั่วไปการแช่จะทำให้เมล็ดธัญพืชดูดน้ำจนมีความชื้นประมาณร้อยละ 28 การที่ข้าวจะดูดซึมน้ำได้มากน้อยนั้นขึ้นอยู่กับระยะเวลาและอุณหภูมิของน้ำในการแช่ ทั้งนี้การแช่อาจแบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ การแช่โดยใช้ความร้อนและการแช่โดยไม่ใช้ความร้อน ในระหว่างการแช่อาจมีการเติมสารเคมีโดยมีจุดประสงค์ คือ เพื่อปรับโครงสร้างของโปรตีนโดยการลดหรือทำลายโครงสร้างโปรตีน เพื่อให้ข้าวดูดน้ำได้มากขึ้น สารเคมีที่นิยมใช้ได้แก่ Disodium phosphate, Sodium tripolyphosphate และ Calcium citrate ทั้งนี้ได้มีรายงานทางวิชาการสำหรับกรรมวิธีการแช่ข้าว ดังนี้

Robert และคณะ (1952) [23] ได้พัฒนากระบวนการผลิตข้าวกึ่งสำเร็จรูป โดยทำการแช่ข้าวสารในน้ำที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นจึงหุงด้วยน้ำร้อนเป็นเวลา 1-3 นาที จนกระทั่งข้าวมีความชื้นประมาณ 45-55% wb หลังจากนั้นอบแห้งที่ 200°C เพื่อต้องการลดความชื้นจากบริเวณผิวให้เร็วกว่าที่ดูดซึมจากข้างใน ทำให้เกิดลักษณะขอบแข็ง โดยใช้ระยะเวลาในการอบ 1-3 นาที เพื่อป้องกันการไหม้ของเมล็ดข้าว และขั้นตอนที่สองอบแห้งที่ 100°C จนกระทั่งความชื้นสุดท้ายเหลือ 10-15% wb ซึ่งพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้สามารถคืนรูปได้ในเวลา 5 นาที

Yasumatsu และคณะ (1971) [24] ทำการทดลองโดยใช้ข้าวสารแช่ในน้ำที่อุณหภูมิห้อง แล้วหุงข้าวด้วยการใช้น้ำที่ความดันบรรยากาศ และข้าวถูกนำมาแช่อีกครั้งที่สองในน้ำที่มีน้ำมันหอมระเหย หลังจากนั้นข้าวถูกนำมาหุงด้วยหม้อหนึ่งความดันจนกระทั่งสุกเกิดเจลที่สมบูรณ์ การใช้ น้ำมันหอมระเหยช่วยในการแยกเมล็ดข้าวออกเป็นเมล็ดหลังจากที่ผ่านการหุง เพื่อให้สะดวกในการอบแห้ง และขั้นตอนสุดท้ายนำข้าวหุงสุกไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 100°C จนกระทั่งความชื้นสุดท้ายเหลือ 8-12% wb

2.2.2 การทำให้เกิดการพองตัว (Puffing/pre-gelatinization)

หลักการของวิธีการนี้คือ การนำเมล็ดธัญพืชมาผ่านการทำให้เกิดเจลก่อน โดยการให้ความร้อนด้วยวิธีการต่าง ๆ ทำให้เมล็ดธัญพืชที่ได้นั้นมีลักษณะแข็งใสและหดตัว มีความหนาแน่นมาก หลังจากนั้นทำให้พองโดยการใช้น้ำร้อนที่อุณหภูมิสูง ธัญพืชที่ได้จึงมีเมล็ดที่ใหญ่กว่าเดิม 4 เท่า น้ำหนักเบาและมีรูพรุน ใช้เวลาในการคืนรูปเพียง 3-4 นาที โดยมีรายงานวิจัยที่ศึกษาหลักการนี้ คือ

Robert และคณะ (1955) [23] ทดลองแช่ข้าวสารจนกระทั่งมีความชื้น 30% wb หลังจากนั้นนำไปหุงด้วยไอน้ำที่ความดัน 10-15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 5-20 นาที และอบต่อในขั้นตอนที่สองที่อุณหภูมิ 70°C จนกระทั่งความชื้นสุดท้ายเหลือ 8-14% wb เมล็ดข้าวที่ได้มีลักษณะหดตัว ไส้แน่น หลังจากขั้นตอนนี้แล้วเป็นกระบวนการทำให้เมล็ดข้าวเกิดการพองตัวด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 200-250°C จากผลการทดลองพบว่า ข้าวกึ่งสำเร็จรูปที่ได้มีลักษณะการพอง ขยายตัว โครงสร้างภายในเมล็ดข้าวมีรูพรุนมาก ใช้เวลาในการคั่วสั้นลง

2.2.3 การใช้ puffing gun

เป็นวิธีการที่นิยมในกระบวนการผลิตภัณฑ์อาหารกึ่งสำเร็จรูปจากข้าวเจ้า ข้าวสาลี โดยอุปกรณ์ที่ใช้เรียกว่า puffing gun ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีลักษณะการพองตัว หลักการทำงานของ puffing gun แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ใช้ไอน้ำ (steam chamber) เมื่อวัตถุดิบผ่านเข้ามาจะมีการลดความดันเพื่อที่จะดึงอากาศออกจากวัตถุดิบก่อน ไอน้ำจะถูกส่งออกมาเพื่อทำให้ข้าวเกิดเจล จากนั้นผลิตภัณฑ์จะถูกส่งออกไปยังห้องสุญญากาศ (expansion chamber) รัญพีซที่ผ่านเข้ามาจะเกิดการขยายตัวทันที เพราะความดันลดลงอย่างรวดเร็ว ผลิตภัณฑ์รัญพีซกึ่งสำเร็จรูปที่ได้จะมีขนาดใหญ่ประมาณ 2-3 เท่า ทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสกับน้ำมากในระหว่างการคั่ว ดังนั้นรัญพีซกึ่งสำเร็จรูปที่ได้จึงคั่วได้ในระยะเวลาอันสั้น แต่ข้อเสีย คือ ลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากการไล่อากาศออกจาก expansion chamber ทำได้ไม่ทันที ในขณะที่เมล็ดรัญพีซถูกป้อนเข้า [25] หากพิจารณาข้อดีของการใช้เทคนิค puffing คือ เป็นวิธีที่ทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพดี แต่มีค่าใช้จ่ายในการผลิตค่อนข้างสูงจึงไม่เป็นที่นิยม

2.2.4 วิธีการทำแห้งสำหรับรัญพีซกึ่งสำเร็จรูป

การทำแห้งถือได้ว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์รัญพีซกึ่งสำเร็จรูป ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์โดยเฉพาะคุณภาพทางด้านเนื้อสัมผัสหลังการคั่ว โดยทั่วไปแล้วการทำแห้งรัญพีซกึ่งสำเร็จรูปอาจทำได้ 2 วิธีหลัก ๆ ได้แก่

1. การทำแห้งในขั้นตอนเดียว เป็นการทำแห้งที่ใช้ความร้อนไม่สูงมาก ประมาณ 70°C แต่ใช้เวลานานประมาณ 2-3 ชั่วโมง
2. การทำแห้งแบบหลายขั้นตอน ในขั้นตอนแรกเป็นการใช้ความร้อนสูง ภายในระยะเวลาอันสั้นเพื่อให้โครงสร้างอยู่ตัว อาจเกิด case hardening ภายในเมล็ดข้าวจะเกิดรูพรุนขนาดใหญ่ แล้วจึงตามด้วยการใช้อุณหภูมิต่ำ ซึ่งจะช่วยให้โครงสร้างอยู่ตัวโดยที่ข้าวไม่ไหม้

2.3 ทฤษฎีการอบแห้ง

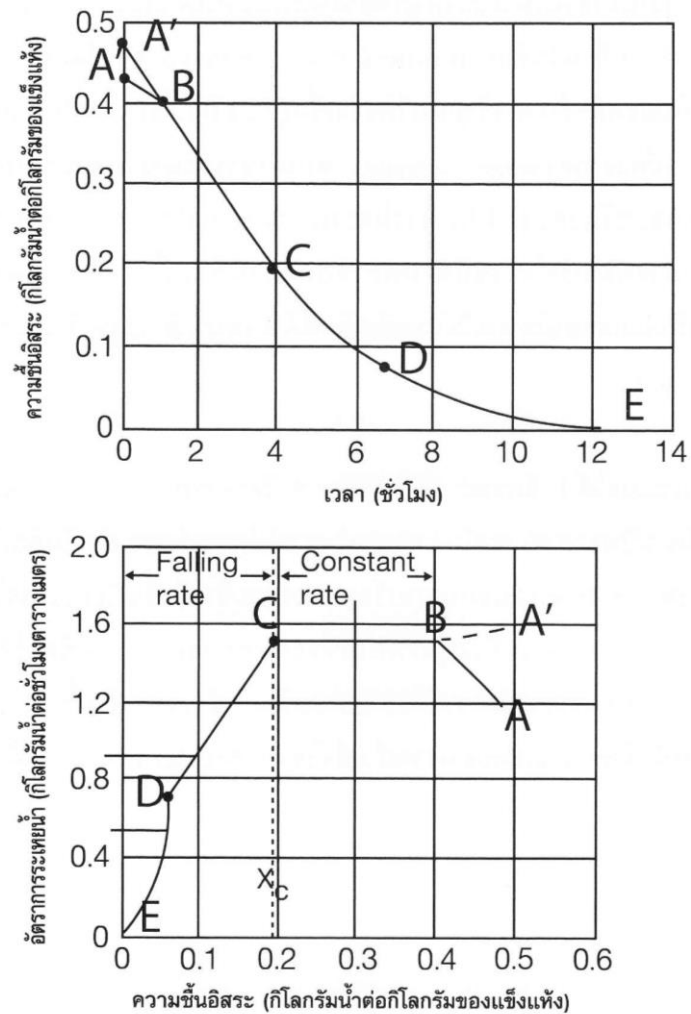
การอบแห้ง คือ กระบวนการลดความชื้นออกจากตัวอาหารหรือผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร เป็นกรรมวิธีถนอมอาหารที่รู้จักกันมาช้านาน ส่วนใหญ่ใช้ความร้อนถ่ายเทความร้อนไปยังอาหารโดยการพาความร้อน และเกิดการนำความร้อนในตัวอาหารและน้ำระเหยออกจากอาหารโดยการแพร่ของน้ำ จนมีความชื้นลดลงในระดับที่ปลอดภัยต่อการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์และการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของอาหารเกิดขึ้นน้อยมาก เนื่องจากค่าปริมาณน้ำอิสระ (water activity) ของอาหารจะน้อยลงตามความชื้นที่สูญเสียไป นอกจากนี้ ยังลดน้ำหนักและปริมาตร ทำให้อาหารมีความง่ายต่อการเก็บการบรรจุ การขนส่ง และลดต้นทุน เนื่องจากการขนส่งผลิตภัณฑ์บางชนิดในสภาพสด จะเปลืองเนื้อที่และการดูแลรักษาลำบาก นอกจากนี้ ยังสร้างความเป็นเอกลักษณ์เฉพาะให้กับผลิตภัณฑ์ด้วย [26]–[29]

การอบแห้งสามารถแบ่งได้ 2 ลักษณะ คือ การอบแห้งโดยการพาความร้อน (convective drying) ของไหลร้อนและแห้ง (ซึ่งมักเป็นอากาศ) จะเป็นตัวสำคัญในการให้ความร้อนซึ่งจำเป็นต้องใช้ในการระเหยน้ำออกจากผิวหน้าของอาหาร การอบแห้งในลักษณะนี้มีรู้จักกันในชื่อของ การอบแห้งโดยใช้ลมร้อน (hot air drying) และอีกรูปแบบ คือ การอบแห้งโดยการนำความร้อน (conductive drying) เกิดขึ้นจากอาหารสัมผัสกับผิวหน้าร้อนโดยตรง ทำให้น้ำเกิดการระเหยอย่างรวดเร็ว ซึ่งได้แก่การอบแห้งแบบลูกกลิ้ง (drum drying) [28]

กลไกการอบแห้งแบ่งออกเป็น 2 ช่วงใหญ่ๆ คือ ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (constant-rate period) และช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (falling-rate period) ดังแสดงในภาพประกอบ 1

1) ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (constant rate)

ในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ ความชื้นภายในโครงสร้างอาหารสามารถเคลื่อนที่ได้เร็วพอที่จะทำให้ผิวหน้าของอาหารยังคงอิมมิดด้วยน้ำ วัสดุมีการลดลงของความชื้นอย่างชัดเจน และอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์มีค่าคงที่และเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง อัตราการระเหยของไอน้ำที่ผิวหน้ามีค่าเท่ากับอัตราการเคลื่อนที่ของน้ำ (ของเหลว) ภายในวัสดุพอรุนที่มาเติมเต็มที่ผิวหน้า ช่วงปลายของคาบเวลานี้ ค่าความชื้นเข้าใกล้ค่าความชื้นวิกฤต (critical moisture content) ซึ่งค่าความชื้นวิกฤตนี้ก็มีค่าหลายค่า อันเนื่องมาจากความหนาของผลิตภัณฑ์ สภาวะการอบแห้ง ชนิดของโครงสร้าง การยึดเกาะของความชื้นภายในวัสดุ และความสามารถในการเคลื่อนตัวของความชื้นภายในโครงสร้างวัสดุ [29], [30]



ภาพประกอบ 1 อัตราการอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่และอัตราการอบแห้งลดลง
ที่มา: Okos et al. (2007) [31]

2) ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (falling rate)

การอบแห้งที่วัสดุความชื้นน้อยกว่าความชื้นวิกฤต การอบแห้งเข้าสู่ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ดังแสดงในภาพประกอบ 1 โดยช่วงเวลานี้ใช้เวลามากกว่าช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ [32]

การถ่ายเทความร้อนและมวลนั้น ไม่ได้เกิดขึ้นเฉพาะที่ผิววัสดุเท่านั้น แต่เกิดภายในเนื้อวัสดุด้วย อัตราการเคลื่อนที่ของน้ำภายในโครงสร้างมีค่าน้อยกว่าอัตราการระเหยของน้ำที่ผิวหน้า ความชื้นในวัสดุที่เคลื่อนตัวไปยังผิวหน้าภายใต้อิทธิพลการแพร่กระจายตัวของความชื้นจากภายใน วัสดุสู่ผิววัสดุ อุณหภูมิของวัสดุเริ่มสูงกว่าอุณหภูมิกระเปาะเปียก การแพร่ของความชื้นจากภายใน โครงสร้างวัสดุจะเป็นปัจจัยควบคุมอัตราการอบแห้ง [26], [29], [30]

2.4 ทฤษฎีการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ

ไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจึงทำให้เกิดความร้อนในอาหารได้อย่างรวดเร็ว ใช้เวลานั้นประหยัดเวลา ดังนั้นจึงสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตได้มากยิ่งขึ้น อุณหภูมิสูงขึ้นได้อย่างรวดเร็วในเวลาสั้น ทำให้สามารถรักษาคุณภาพด้านสี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัสได้ดีกว่าวิธีการใช้ความร้อนแบบดั้งเดิม การสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการต่ำกว่าวิธีดั้งเดิม ประหยัดพลังงาน ควบคุมได้ง่าย ปลอดภัย ตัวเครื่องมีขนาดเล็กและเบา ยืดอายุผลิตภัณฑ์ได้ยาวนานขึ้น ใช้กับผลิตภัณฑ์ได้หลากหลาย และสามารถสร้างเครื่องมือได้เองภายในประเทศ [33]

การใช้คลื่นไมโครเวฟในการแปรรูปอาหารถือเป็นเทคโนโลยีที่ทันสมัย ในต่างประเทศได้ประยุกต์ใช้ไมโครเวฟในกระบวนการให้ความร้อนในอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย เช่น เกษตร อาหาร ยางพารา สิ่งทอ ไม้ กระดาษ พลาสติก อีกทั้งในวงการแพทย์ และเคมี อย่างไรก็ตาม สำหรับในประเทศไทย นิยมใช้ไมโครเวฟภายในครัวเรือน และร้านค้าบริหารอาหารเท่านั้น การนำเทคโนโลยีดังกล่าวไปประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมยังไม่แพร่หลาย เนื่องจากเตาไมโครเวฟอุตสาหกรรมนี้ยังคงมีราคาสูง ประกอบกับการวิจัยในสาขานี้ยังมีอยู่น้อยและมีความซับซ้อนสูง การนำคลื่นไมโครเวฟมาใช้ในการแปรรูปอาหาร ผู้ปฏิบัติต้องมีความเข้าใจเกี่ยวกับอาหาร เครื่องจักร กระบวนการผลิต และบรรจุภัณฑ์ รวมถึงอันตรายกึ่งระหว่างไมโครเวฟและอาหารอย่างลึกซึ้ง นอกจากนี้ยังต้องตรวจสอบการรั่วไหลของคลื่นไมโครเวฟ เพื่อความปลอดภัยต่อผู้ใช้งาน และควบคุมการส่งกำลังไมโครเวฟภายในระบบที่ได้พัฒนาขึ้น [32], [34]

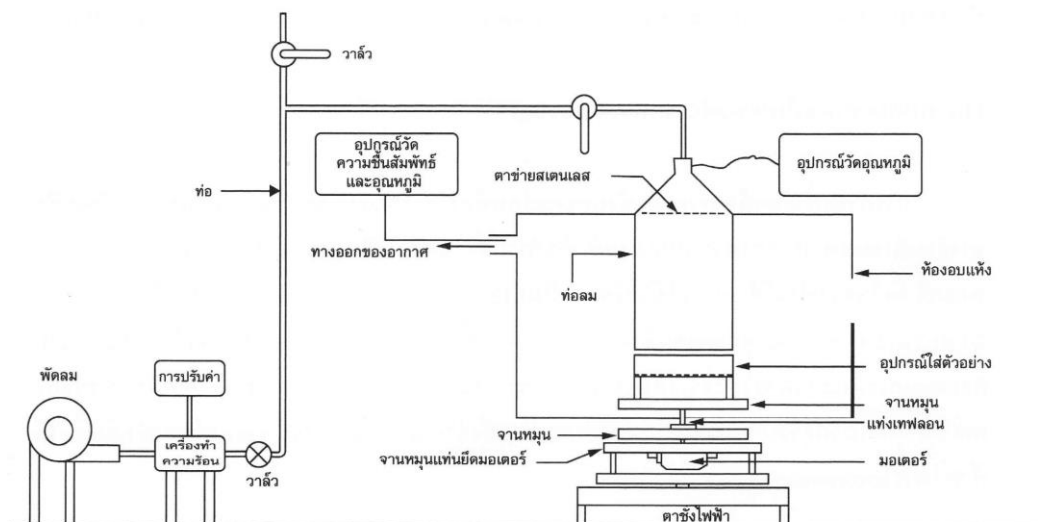
ในอุตสาหกรรมอาหารสามารถนำไมโครเวฟมาใช้ในการบวนการต่างๆ ได้หลายกระบวนการ ได้แก่ การลวก (blanching) การทำให้สุก (cooking) การทำแห้ง (drying) การพาสเจอร์ไรส์ (pasteurizing) การสเตอริไลส์ (sterilizing) การละลายน้ำแข็ง (thawing) การอบ (baking) การทำพอง (puffing) รวมทั้งกระบวนการอื่นๆ เนื่องจากข้อได้เปรียบในเรื่องการเกิดความร้อนในอัตราที่รวดเร็ว สามารถประหยัดพลังงานได้มาก และสามารถคงคุณค่าทางโภชนาการไว้ได้สูง [35] และสูญเสียคุณภาพด้านต่าง ๆ เช่น กลิ่นรส สี เนื้อสัมผัส และคุณค่าทางโภชนาการน้อยกว่าการให้ความร้อนแบบดั้งเดิม ในปัจจุบันนี้ เนื่องจากกระแสความต้องการของผู้บริโภคทางด้านอาหารได้มีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม โดยผู้บริโภคต้องการอาหารที่มีคุณภาพที่ใกล้เคียงกับของสด คุณภาพสูง สะดวกสบาย และรวดเร็วในการเตรียม อีกทั้งมีอายุการเก็บรักษาอย่างเพียงพอและต้องปลอดภัยในการบริโภค จึงทำให้มีการศึกษาวิจัยการใช้ไมโครเวฟในกระบวนการแปรรูปอาหารมากขึ้น

2.4.1 การอบแห้งด้วยไมโครเวฟ (microwave drying)

การกำจัดน้ำออกด้วยการอบแห้งแบบลมร้อนซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายนั้น มีผลเสียทางด้านลักษณะทางกายภาพและทางประสาทสัมผัส อันเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างและปฏิกิริยาทางเคมีซึ่งไม่อาจเลี่ยงได้ แต่การใช้ไมโครเวฟในกระบวนการอบแห้งนั้น อัตราการอบแห้งมีค่ามากขึ้น ปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์สุดท้าย การหดตัวเกิดขึ้นน้อยมารวมทั้งอาจพองตัวได้อันเนื่องจากกระบวนการอบแห้งด้วยไมโครเวฟสามารถเร่งกระบวนการแพร่ของน้ำในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง เพราะน้ำภายในวัสดุจะเกิดแรงดันไอได้ดีกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน (เนื่องจากอุณหภูมิของน้ำเพิ่มขึ้นได้เร็วกว่า) [35]

ยังมีนักวิทยาศาสตร์นำหลักการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟมาใช้ในกระบวนการอบแห้งด้วยลมร้อน ในผลิตภัณฑ์จำพวกผักและผลไม้ (ดังตัวอย่างในภาพประกอบ 2) ซึ่งจะใช้เวลาในการอบแห้งที่ยาวนานสำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อน แต่หากนำคลื่นไมโครเวฟมาช่วยเพิ่มอัตราการอบแห้งในช่วงปลายของการอบแห้ง หรือช่วงอัตราการอบแห้งลดลง จะสามารถช่วยย่นระยะเวลาของการอบแห้งลงได้ อีกทั้งยังช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดน้ำกลับภายหลังจากการอบแห้ง และการหดตัวของผลิตภัณฑ์ลดลงด้วย นอกจากนี้ยังมีนักวิจัยอีกกลุ่มหนึ่งที่ประยุกต์ใช้คลื่นไมโครเวฟมาช่วยในกระบวนการอบแห้งร่วมกับกระบวนการอื่นๆ เพื่อเพิ่มคุณภาพและมูลค่าของผลิตภัณฑ์ เช่นการใช้คลื่นไมโครเวฟร่วมกับการอบแห้งด้วยสถานะสุญญากาศ หรือการใช้คลื่นไมโครเวฟร่วมกับการอบแห้งในสถานะเยือกแข็งสุญญากาศ (microwave freeze drying) [35] ซึ่งกล่าวในรายละเอียดในส่วนถัดไป

กระบวนการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟประกอบด้วย 3 ช่วง คือ (1) ช่วงเกิดความร้อน ซึ่งพลังงานไมโครเวฟถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนภายในวัสดุขึ้น และทำให้อุณหภูมิของวัสดุขึ้นเพิ่มสูงขึ้นตามระยะเวลาที่ผ่านมา เมื่อความดันไอน้ำของวัสดุสูงกว่าความดันของสิ่งแวดล้อม ณ ขณะนั้น วัสดุจึงเริ่มเกิดการสูญเสียความชื้นขึ้นไปอัตราที่น้อย (2) ช่วงอัตราการอบแห้งในอัตราคงที่ เมื่ออุณหภูมิของวัสดุเริ่มสูงขึ้นอย่างคงที่ พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจะถูกใช้เพื่อการระเหยของความชื้น (3) ช่วงอัตราการอบแห้งน้อยลงเกิดขึ้นเมื่อพลังงานที่ใช้ในการระเหยของความชื้นน้อยกว่าพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้น อุณหภูมิบางตำแหน่งของวัสดุจะเพิ่มขึ้นสูงกว่าจุดเดือดของน้ำ และทำให้เกิดความร้อนที่มากเกินไป [36] การอบแห้งด้วยไมโครเวฟทำให้อัตราการแพร่ของน้ำเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการเกิดความร้อนที่มากภายในวัสดุ ลดระยะเวลาการอบแห้ง เนื่องจากผิวของวัสดุจะมีปริมาณความชื้นแพร่ไปมากกว่าการอบแห้งแบบปกติ ทำให้ลดการใช้พลังงานในการอบแห้ง [37]



ภาพประกอบ 2 ระบบการอบแห้งด้วยไมโครเวฟเพื่อใช้ในการศึกษาต่าง ๆ

ที่มา : Zhang et al. (2006) [36]

2.4.2 ข้อจำกัดของการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ

มีข้อจำกัดมากมายเกี่ยวกับการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ ถึงแม้ว่ามีอัตราการอบแห้งที่รวดเร็ว นั่นคือ ความไม่สม่ำเสมอของอุณหภูมิหรือความชื้นของผลิตภัณฑ์ในระหว่างการอบแห้ง อันเนื่องมาจากความไม่สม่ำเสมอของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า อุณหภูมิของวัสดุบริเวณผิวหน้าหรือส่วนขอบจะร้อนเร็วมาก จึงเกิดการไหม้ อาจทำลายกลิ่นรสของผลิตภัณฑ์สุดท้ายได้ และผลิตภัณฑ์อาจเกิดการสูญเสียคุณภาพทางประสาทสัมผัส ในบางกรณี ทำให้เกิดลักษณะ puffing หรือการพองตัวของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นวัสดุหรืออาหารควรมีการเคลื่อนที่เพื่อป้องกันการเกิดบริเวณที่ร้อนมากจนเกินไป นอกจากนี้การออกแบบเครื่อง ไม่เพียงแต่ออกแบบเพื่อคงคุณภาพของผลิตภัณฑ์เท่านั้น แต่ยังต้องพิจารณาถึงการสะท้อนกลับของคลื่นไมโครเวฟสู่แมกนีตรอน ซึ่งทำให้แมกนีตรอนเสื่อมประสิทธิภาพ [35], [36]

2.4.3 การใช้พลังงานไมโครเวฟร่วมในการอบแห้งด้วยลมร้อน

การใช้พลังงานไมโครเวฟร่วมในการอบแห้งด้วยลมร้อน มีการใช้อยู่ 3 แนวทาง ซึ่งประกอบด้วย

1. การใช้พลังงานไมโครเวฟ ณ จุดเริ่มต้นของการระเหยน้ำภายในวัสดุ ซึ่งภายในวัสดุจะมีความร้อนสูงอย่างรวดเร็วจนน้ำสามารถระเหยเป็นไอได้อย่างรวดเร็ว ไอน้ำจะถูกดันออกจากภายนอกทำให้เกิดการระเหยน้ำที่ผิวของวัสดุ อัตราการอบแห้งสูงขึ้นทำให้เกิด

โครงสร้างที่เป็นรูพรุนภายในวัสดุ ซึ่งส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของน้ำออกสู่ภายนอกหรือวัสดุสามารถดูดซับน้ำได้ดีในระหว่างการคืนรูป

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 MHz จึงเป็นการประหยัดทั้งพลังงาน ค่าดำเนินการ และค่าบำรุงรักษา นอกจากนี้ยังเป็นที่ยอมรับให้ใช้ได้ ในผลิตภัณฑ์ทางด้านชีวภาพที่สามารถลดการปนเปื้อนอนุภาคขนาดเล็กและแมลงที่ติดมาได้เป็นอย่างดี [32]

สิริชัย และคณะ (2554) [38] ได้ศึกษาการอบแห้งของเส้นก๋วยเตี๋ยวด้วยเครื่องไมโครเวฟแบบสายพาน พบว่า อัตราการอบแห้งด้วยไมโครเวฟมีค่าสูงกว่าการอบแห้งด้วยการอบแห้งแบบถาดมาก เนื่องจากการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟนั้น คลื่นไมโครเวฟจะทำให้โมเลกุลของน้ำสั่น เกิดความร้อนและระเหยตัวในทุกจุดของเส้นก๋วยเตี๋ยว แตกต่างจากการอบแห้งด้วยลมร้อนที่ต้องอาศัยการแพร่ของน้ำภายในอาหารขึ้นจนถึงผิวหน้าแล้วจึงระเหยออกไป

เมื่อเปรียบเทียบกับ การอบแห้งลำไยด้วยวิธีใช้ลมร้อนและการใช้คลื่นไมโครเวฟด้วยระบบต่อเนื่องโดยใช้ความเร็วสายพาน 0.02 m/s 1000 วัตต์ ทำแห้งจนความชื้นลดลงต่ำกว่า 18% ฐานเปียก และค่าปริมาณน้ำอิสระไม่เกิน 0.6 พบว่าสามารถลดระยะเวลาลง 65.4% พลังงานและต้นทุนลดลง 88.5% เมื่อเปรียบเทียบกับ การอบแห้งด้วยลมร้อนโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบถาด อบแห้งที่อุณหภูมิ 60°C [39]

สิริชัย และคณะ (2553) [40] ได้ทำการอบแห้งกล้วยและขนุนโดยพบว่าใช้เวลาประมาณ 38 นาทีซึ่งการอบแห้งกล้วยด้วยไมโครเวฟใช้ระยะเวลาเร็วกว่าการอบแห้งด้วยวิธีการอบลมร้อนถึง 15 เท่า ส่วนขนุนใช้เวลาเร็วกว่าถึง 21 เท่า และสีของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการอบแห้งจากทั้งสองวิธีนั้นส่วนมากไม่แตกต่างกัน นอกจากนั้น สิริชัย และคณะ (2553) [41] ยังได้ศึกษาการอบแห้งเครื่องต้มยำ ได้แก่ ตะไคร้ ใบมะกรูด เห็ด พริกชี้หนู และข่า ซึ่งเวลาที่ใช้ในการอบแห้งนั้นมีความน้อยกว่าการอบด้วยตู้อบลมร้อนประมาณ 10-12 เท่า เมื่อนำไปต้มเครื่องต้มยำที่อบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟจะมีลักษณะทางประสาทสัมผัส และความสามารถในการดูดน้ำกลับที่ดีกว่า และค่าสีของผลิตภัณฑ์ที่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งไมโครเวฟแบบสายพานไหลต่อเนื่อง มีค่าไม่แตกต่างกันกับการอบแห้งแบบปกติตลอดอายุการเก็บรักษา

สิริชัย และคณะ (2554) [42] พบว่า การอบแห้งกุ้งด้วยลมร้อนทำให้ได้กุ้งแห้งที่ได้มีลักษณะแห้งแข็ง เนื้อเหนียว และไม่สามารถดูดน้ำกลับเมื่อนำกุ้งไปคืนรูป ดังนั้นจึงต้องมีการปฏิบัติต่อกุ้งโดยการเจาะรูจำนวนมากที่ตัวกุ้งและจุ่มในน้ำสัปปะรดดิบเพื่อให้เอนไซม์บรอมีเลนย่อยโปรตีนบางส่วนในกุ้ง การอบแห้งกุ้งด้วยไมโครเวฟแบบสายพานไหลต่อเนื่องลดการใช้พลังงาน ลดระยะเวลา และลดค่าใช้จ่าย เมื่อเปรียบเทียบคุณภาพทางด้านประสาทสัมผัส พบว่าทั้งการอบแห้งกุ้งด้วยเครื่องไมโครเวฟแบบสายพานไหลต่อเนื่องและการอบแห้งแบบลมร้อนไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

อย่างไรก็ตาม การอบแห้งด้วยไมโครเวฟในบางผลิตภัณฑ์ยังมีข้อจำกัดอยู่บ้าง สิริชัย และคณะ (2553) [43] พบว่าการอบแห้งด้วยไมโครเวฟกับมะพร้าวชิ้นเล็ก มีคุณภาพของสีที่ด้อยกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน ซึ่งเกิดจากการที่มีรอยไหม้ แต่ในทางตรงข้าม เมื่อหั่นมะพร้าวให้หนาขึ้นกลับไม่พบปัญหาการไหม้ที่ชิ้นเนื้อมะพร้าวเมื่อผ่านคลื่นไมโครเวฟ ขณะเดียวกันเมื่อใช้ไมโครเวฟในการทำแห้งมะพร้าวชิ้นจะเร็วกว่าการทำแห้งแบบถาด 1.34 เท่า

2.4.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้คลื่นไมโครเวฟร่วมกับระบบการอบแห้งชนิดอื่น ๆ

จากข้อดีและข้อจำกัดของการอบแห้งด้วยไมโครเวฟ จึงมีการใช้คลื่นไมโครเวฟร่วมกับระบบอบแห้งแบบอื่น ๆ เพื่อพัฒนาศักยภาพของการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยคำนึงถึงความเหมาะสมในการอบแห้ง คุณภาพของผลิตภัณฑ์ และการประหยัดพลังงาน เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่มีผลิตภัณฑ์ที่มีค่าต่อเศรษฐกิจ และปรับปรุงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการและลดข้อจำกัดของพลังงานไมโครเวฟโดยใช้ระบบอื่นร่วม [32]

1) ระบบอบแห้งสุญญากาศร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ

การใช้ระบบอบแห้งสุญญากาศร่วมกับคลื่นไมโครเวฟเพื่อลดปัญหาการเสื่อมคุณภาพทางกายภาพ เช่น การไหม้ หรือเกิดสีเข้มอันไม่พึงประสงค์ หรือแม้แต่ปัญหาการ

กระจายตัวของการเกิดความร้อนเนื่องจากการใช้ระบบสุญญากาศ ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของไอน้ำจำนวนมากที่ผิวหน้าของอาหารเพิ่มมากขึ้น [44]

การอบแห้งด้วยระบบสุญญากาศร่วมกับคลื่นไมโครเวฟลดระยะเวลาการอบแห้งใบมีน็ดลงอย่างมาก อีกทั้งค่าความสว่าง ค่าสีเขียว และค่าสีเหลืองมีค่ามากกว่าการอบแห้งแบบปกติ ค่าการดูดซึมน้ำกลับของใบมีน็ดที่ผ่านการอบแห้งด้วยระบบสุญญากาศร่วมกับคลื่นไมโครเวฟมีค่าสูงกว่าการอบแห้งแบบปกติ นอกจากนี้ยังพบว่า การอบแห้งใบมีน็ดด้วยระบบดังกล่าวทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีปริมาณรุกรุนมากกว่า [45]

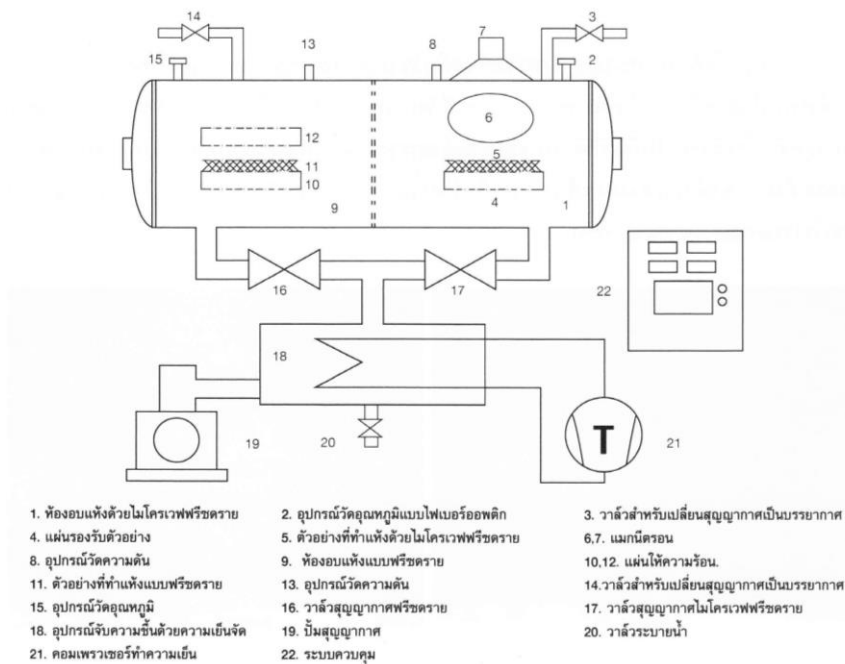
2) ระบบอบแห้งแช่เยือกแข็งร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ

การอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งด้วยคลื่นไมโครเวฟ (microwave-freeze drying) ดังภาพประกอบ 3 เป็นกระบวนการอบแห้งอาหารที่อยู่ในสถานะเยือกแข็ง ทำให้ผลิตภัณฑ์มีโครงสร้างแข็งแรงไม่หืดตัว และมีปริมาณรุกรุนสูง ทำให้มีคุณสมบัติการดูดคืนน้ำกลับที่ดี และใกล้เคียงกับวัตถุดิบสดก่อนการอบแห้ง การใช้คลื่นไมโครเวฟสามารถช่วยลดระยะเวลาการระเหยน้ำและช่วยคงปริมาณสารอาหารได้ไม่แตกต่างจากการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งแบบปกติ ปัญหาหลักของการอบแห้งแบบนี้คือมีระยะเวลาการอบแห้งที่นาน ซึ่งต้องใช้พลังงานสูง อีกทั้งมีอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำ ซึ่งการใช้คลื่นไมโครเวฟร่วมในระบบการอบแห้งนี้ทำให้อัตราการให้ความร้อนเพิ่มขึ้น อบแห้งได้รวดเร็วขึ้นอย่างมาก [44], [46]

จากการเปรียบเทียบการอบแห้งมันฝรั่งที่ผ่านและไม่ผ่านการลวกแบบแช่เยือกแข็งอย่างเดี่ยวและร่วมกันคลื่นไมโครเวฟ พบว่า การอบแห้งโดยใช้คลื่นไมโครเวฟร่วมทำให้ระยะเวลาการอบแห้งลดลง 37% เมื่อการอบแห้งร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ ตัวอย่างที่ผ่านการลวกมีอัตราการอบแห้งที่น้อยกว่าตัวอย่างที่ไม่ผ่านการลวก เนื่องจากสมบัติไดอิเล็กทริกของตัวอย่างมันฝรั่งเปลี่ยนแปลงไปในระหว่างการลวก มีการสูญเสียองค์ประกอบของเคมี และเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างอันเนื่องจากการเกิดเจลลิตีโนเซชันของสตาร์ช อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบผลการใช้ไมโครเวฟร่วม กลับพบว่าปริมาณวิตามินซี น้ำตาลรีดิวซ์ (reducing sugar) ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด และปริมาณสตาร์ชไม่แตกต่างกัน [46]

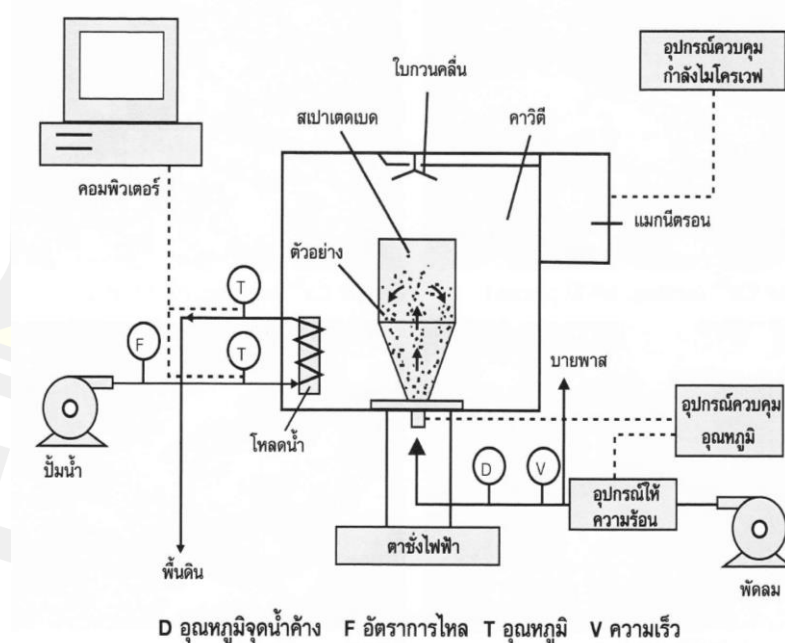
3) การอบแห้งแบบ spouted bed ร่วมกับไมโครเวฟ

จากข้อจำกัดในการอบแห้งด้วยไมโครเวฟในเรื่องความไม่สม่ำเสมอของความร้อนและความชื้นในระหว่างการอบแห้ง ระบบการแห้งนี้ทำให้วัสดุเกิดการเคลื่อนที่ไปยังทุกส่วนของคาวิตี (cavity) จากลมร้อนด้านล่าง ทำให้เกิดการผสมและกระจายตัวได้ดี ดังแสดงในภาพประกอบ 4 ทำให้อัตราการอบแห้งรวดเร็วขึ้นและช่วยปรับปรุงคุณภาพสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ [36], [44]



ภาพประกอบ 3 แผนผังการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ

ที่มา: Wang et al. (2010) [46]



ภาพประกอบ 4 ระบบการอบแห้งแบบสเปาเตตเบตร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ

ที่มา: Zhang et al. (2006) [36]

การอบแห้งด้วยระบบสเปาเตดเบตร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ ทำให้ parboiled wheat และ parboiled bulgar มีโครงสร้างความเป็นรูพรุนเพิ่มมากขึ้น และความเป็นทรงกลมเพิ่มมากขึ้น แต่ความหนาแน่นปรากฏลดลง เมื่อเทียบกับการไมใช้คลื่นไมโครเวฟ [47]

โดยทั่วไป สมบัติทางกายภาพของ parboiled wheat อบแห้งที่สภาวะอุณหภูมิสูงหรือใช้กำลังคลื่นไมโครเวฟมีความแตกต่างไปจากการอบแห้งแบบไมใช้คลื่นไมโครเวฟ อีกทั้งลดระยะเวลาการอบแห้งอย่างมาก แต่อย่างไรก็ตามต้องพิจารณาถึง %yield ของข้าวด้วย เนื่องจากปริมาณรูพรุนที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้ความแข็งแรงของตัวอย่างข้าวมีน้อยลง และแตกง่ายในระหว่างการสี และการอบแห้งร่วมกับคลื่นไมโครเวฟทำให้เกิดปริมาณรูพรุนและการเสียดสภาพของโปรตีน และเกิดเป็นโครงสร้างเหมือนรังผึ้ง [47]

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการแปรรูปลูกเต๋อยหุงสุกเร็วหรือกึ่งสำเร็จรูป

Arlai and Kietbunsri (2017) [48] ได้ศึกษาการลดเวลาหุงสุกของลูกเต๋อยโดยใช้เทคนิคการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟภายใต้สภาวะสุญญากาศ โดยศึกษาปัจจัยเวลาการแช่ (6 และ 7 ชั่วโมง) เวลาการหุงสุกด้วยไอน้ำ 100°C (20 และ 30 นาที) และเปอร์เซ็นต์การใช้กำลังคลื่นไมโครเวฟ 60-100% จากผลการทดลองพบว่าการเพิ่มเวลาการแช่และเวลาการหุงสุกส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การดูดน้ำกลับและเวลาการคั้นรูปลดลง ในขณะที่การเพิ่มกำลังคลื่นไมโครเวฟไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญ การเพิ่มระดับของปัจจัยทั้งสามส่งผลให้ค่าความสว่างมีค่าสูงขึ้นและทำให้โครงสร้างภายในมีลักษณะความเป็นรูพรุนมากขึ้น ดังนั้น จึงสามารถสรุปได้ว่าสภาวะการแปรรูปลูกเต๋อยหุงสุกเร็วที่เหมาะสมที่สุดเมื่อพิจารณาจากผลการทดลองดังกล่าวประกอบด้วย เวลาแช่ 7 ชั่วโมง เวลาการหุงสุกด้วยไอน้ำ 30 นาที และใช้กำลังคลื่นไมโครเวฟ 80% ซึ่งสภาวะดังกล่าวนี้สามารถลดเวลาในการหุงสุกได้ถึง 53.3%

Bunthawong and Jomduang (2016) [49] ได้ศึกษาหาอุณหภูมิและความชื้นที่เหมาะสมก่อนการแปรรูปลูกเต๋อยพองตัวด้วยไมโครเวฟ โดยแช่ลูกเต๋อยเป็นเวลา 1 คืน จากนั้นหุงสุกด้วยหม้อต้มไอน้ำที่ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 20 นาที ก่อนจะนำไปอบแห้งแบบถาดที่อุณหภูมิแตกต่างกัน (60-100°C) หลังจากการพองตัวด้วยไมโครเวฟที่กำลังวัตต์เท่ากับ 800 วัตต์พบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ได้ความชื้นประมาณ 10% wb ผลิตภัณฑ์ลูกเต๋อยพองตัวมีอัตราส่วนการพองตัวมากที่สุด

นอกจากนั้น Jomduang and Bunthawong (2018) [50] ยังได้ศึกษาหาสภาวะการเตรียมลูกเต๋อยที่เหมาะสมก่อนการแปรรูปลูกเต๋อยพองตัวด้วยไมโครเวฟ จากการศึกษาพบว่า การแช่ลูก

เดียวที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 10 ชั่วโมง เหมาะสมที่สุด ในขณะที่เวลาการหุงสุกด้วยหม้อต้มไอน้ำที่ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว คือ 20 นาที

ศิริญา และ ดวงใจ (2557) [51] ได้ศึกษาผลของระยะเวลาการแช่น้ำ และเครื่องอบแห้งต่อคุณภาพของลูกเด็ยหุงสุกเร็ว โดยแปรระยะเวลาการแช่น้ำลูกเด็ย (1-7 ชั่วโมง) และวิธีการอบแห้ง 2 วิธี คือ การอบแห้งด้วยลมร้อน 80°C และเครื่องอบแห้งแบบไมโครเวฟสุญญากาศ (4,800 วัตต์) จากผลการทดลองพบว่า การแช่น้ำเป็นเวลา 7 ชั่วโมง และอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟภายใต้สุญญากาศเหมาะสมที่สุด โดยใช้เวลาในการต้มสุกเพียง 18 นาที

2.6 วิธีพื้นผิวตอบสนอง

วิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology หรือ RSM) เป็นวิธีการทางคณิตศาสตร์หรือสถิติที่เป็นประโยชน์ในการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ปัญหา ซึ่งแสดงผลตอบสนองต่อผลจากตัวแปรต่าง ๆ เพื่อที่จะได้ค่าที่ดีที่สุดหรือเหมาะสมที่สุดต่อผลนั้น โดยส่วนใหญ่วิธีพื้นผิวตอบสนองจะแสดงผลในรูปของกราฟ อาจจะมีพล็อตเป็นโครงร่างของพื้นผิวตอบสนอง โดยปัญหาส่วนใหญ่จะไม่ทราบความสัมพันธ์ระหว่างพื้นผิวตอบสนองกับตัวแปรอิสระ

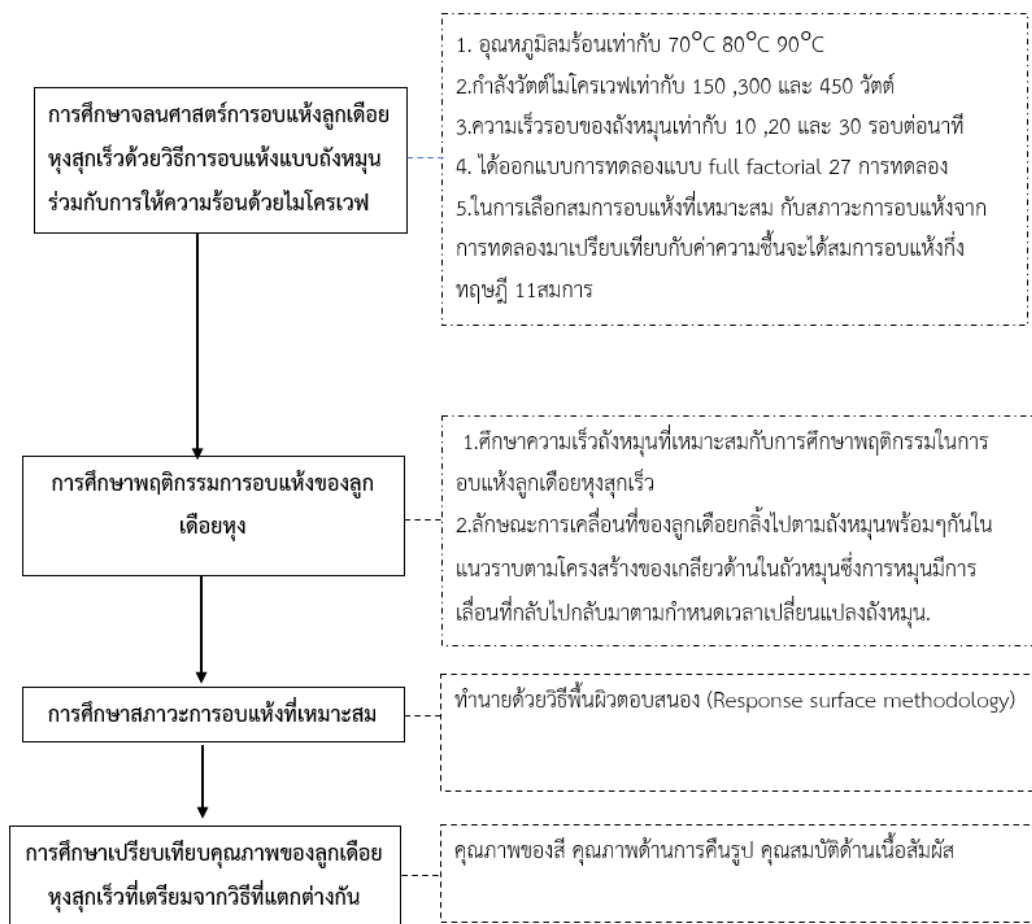
RSM เป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพกับกระบวนการที่มีความซับซ้อน จึงทำให้ง่ายในการจัดการและอธิบายผลเมื่อเทียบกับวิธีการอื่น การออกแบบการทดลองที่ส่วนใหญ่นิยมใช้จะเป็นการออกแบบการทดลองเพื่อหารูปแบบของสมการอันดับสอง โดยจะเน้นไปที่การสร้างแบบจำลองควอดราติก (Quadratic) ของผลตอบสนอง

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 วิทยานิพนธ์นี้ได้แบ่งวิธีการดำเนินการศึกษา 4 ขั้นตอน โดยแสดงแผนผัง ภาพรวมดังภาพประกอบ 5 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้



ภาพประกอบ 5 ภาพรวมของขั้นตอนการศึกษา

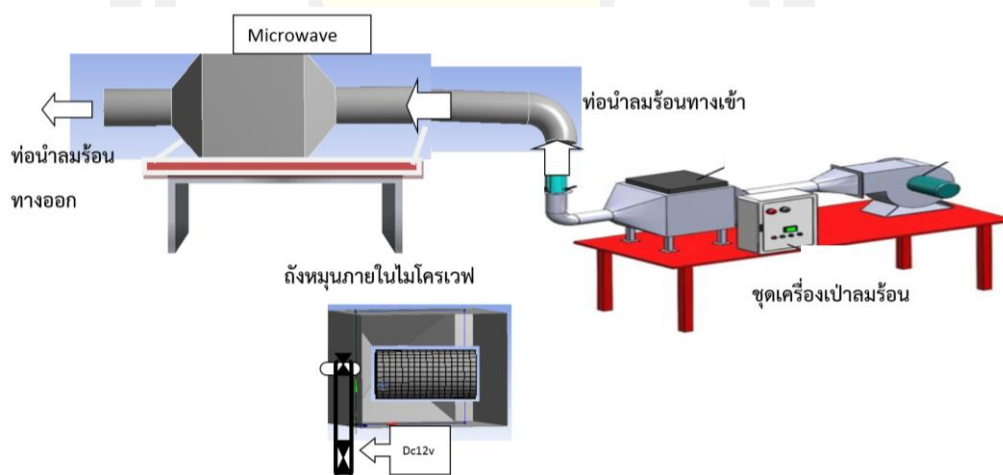
3.1 วิธีการเตรียมตัวอย่าง

- 3.1.1 ลูกเต๋ายที่ใช้ในการทดลองเป็นลูกเต๋ายพ่นรูข้าวเหนียว มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 12-13% wb
- 3.1.2 คัดเลือกเฉพาะเมล็ดที่สมบูรณ์และมีขนาดใกล้เคียงกัน
- 3.1.3 นำลูกเต๋าย 100 กรัม แช่น้ำที่อุณหภูมิห้องด้วยอัตราส่วนลูกเต๋ายต่อน้ำเท่ากับ 1 ต่อ 3 โดยน้ำหนัก ใช้เวลาในการแช่ 2 ชั่วโมง ทิ้งให้สะเด็ดน้ำ จากนั้นวิเคราะห์ค่าความชื้น (% wb)
- 3.1.4 ล้างน้ำเจลเมือก ออกแล้ว ตากด้วยผ้าฝ้าย เป็นเวลา 1 นาที
- 3.1.5 นำลูกเต๋ายที่ผ่านการแช่แล้วต้มที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 45 นาที
- 3.1.6 นำมาล้างด้วยน้ำเปล่า จำนวน 3 น้ำ และตากด้วยผ้าฝ้ายเป็นเวลา 1 นาที
- 3.1.7 นำลูกเต๋ายหุงสุก 200 กรัม เตรียมทดลองอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถึงหมุนร่วมกับไมโครเวฟต่อไป

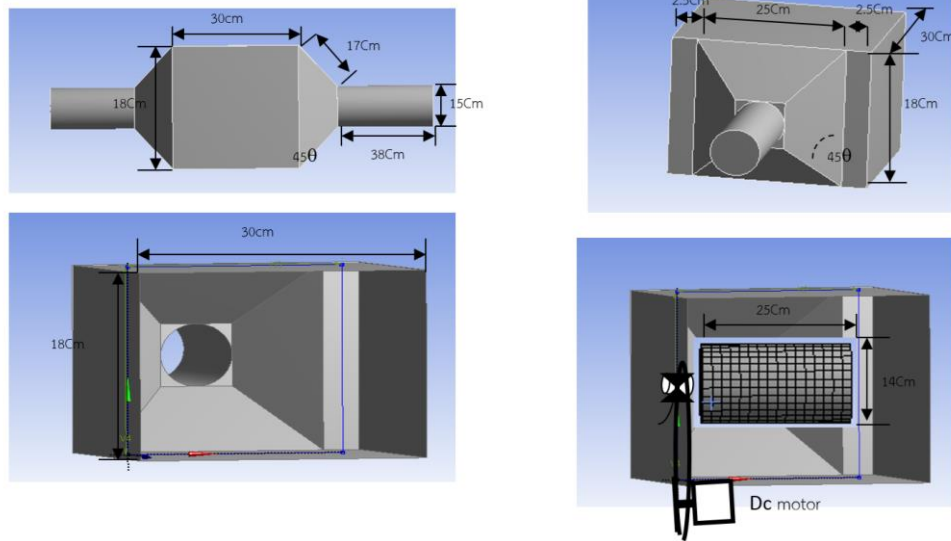
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 3.2.1 เครื่องอบแห้งแบบถึงหมุนร่วมกับไมโครเวฟ

เครื่องอบแห้งแบบถึงหมุนร่วมกับไมโครเวฟ ขนาดต้นแบบ แสดงในภาพประกอบ 5 และขนาดถึงหมุนสำหรับอบแห้งแสดงในภาพประกอบ 6

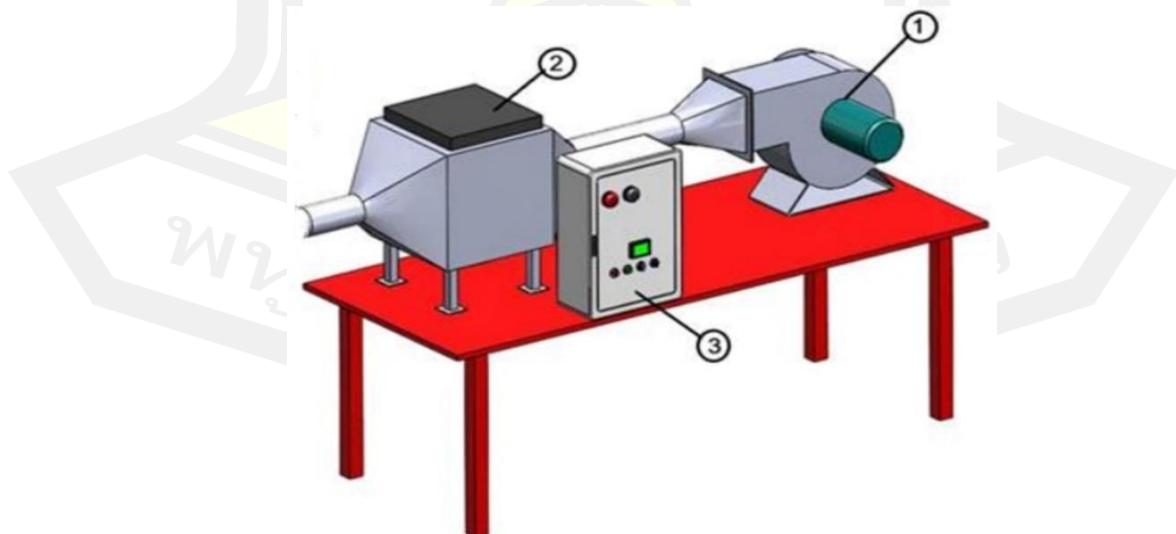


ภาพประกอบ 6 ไดอะแกรมชุดอบแห้งแบบถึงหมุนร่วมกับไมโครเวฟ



ภาพประกอบ 7 ห้องอบแห้งแบบถึงหมุนร่วมกับไมโครเวฟ

ภาพประกอบ 7 แสดงการออกแบบสร้างเครื่องอบแห้งแบบถึงหมุนร่วมกับไมโครเวฟสำหรับลูกเต๋ายहुงสุกเร็วโดยได้นำไมโครเวฟที่มีขนาดบรรจุได้ 30 ลิตร มาดัดแปลงแล้วออกแบบสร้างถึงหมุนซึ่งจะอยู่ด้านในถึงไมโครเวฟโดยมีขนาดความกว้าง 14 เซนติเมตร และความยาว 25 เซนติเมตร ใช้ตะแกรงที่มีขนาดของรูตะแกรงที่ 0.2 มิลลิเมตร โดยที่ถึงหมุนเคลื่อนที่ได้โดยมีมอเตอร์ กระแสตรง 12 โวลต์ ด้านในถึงหมุนจะมีเกลียวโดยจะหมุนไปตามถึงหมุนเพื่อให้วัสดุลูกเต๋ายहुงเกิดการเคลื่อนที่ภายในถึงหมุน และมีท่อส่งคลื่นกำลังไมโครเวฟส่งเข้าไปด้านในถึงหมุน



ภาพประกอบ 8 ชุดสร้างลมร้อนและระบบควบคุมความเร็วและอุณหภูมิ

ภาพประกอบ 8 แสดงชุดสร้างลมร้อนและระบบควบคุมความเร็วและอุณหภูมิ ซึ่งประกอบด้วย พัดลมขนาด 1 แรงม้า (หมายเลข 1) สำหรับดูดอากาศภายนอกเข้าในระบบ ยี่ห้อ Mitsubishi Electric Automation, Thailand Co., Ltd. ชุดให้ความร้อนอากาศขนาด 8 กิโลวัตต์ (หมายเลข 2) ชุดควบคุมความเร็วลมอากาศร้อน (หมายเลข 3) โดยใช้อินเวอร์เตอร์ (Model H-3200 series Haitec Transmission Equipment Co., Ltd., China) และชุดควบคุมอุณหภูมิแบบ PID (Model MAC-3D, Shimax Co., Ltd., Japan)

3.2.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองและเก็บรวบรวมข้อมูล

1) เครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลองและเก็บรวบรวมข้อมูลในการอบแห้ง

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

2) เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองหาความชื้นของลูกเต๋อย

- 2.1) ตู้อบลมร้อน (Hot air oven)
- 2.2) กระป๋องสำหรับวัดความชื้น (Moisture can)
- 2.3) เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิตอล 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 $70-90^{\circ}\text{C}$
- 1.2) กำลังวัตต์ไมโครเวฟ อยู่ในช่วง 150-450 วัตต์
- 1.3) ความเร็วรอบของถังหมุน อยู่ในช่วง 10-30 รอบต่อนาที

2) ตัวแปรตาม ประกอบด้วย

- 2.1) ค่าสี L^* a^* b^* และ ΔE
- 2.2) เวลาการคืนรูป
- 2.3) อัตราการดูดน้ำกลับ
- 2.4) ค่าความแข็งและความเหนียวหลังการคืนรูป
- 2.5) ค่าการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC)

3) ตัวแปรควบคุม

- 3.1) ปริมาณลูกเต๋อยุ่หุงสุกที่ใช้ต่อ 1 การทดลอง เท่ากับ 200 กรัม
- 3.2) ความเร็วลมเท่ากับ 0.5 เมตรต่อวินาที
- 3.3) ความชื้นเริ่มต้น 50-55% wb
- 3.4) ความชื้นสุดท้าย 9-10% db

4) ออกแบบการทดลองแบบ Full factorial design โดยใช้ช่วงของปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัย คือ อุณหภูมิลมร้อน อยู่ในช่วง $70-90^{\circ}\text{C}$ กำลังวัตต์ไมโครเวฟ อยู่ในช่วง 150-450 วัตต์ และ ความเร็วรอบของถังหมุน อยู่ในช่วง 10-30 รอบต่อนาที จะได้รับการทดลองทั้งหมด 27 การทดลอง ดังตาราง 1

ตาราง 1 สภาวะการทดลองที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบ Full factorial design

Run	Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Microwave power (W)	Rotary speed (rpm)
1	70	150	10
2	70	150	20
3	70	150	30
4	70	300	10
5	70	300	20
6	70	300	30
7	70	450	10
8	70	450	20
9	70	450	30
10	80	150	10

Run	Temperature (°C)	Microwave power (W)	Rotary speed (rpm)
11	80	150	20
12	80	150	30
13	80	300	10
14	80	300	20
15	80	300	30
16	80	450	10
17	80	450	20
18	80	450	30
19	90	150	10
20	90	150	20
21	90	150	30
22	90	300	10
23	90	300	20
24	90	300	30
25	90	450	10
26	90	450	20
27	90	450	30

3.3.2 การวิเคราะห์คุณภาพ

1) ความชื้น (% ฐานแห้ง)

วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลองตั้งแต่ช่วงความชื้นลูกเด็ยเริ่มต้นจนกระทั่งความชื้นสุดท้ายประมาณร้อยละ 10 ฐานแห้ง โดยหาความชื้น (Moisture content, MC) ของผลิตภัณฑ์ตามมาตรฐาน AOAC นำตัวอย่างลูกเด็ยปริมาณ 3 กรัมได้น้ำหนักที่แน่นอนในภาชนะอะลูมิเนียม และนำไปอบแห้งจนได้น้ำหนักคงที่ในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง แล้วนำออกมาชั่งน้ำหนักที่แน่นอน และคำนวณปริมาณความชื้นจากสมการ 1

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

เมื่อ	MC	คือ	ความชื้น (เปอร์เซ็นต์ฐานแห้ง)
	W_t	คือ	น้ำหนักลูกเต๋อยที่เวลาใด ๆ (กรัม)
	W_d	คือ	น้ำหนักแห้งของลูกเต๋อย (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 ทดสอบคุณภาพด้านสีของตัวอย่างลูกเต๋อยหุงสุกเร็วโดยใช้เครื่องวัดสี (Minolta colorimeter) วัดค่าสีระบบ CIE (L^* a^* b^*) ด้วยเครื่อง Chroma meter รายงานค่าเป็น L^* (ค่าความสว่าง) a^* (ค่าความเป็น สีแดง) $-a^*$ (ค่าความเป็น สีเขียว) b^* (ค่าความเป็น สีเหลือง) $-b^*$ (ค่าความเป็น สีน้ำเงิน) โดยการทดลองจะทำการวัด 5 ซ้ำ และรายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย

4) เวลาการคืนรูป

นำตัวอย่างลูกเต๋อยแห้งมาทดสอบการคืนรูปปริมาณ 15 กรัม ในน้ำเดือด 1 ลิตร ทำการชั่งน้ำหนักทุกๆ 1 นาที โดยนำตัวอย่างออกมาบันทึกน้ำหนักหลังจากการดูดน้ำแต่ละช่วงเวลา ก่อนชั่งน้ำหนักตัวอย่าง กำจัดน้ำที่ผิวของเมล็ดลูกเต๋อยโดยวางบนผ้าฝ้ายเป็นเวลาประมาณ 1 นาที ทำการวัด ชั่งน้ำหนักจนกระทั่งน้ำหนักของตัวอย่างลูกเต๋อยหลังจากดูดน้ำกลับไม่เปลี่ยนแปลงหรือเข้าสู่สภาวะสมดุล

5) อัตราการดูดน้ำกลับ

เป็นค่าแสดงถึงความสามารถในการดูดซับน้ำและการพองตัวของเมล็ดลูกเต๋อยในระหว่างการคืนรูป โดยในการทดลองหาได้จากน้ำหนักของตัวอย่างที่คืนรูปแล้วต่อน้ำหนักของลูกเต๋อยก่อนการคืนรูป อัตราการดูดน้ำกลับสามารถวิเคราะห์ได้โดยชั่งตัวอย่างลูกเต๋อยแห้ง 10 กรัม นำไปคืนรูปในน้ำเดือดตามเวลาที่วิเคราะห์ได้ แล้วชั่งน้ำหนักลูกเต๋อยหลังคืนรูป คำนวณหาอัตราการดูดน้ำกลับดังสมการ 2 [52]

$$\text{Rehydration Ratio} = \frac{w_c - w_i}{w_i} \quad (2)$$

โดยที่ w_c คือ น้ำหนักลูกเต๋อยหลังคั้นรูป (กรัม)
 w_i คือ น้ำหนักลูกเต๋อยแห้ง (กรัม)

6) ค่าเนื้อสัมผัสหลังการคั้นรูป

ซึ่งตัวอย่างลูกเต๋อยสุกหรือคั้นรูป 10 เมล็ด เรียงบนฐานวัดเป็นชั้นเดียว กดตัวอย่าง 2 ครั้งเพื่อศึกษาลักษณะเนื้อสัมผัสแบบวิเคราะห์เค้าโครงเนื้อสัมผัส (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 3

$$\text{SEC} = \frac{3.6 \times E}{W_t - W_d} \quad (3)$$

เมื่อ SEC คือ ค่าการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (เมกะจูลต่อกิโลกรัม น้ำ)
 E คือ ปริมาณพลังงานที่ใช้ (กิโลวัตต์ชั่วโมง)
 W_t คือ น้ำหนักของลูกเต๋อยที่เวลาใดๆ (กรัม)
 W_d คือ น้ำหนักแห้งของลูกเต๋อย (กรัม)
 3.6 คือ ตัวเลขแปลงหน่วยของพลังงานไฟฟ้า

3.4 การหาจลนศาสตร์การอบแห้งและการคืนตัว

3.4.1 จลนศาสตร์การอบแห้ง

การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งลูกเต๋อยสามารถทำได้โดยการวิเคราะห์ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้น (MR) และเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง สมการของอัตราส่วนความชื้นโดยคำนวณจากสมการ 4

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (4)$$

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

การวิเคราะห์หาสมการอบแห้งที่เหมาะสมของการอบแห้งลูกเต๋อย 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 5 และ

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_{obs,i} - V_{pre,i})^2} \quad (5)$$

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

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

ตาราง 2 รูปแบบสมการพื้นฐานที่ใช้ทำนายการอบแห้งวัสดุชั้นบาง

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 et al.	$MR = ae^{(-kt)} + (1-a)e^{(-gt)}$
10	2 term	$MR = ae^{(-k_0t)} + ba^{(-k_1t)}$
11	Midilli et al.	$MR = ae^{(-kt^n)} + bt$

3.4.2 การวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น

สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (D_{eff}) และค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) สมการกึ่งทฤษฎี (semi-theoretical equation) ซึ่งจะมีรูปแบบความสัมพันธ์ในรูปกฎข้อที่สองของฟิค (Fick's second law) สามารถใช้ในการหาอัตราส่วนความชื้น ดังแสดงในสมการ 7 สำหรับวัสดุที่มีชั้นบาง

$$MR = \frac{6}{\pi^2} \exp\left(-\pi^2 \frac{D_{eff} t}{r^2}\right) \quad (7)$$

เมื่อ	D_{eff}	คือ	สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (m^2/s)
-------	-----------	-----	---

สัมประสิทธิ์แพร่ความชื้นประสิทธิผล (D_{eff}) เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิที่ลูกเต๋อยูดูดซับพลังงาน มีความสัมพันธ์ตามรูปแบบของสมการอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) ถูกใช้ในการวิเคราะห์หาค่าพลังงานกระตุ้น (activation energy for diffusion, E_a) ซึ่งบ่งบอกค่าความร้อนแฝงในการเปลี่ยนสถานะของมวลความชื้นในลูกเต๋อยูด (latent heat of vaporization) ในระหว่างกระบวนการอบแห้ง โดยมีรูปแบบสมการดังแสดงในสมการ 8

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (8)$$

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

3.4.3 จลนศาสตร์การคืนรูป (Rehydration kinetics)

เช่นเดียวกับวิธีการวิเคราะห์เวลาคืนรูป นำตัวอย่างลูกเต๋อยูดแห้งมาทดสอบการคืนตัวปริมาณ 15 กรัม ในน้ำเดือด 1 ลิตร ทำการชั่งน้ำหนักทุก ๆ 1 นาที โดยนำตัวอย่างออกมาบันทึกน้ำหนัก หลังจากการดูดน้ำแต่ละช่วงเวลา ก่อนชั่งน้ำหนักตัวอย่าง กำจัดน้ำที่ผิวของเมล็ดลูกเต๋อยูดโดยวางบนผ้าผ่ายเป็นเวลาประมาณ 1 นาที ทำการวัด ชั่งน้ำหนักจนกระทั่งน้ำหนักของตัวอย่างลูกเต๋อยูดหลังจากดูดน้ำกลับไม่เปลี่ยนแปลง (เข้าสู่ภาวะสมดุล)

น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นในระหว่างการคืนตัว (weight gain on rehydration, WGR) สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการ 9 โดยที่ตัวห้อย e และ t แทนค่าที่เวลาสมดุลและเวลา t ใดๆ ตามลำดับ W คือน้ำหนักของตัวอย่าง (kg)

$$WGR = \frac{W_e - W_t}{W_e} \times 100 \quad (9)$$

นำน้ำหนักของตัวอย่างที่เวลาสมดุลและเวลาใด ๆ มาพิตกับสมการจลนศาสตร์อันดับที่หนึ่ง (first-order kinetics equation) โดยใช้วิธี non-linear regression method เพื่อหาค่าคงที่จลนศาสตร์การคืนตัว ดังสมการ 10

$$WGR = WGR_e - (WGR_e - 1) \exp(-k_r t) \quad (10)$$

โดยที่	WGR	คือ	อัตราส่วนน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นที่เวลา t ใดๆ
	WGR_e	คือ	อัตราส่วนน้ำหนักสมดุล
	k_r	คือ	คงที่อัตราการคืบตัว (min^{-1})
	t	คือ	เวลาการคืบตัว (วินาที)

3.5 การหาสภาวะที่เหมาะสม (Optimization)

เนื่องจากแต่ปัจจัยการอบแห้งต่างส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกัน ดังนั้น การหาสภาวะที่ดีที่สุดหรือสภาวะที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งสำคัญในการออกแบบสภาวะ งานวิจัยนี้ใช้วิธีผลตอบสนองพื้นผิว (Response Surface Method, RSM) ในการหาสภาวะที่เหมาะสมโดยพิจารณา 3 ปัจจัย คืออุณหภูมิลมร้อน (T) กำลังวัตต์ของไมโครเวฟ (MW) และความเร็วรอบของถังหมุน (RPM) ในขณะที่ผลตอบสนองที่ศึกษาประกอบด้วยคุณสมบัติเชิงกายภาพและเนื้อสัมผัสโดยเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ควบคุม (ลูกเดียวที่ผ่านการทำให้สุกด้วยวิธีดั้งเดิมและเตรียมโดยการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง)

สมการความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยและผลตอบสนองเป็นแบบสมการโพลิโนเมียลอันดับสอง (second-order polynomial equation) ดังนี้

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^n a_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n a_{ij} x_i x_j \quad (11)$$

ในสมการ 11 สัมประสิทธิ์ a_0 คือค่าคงที่ a_i และ a_{ii} linear และ quadratic effect ตามลำดับ ในขณะที่ a_{ij} คือ interaction effect ส่วน x_i ($n = 3$) คือค่าจริงของแฟกเตอร์ที่ i

ผลตอบสนองที่ประมาณค่าจากสมการ 11 ถูกนำมาเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของค่า scale free value (d_i) ซึ่งเรียกว่าค่าการออกแบบ (desirability) ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 โดยที่ค่า 0 แสดงผลตอบสนอง 1 หรือมากกว่า 1 ผลตอบสนองที่อยู่นอกขีดจำกัดที่ยอมรับได้ ในขณะที่ค่า 1 แทนสภาวะในอุดมคติ ฟังก์ชันของ desirability ($d_i(Y_i)$) ที่ใช้มีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับผลตอบสนองที่ต้องการ เช่น ค่ามากที่สุด ค่าน้อยที่สุด หรือค่าที่กำหนด เป็นต้น ดังนั้น ค่า desirability รวมที่ต้องการจึงเป็นการผสมผสานของแต่ละผลตอบสนอง ดังสมการต่อไปนี้

$$D = (d_1(Y_1)d_2(Y_2)...d_k(Y_k))^{1/k} \quad (12)$$

โดยที่ k คือ จำนวนของผลตอบสนอง

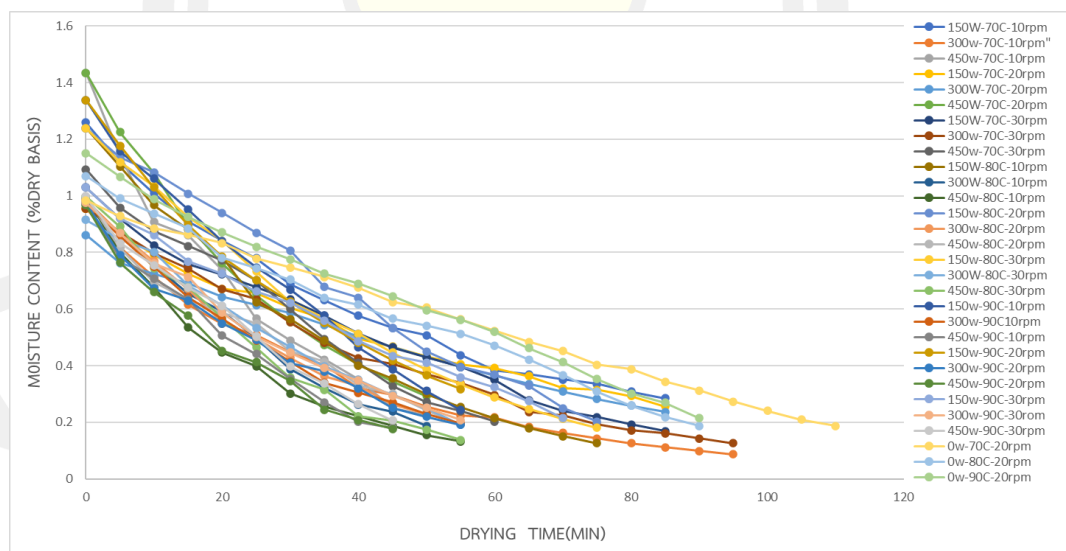
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้แบ่งผลการศึกษาออกเป็น 4 ส่วน ซึ่งประกอบด้วย การศึกษา จลนศาสตร์การอบแห้งลูกเต๋อยหุงสุกเร็วด้วยวิธีการอบแห้งแบบถึงหมุ่นร่วมกับการให้ความร้อนด้วย ไมโครเวฟ การศึกษาพฤติกรรมของการอบแห้งลูกเต๋อยหุงสุกเร็ว การศึกษาสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสม และการศึกษาเปรียบเทียบคุณภาพของลูกเต๋อยหุงสุกเร็วที่เตรียมจากวิธีที่แตกต่างกัน

4.1 ผลการศึกษาจลนศาสตร์การอบแห้งลูกเต๋อยหุงสุกเร็วด้วยวิธีการอบแห้งแบบถึงหมุ่นร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ

4.1.1 การศึกษาจลนศาสตร์การอบแห้งลูกเต๋อยหุงสุกเร็ว โดยใช้เครื่องอบแห้งแบบถึงหมุ่น ร่วมกับไมโครเวฟ โดยอุณหภูมิหมุ่นร้อนเท่ากับ 70°C 80°C และ 90°C กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 150 วัตต์ 300 วัตต์ และ 450 วัตต์ และความเร็วรอบของถึงหมุ่นเท่ากับ 10 รอบต่อนาที 20 รอบต่อนาที และ 30 รอบต่อนาที ตามลำดับ ลูกเต๋อยสุกที่ทำการอบแห้งมีความชื้นเริ่มต้นอยู่ที่ประมาณร้อยละ 50-55 มาตรฐานเปียก อบแห้งจนกระทั่งเหลือความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 10 มาตรฐานแห้ง

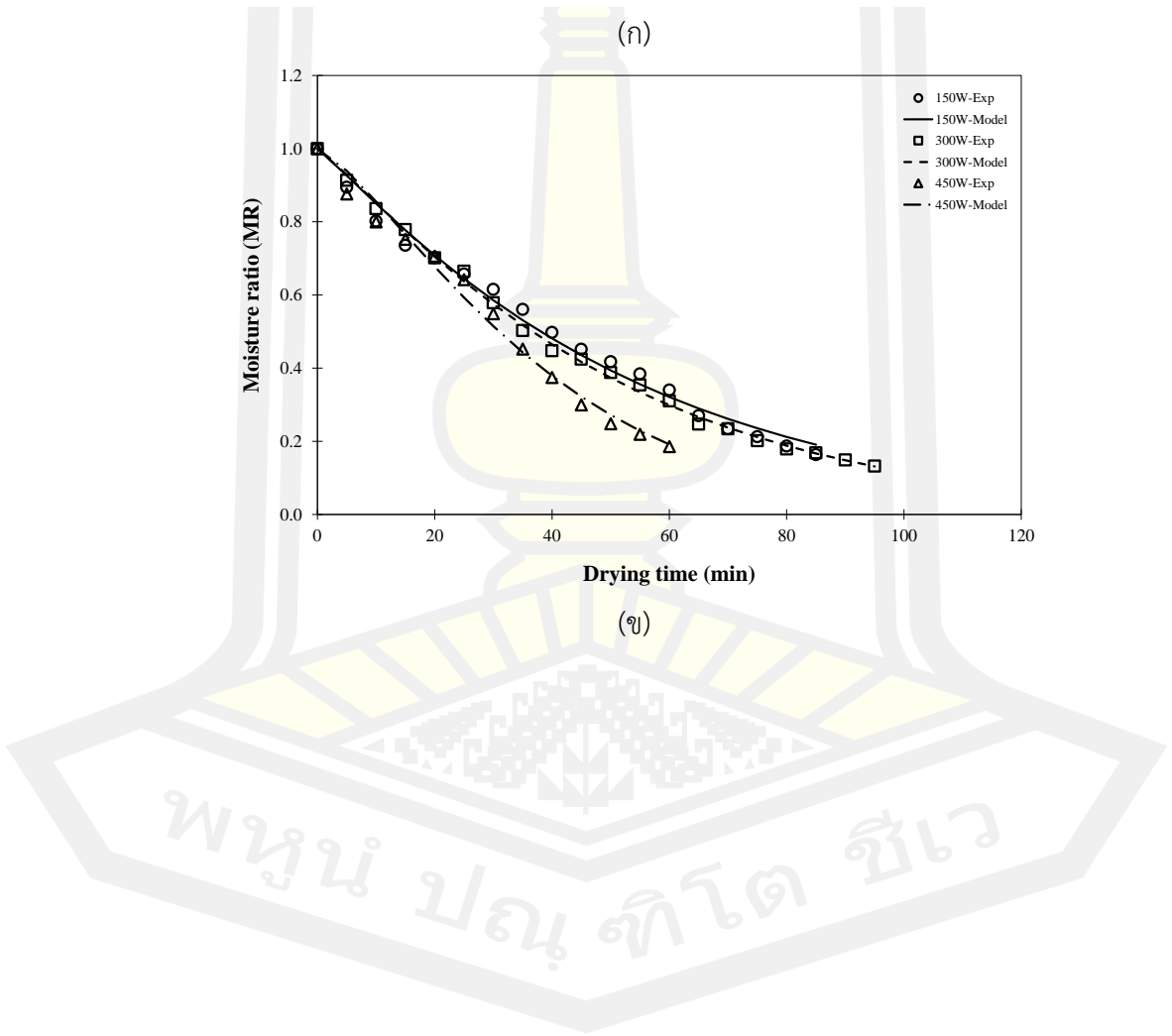
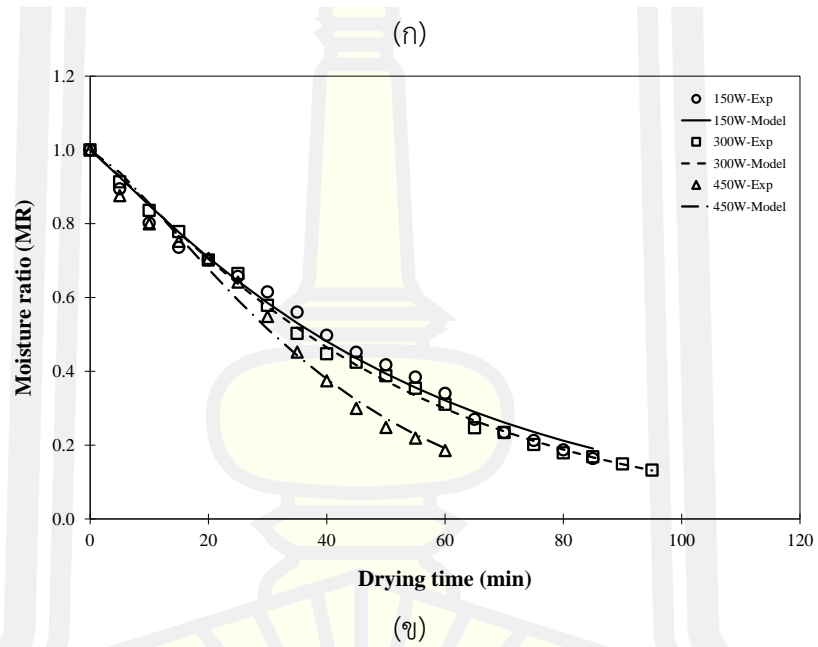
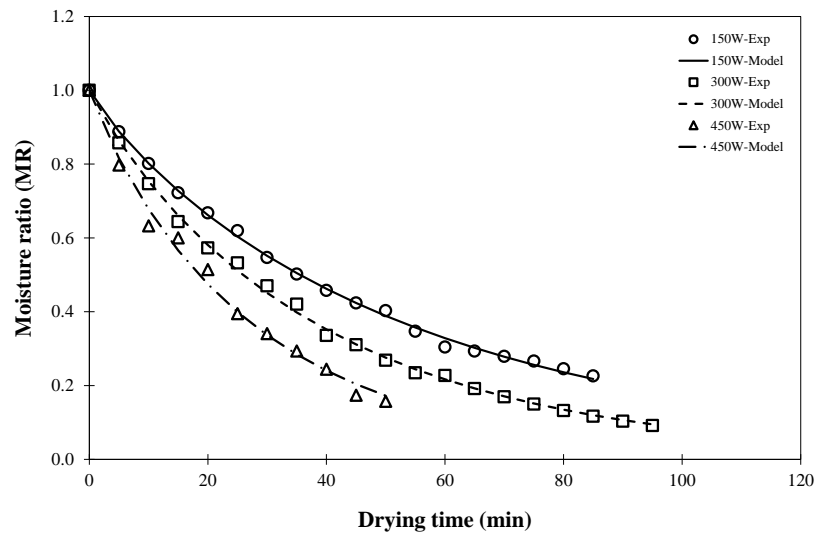


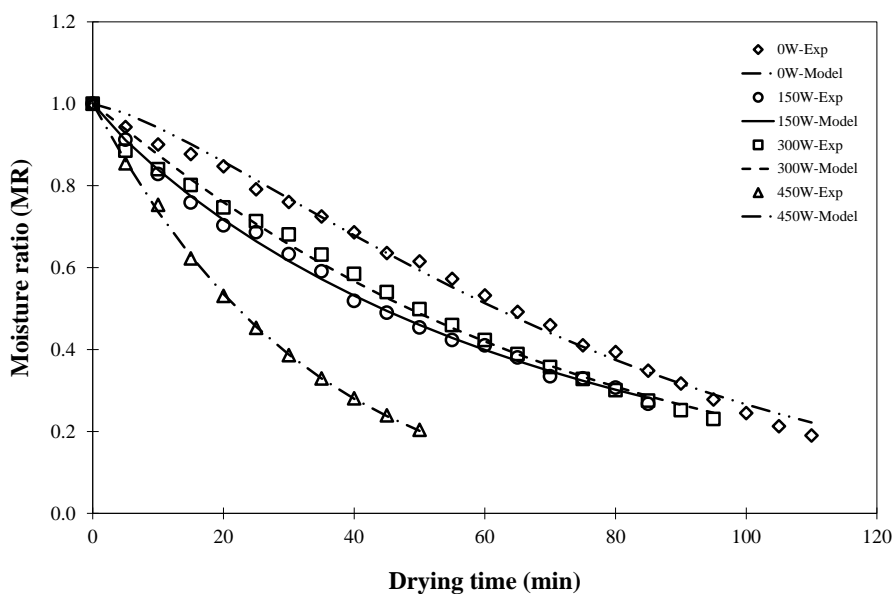
ภาพประกอบ 9 อัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นของลูกเต๋อยหุงสุกเร็วที่อบแห้งที่อุณหภูมิหมุ่นร้อน กำลังวัตต์ไมโครเวฟและ ความเร็วถึงหมุ่นแตกต่างกัน

ภาพประกอบ 9 แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นตามเวลาการอบแห้ง พบว่า การลดความชื้นจะลดลงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียลโดยตลอดระยะเวลาการอบแห้ง ซึ่งสอดคล้อง กับคุณลักษณะการอบแห้งของผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรและอาหารทั่วไปและเมื่อทำการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความชื้นพบว่า แนวโน้มของเวลาการอบแห้งที่ลดลงเมื่อใช้คลื่นไมโครเวฟในการให้ความร้อนเสริมเมื่อพิจารณาผลของการใช้กำลังวัตต์ที่แตกต่างกันในแต่ละระดับความเร็วรอบของถังหมุน พบว่าค่าความชื้นของตัวอย่างมีค่าลดลงเมื่อใช้กำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟมากขึ้น แสดงให้เห็นว่ากำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟที่มากขึ้นนี้ทำให้อัตราการให้ความร้อนเพิ่มมากขึ้นและส่งผลให้ปริมาณน้ำในตัวอย่างมีอัตราการระเหยมากขึ้นเช่นเดียวกัน ใอน้ำที่ถูกทำให้ระเหยด้วยคลื่นไมโครเวฟจะเป็นแรงผลักดันให้น้ำในตัวอย่งเกิดการเคลื่อนตัวอย่างภายในสุญญากาศภายนอกของตัวอย่างถูกดึงเหวี่ยงได้รวดเร็วขึ้นที่เวลาอบแห้งเดียวกัน การให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟส่งผลให้เวลาในการอบแห้งจนถึงระดับที่ต้องการ (ต่ำกว่า 10% ฐานแห้ง) มีค่าลดลง เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิเพิ่มขึ้นกำลังวัตต์ไมโครเวฟสูงขึ้น ส่งผลให้เวลาในการอบแห้งลดลงเช่นเดียวกัน

4.1.2 พฤติกรรมการอบแห้งของลูกเต๋อยหุงสุก

ภาพประกอบ 10 แสดงพฤติกรรมการอบแห้งของตัวอย่างลูกเต๋อยหุงสุก โดยใช้กระบวนการอบแห้งแบบถังหมุนร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ ที่อุณหภูมิลมร้อนคงที่เท่ากับ 70 องศาเซลเซียส กำลังวัตต์ไมโครเวฟมีการเปลี่ยนในช่วง 150 – 450 วัตต์ และความเร็วรอบของถังหมุนแตกต่างกันเท่ากับ 10 รอบต่อนาที (ภาพประกอบ 10(ก)) 20 รอบต่อนาที (ภาพประกอบ 10(ข)) และ 30 รอบต่อนาที (ภาพประกอบ 10(ค)) จากภาพประกอบ 10 จะเห็นได้ว่าพฤติกรรมการอบแห้งเป็นไปตามทฤษฎีการอบแห้ง โดยความชื้นของตัวอย่างลูกเต๋อยหุงสุกมีค่าลดลงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียลตลอดระยะเวลาการอบแห้ง ซึ่งสอดคล้องกับคุณลักษณะการอบแห้งของผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรและอาหารทั่วไป [4], [8], [9], [45], [46], [56]–[58]





(ค)

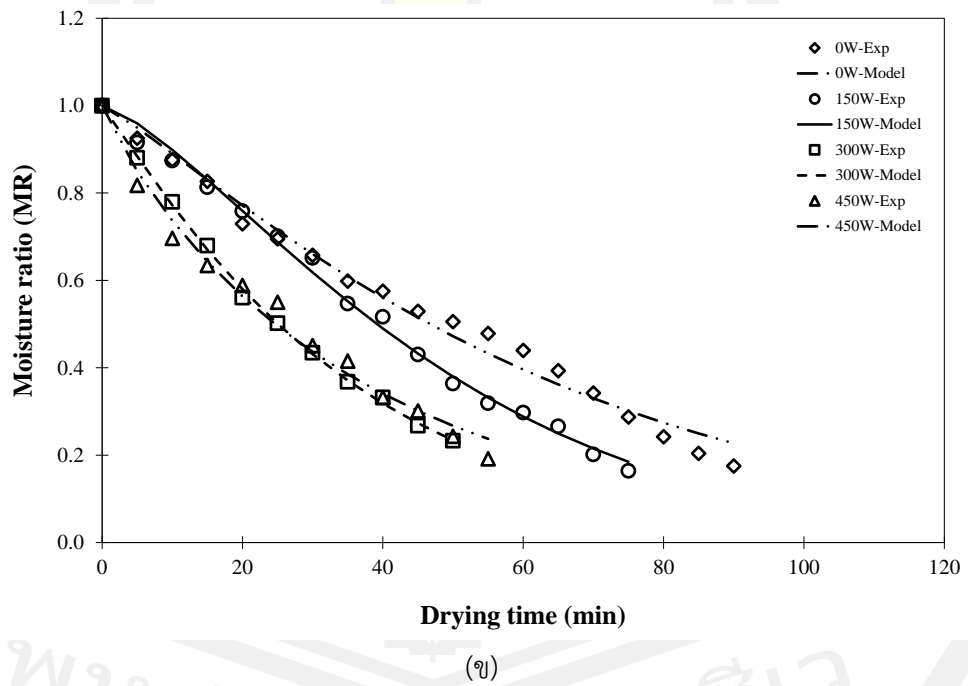
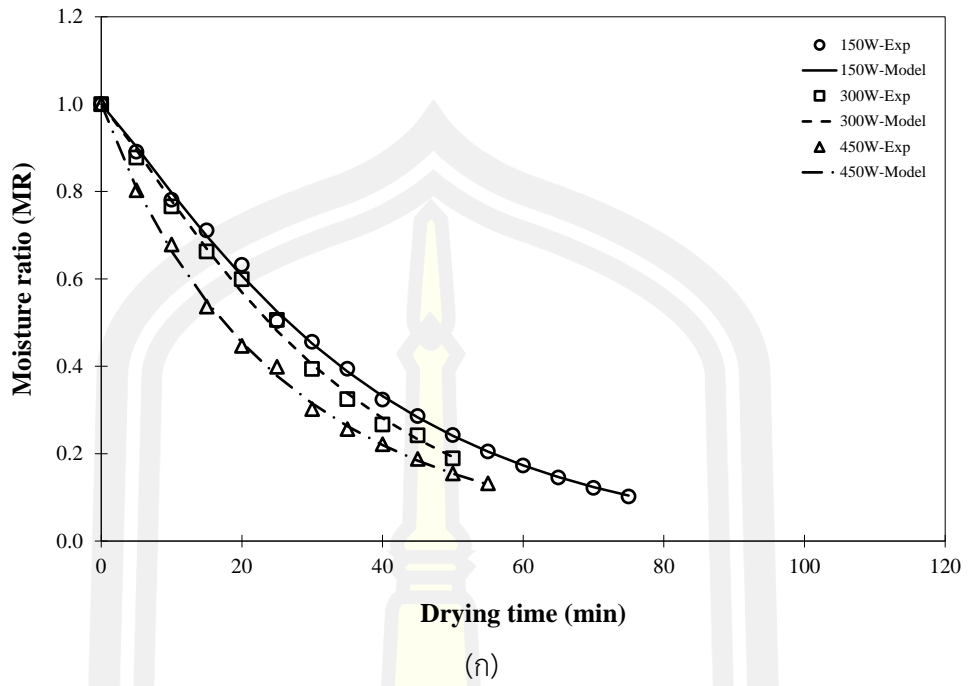
ภาพประกอบ 10 กราฟอัตราส่วนความชื้นและเวลาการอบแห้งที่อุณหภูมิร้อนเท่ากับ 70°C ที่กำลังวัตต์ของไมโครเวฟแตกต่างกัน และความเร็วรอบของถังหมุนเท่ากับ (ก) 10 รอบต่อนาที (ข) 20 รอบต่อนาที และ (ค) 30 รอบต่อนาที

ความชื้นเริ่มต้นของลูกเต๋อยุ่สูงที่สุดในทุกสภาวะการอบแห้งที่ทดสอบในงานวิจัยนี้มีค่า $51.11 \pm 3.75\%$ (wb) เมื่อพิจารณาความชื้นสุดท้ายของตัวอย่างลูกเต๋อยุ่สูงเร็ว ที่ต้องการซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 10 มาตรฐานแห้ง หรืออัตราส่วนความชื้น (MR) สุดท้ายมีค่าประมาณ 0.20 จากภาพประกอบ 10 พบว่า การอบแห้งแบบถังหมุนรวมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ ส่งผลให้เวลาการอบแห้งสั้นกว่าสภาวะที่ไม่มีการใช้คลื่นไมโครเวฟร่วมด้วย ดังแสดงในภาพประกอบ 10(ข) การอบแห้งด้วยลมร้อนอย่างเดียวใช้เวลาประมาณ 110 นาที ในขณะที่การใช้คลื่นไมโครเวฟร่วมด้วยที่ 150 และ 300 วัตต์ ใช้เวลา 95 นาที ในขณะที่การใช้กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 450 วัตต์ ใช้เวลาเพียง 45 นาที เท่านั้น แนวโน้มของเวลาการอบแห้งที่ลดลงเมื่อใช้คลื่นไมโครเวฟในการให้ความร้อนเสริมนี้สอดคล้องกับค่าคงที่อัตราการอบแห้งดังแสดงในตาราง 33 ซึ่งส่งผลจากการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ เมื่อพิจารณาผลของการใช้กำลังวัตต์ที่แตกต่างกันในแต่ละระดับความเร็วรอบของถังหมุน ดังแสดงในภาพประกอบ 10 พบว่าค่าความชื้นของตัวอย่างมีค่าลดลงเมื่อใช้กำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟมากขึ้น แสดงให้เห็นว่ากำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟที่มากขึ้นนี้ทำให้อัตราการให้ความร้อนเพิ่มมากขึ้นและส่งผลให้ปริมาณน้ำในตัวอย่างมีอัตราการระเหยมากขึ้นเช่นเดียวกัน ไอน้ำที่ถูกทำให้ระเหยด้วยคลื่นไมโครเวฟจะเป็นแรงผลักดันให้น้ำในตัวอย่างเกิดการเคลื่อนตัวอย่างภายในสู่ผิวภายนอกตัวอย่างลูกเต๋อยุ่สูงได้รวดเร็วขึ้นที่เวลาอบแห้งเดียวกัน ความชื้นจึงมีค่าต่ำกว่าเมื่อใช้

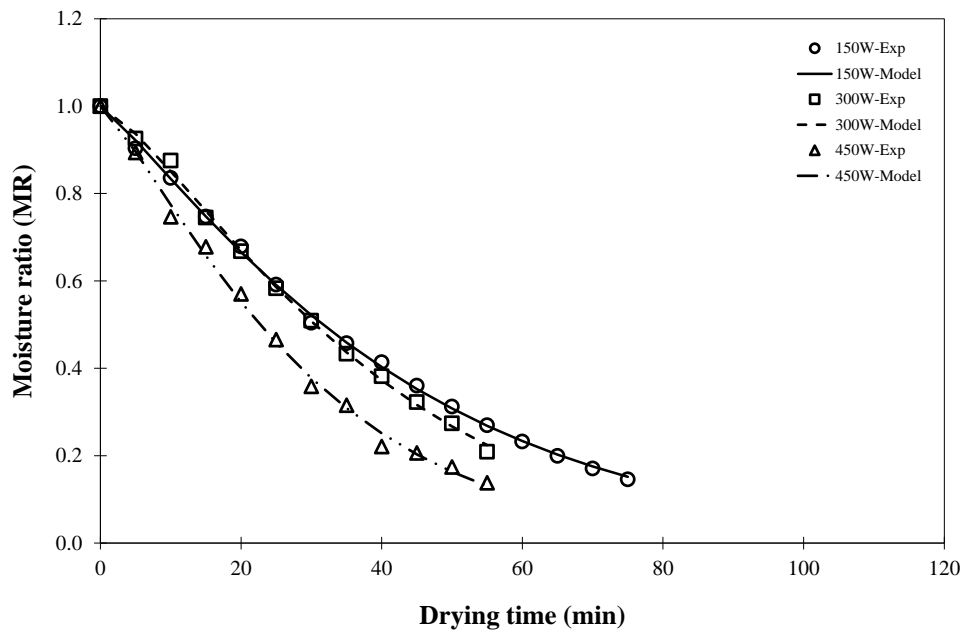
กำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟที่มากขึ้น กลไกการอบแห้งเมื่อใช้คลื่นไมโครเวฟที่มีกำลังไฟฟ้ามากขึ้นนี้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ [9], [45], [58], [59]

ถึงแม้ว่าการอบแห้งด้วยไมโครเวฟมีอัตราการอบแห้งที่รวดเร็ว การอบแห้งด้วยวิธีนี้ยังมีข้อจำกัดเกี่ยวกับความไม่สม่ำเสมอของอุณหภูมิหรือความชื้นของผลิตภัณฑ์ในระหว่างการอบแห้ง อันเนื่องมาจากความไม่สม่ำเสมอของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า อุณหภูมิของวัสดุบริเวณผิวหน้าหรือส่วนขอบจะร้อนเร็วมาก จึงเกิดการไหม้ อาจทำลายกลีสรสของผลิตภัณฑ์สุดท้ายได้ ดังนั้น วัสดุหรืออาหารควรมีการเคลื่อนที่เพื่อป้องกันการเกิดบริเวณที่ร้อนมากจนเกินไป [38]–[43] งานวิจัยนี้จึงได้นำมาประเด็นนี้มาใช้ในการศึกษาด้วยเช่นเดียวกัน โดยศึกษาผลของความเร็วในการเคลื่อนที่ของตัวอย่างลูกเต๋อยุ่สูงซึ่งสอดคล้องกับความเร็วรอบของถังหมุน จากภาพประกอบ 10 จะเห็นได้ว่าที่ระดับการใช้กำลังวัตต์ไมโครเวฟเดียวกัน เวลาในการอบแห้งมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้ความเร็วรอบของถังหมุนต่ำลงถึงแม้ว่าวัสดุลูกเต๋อยุ่สูงจะมีการเคลื่อนที่ช้ากว่าก็ตาม ผลการทดลองเช่นนี้สามารถอธิบายได้ว่าการเคลื่อนที่ของลูกเต๋อยุ่สูงมีการเคลื่อนที่ในลักษณะกึ่งไปตามถังหมุนพร้อม ๆ กับการเคลื่อนที่ในแนวราบตามโครงสร้างของเกลียวด้านใน ซึ่งการหมุนของถังมีการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาตามโดยกำหนดเวลาในการเปลี่ยนทิศทางการหมุนเท่ากับ 2 นาที ดังนั้น อาจเป็นไปได้ว่าลูกเต๋อยุ่สูงเกิดการสะสมที่บริเวณทางด้านซ้ายสุดหรือขวาสุดของถัง ทำให้วัสดุบางส่วนไม่เคลื่อนที่หรือดูดซับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ ดังนั้น จึงสามารถสรุปได้ว่าความเร็วรอบที่เหมาะสมเมื่อพิจารณาลักษณะการเคลื่อนที่ของวัสดุลูกเต๋อยุ่สูงภายในถังหมุนมีค่าเท่ากับ 10 รอบต่อนาที

พฤติกรรมการอบแห้งลูกเต๋อยุ่สูงเร็วโดยใช้วิธีการอบแห้งแบบถังหมุนร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟที่ระดับอุณหภูมิความร้อน 80°C และ 90°C มีลักษณะเป็นไปในทางเดียวกันกับสถานะอุณหภูมิความร้อน 70°C ดังแสดงในภาพประกอบ 11 และ 12 ตามลำดับ โดยการใช้ไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนสามารถช่วยลดเวลาการอบแห้งของลูกเต๋อยุ่สูงลงได้ อีกทั้งการใช้กำลังวัตต์ไมโครเวฟสามารถช่วยเร่งให้น้ำหรือความชื้นในวัสดุเกิดการระเหยได้รวดเร็วขึ้น ส่งผลให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นและเวลาในการอบแห้งลดลง ในขณะที่ความเร็วรอบของถังหมุนที่ 10 รอบต่อนาทีเหมาะสมสำหรับกระบวนการอบแห้งที่นำเสนอในงานวิจัยนี้

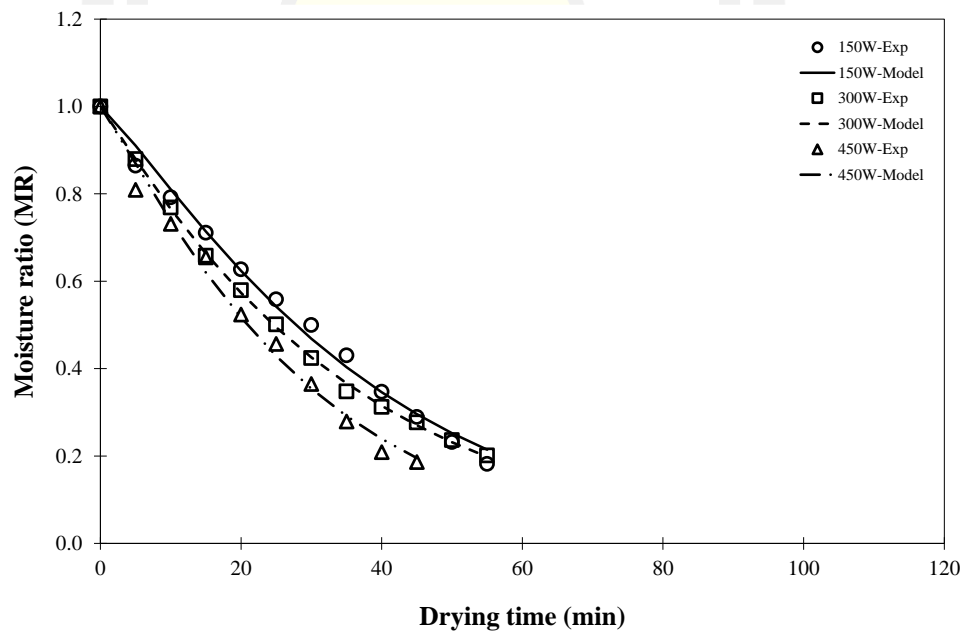


พหุบัณฑิต ชีวะ

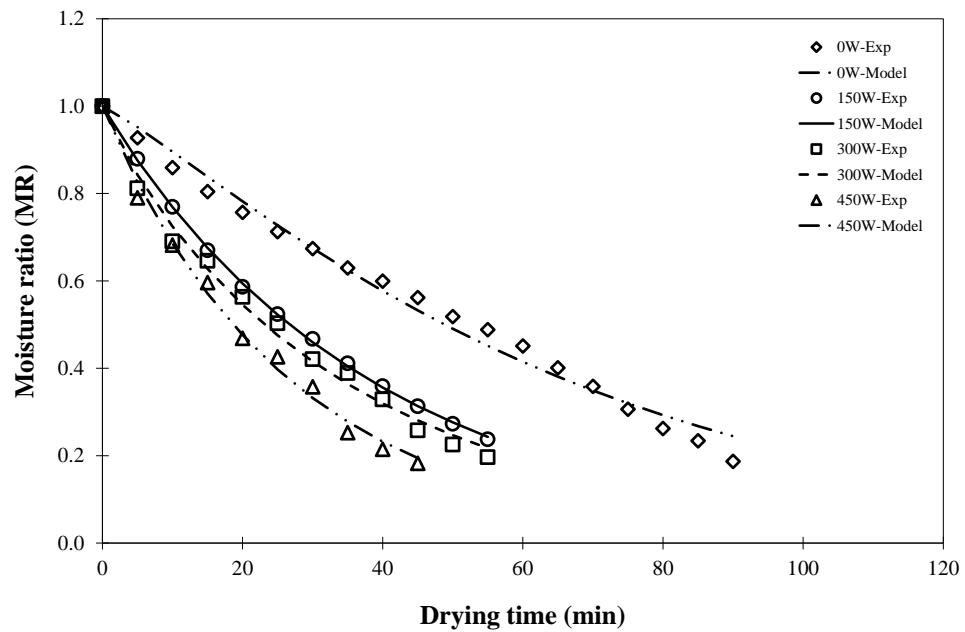


(ค)

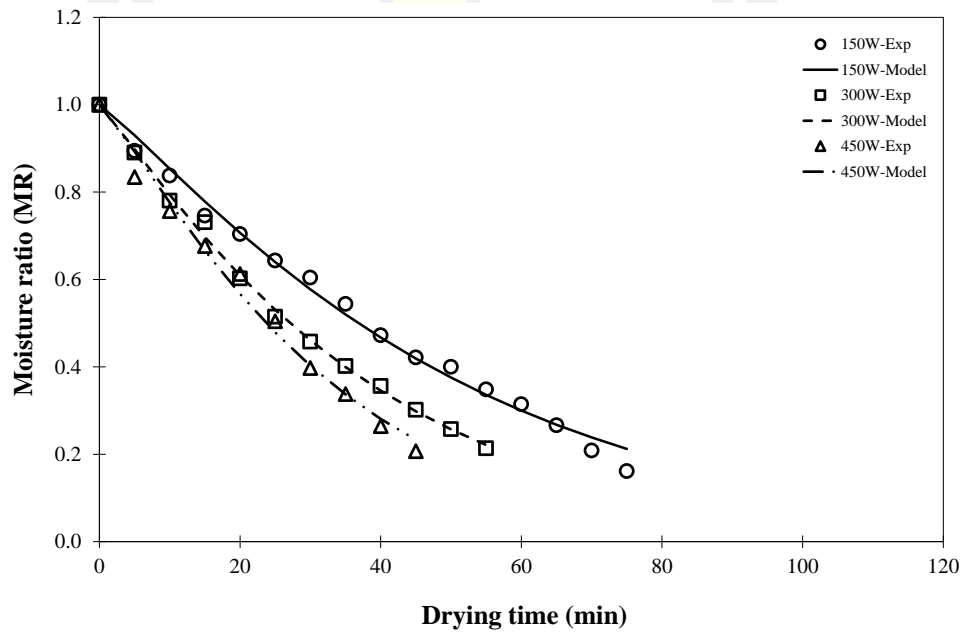
ภาพประกอบ 11 กราฟอัตราส่วนความชื้นและเวลาการอบแห้งที่อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 80°C ที่กำลังวัตต์ของไมโครเวฟแตกต่างกัน และความเร็วรอบของถังหมุนเท่ากับ (ก) 10 รอบต่อนาที (ข) 20 รอบต่อนาที และ (ค) 30 รอบต่อนาที



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพประกอบ 12 กราฟอัตราส่วนความชื้นและเวลาการอบแห้งที่อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 90°C ที่กำลังวัตต์ของไมโครเวฟแตกต่างกัน และความเร็วรอบของถังหมุนเท่ากับ (ก) 10 รอบต่อนาที (ข) 20 รอบต่อนาที และ (ค) 30 รอบต่อนาที

4.1.3 แบบจำลองการอบแห้ง

ในหัวข้อนี้เป็นการศึกษาแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับลูกเต๋อยุ่สูงเร็วที่เตรียมจากกระบวนการอบแห้งแบบถ้งหมุนร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ โดยใช้แบบจำลองเอมพิริกัลหรือสมการการอบแห้งแบบกึ่งทฤษฎีที่นำเสนอในงานวิจัยที่เกี่ยวกับการอบแห้งต่าง ๆ จำนวน 11 สมการ ดังแสดงในตาราง 2

นำสมการดังกล่าวนี้มาเปรียบเทียบกับอัตราส่วนความชื้น (MR) โดยมีปัจจัยการอบแห้ง 3 ปัจจัย ๆ ละ 3 ระดับ ดังนี้ อุณหภูมิความร้อนเท่ากับ 70°C 80°C และ 90°C กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 150 วัตต์ 300 วัตต์ และ 450 วัตต์ และความเร็วรอบของถ้งหมุนเท่ากับ 10 รอบต่อนาที 20 รอบต่อนาที และ 30 รอบต่อนาที ออกแบบการทดลองแบบ full factorial ดังนั้น จะได้จำนวนการทดลองทั้งหมด 27 การทดลอง

ตาราง 3 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิความร้อนเท่ากับ 70°C กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 150 วัตต์ และความเร็วรอบของถ้งหมุนเท่ากับ 10 รอบต่อนาที

Models	Statistical parameters for model selection				
	R^2	χ^2	RMSE	%P	MSE
1. Lewis	0.9940	0.00034	0.01783	3.88374	0.00243
2. Page	0.9983	0.00010	0.00943	1.98376	-0.00014
3. Modified Page	0.9940	0.00036	0.01783	3.88375	0.00243
4. Henderson & Pabis	0.9962	0.00022	0.01413	3.15656	-0.00099
5. Two-Term Exponential	0.9982	0.00011	0.00968	1.82694	0.00057
6. Wang & Singh	0.9946	0.00032	0.01688	2.97969	0.00407
7. Logarithm	0.9983	0.00011	0.00937	1.64923	0.00000
8. Approximation of diffusion	0.9940	0.00036	0.01783	3.88374	0.00243
9. Verman et al.	0.9982	0.00011	0.00968	1.86572	0.00049
10. Two-Term with 4 parameters	0.9983	0.00011	0.00937	1.63567	-0.00001
11. Midilli et al.	0.9985	0.00010	0.00898	1.69040	0.00001

ตาราง 4 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 70°C กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 150 วัตต์ และความเร็วรอบของถังหมุนเท่ากับ 20 รอบต่อนาที

Models	Statistical parameters for model selection				
	R ²	χ^2	RMSE	%P	MSE
1. Lewis	0.9942	0.00028	0.01625	2.47316	0.00298
2. Page	0.9969	0.00016	0.01185	2.10329	0.00045
3. Modified Page	0.9942	0.00030	0.01625	2.47319	0.00298
4. Henderson & Pabis	0.9960	0.00020	0.01340	2.35185	-0.00028
5. Two-Term Exponential	0.9971	0.00015	0.01138	2.13554	-0.00027
6. Wang & Singh	0.9929	0.00036	0.01795	2.73825	0.00370
7. Logarithm	0.9965	0.00019	0.01265	2.23545	0.00000
8. Approximation of diffusion	0.9942	0.00030	0.01625	2.47316	0.00298
9. Verman et al.	0.9972	0.00015	0.01118	2.10892	-0.00005
10. Two-Term with 4 parameters	0.9972	0.00016	0.01118	2.11493	0.00003
11. Midilli et al.	0.9972	0.00017	0.01136	2.11651	0.00000

ตาราง 5 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 70°C กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 150 วัตต์ และความเร็วรอบของถังหมุนเท่ากับ 30 รอบต่อนาที

Models	Statistical parameters for model selection				
	R ²	χ^2	RMSE	%P	MSE
1. Lewis	0.9865	0.00087	0.02865	7.93103	0.00177
2. Page	0.9889	0.00077	0.02608	6.30718	0.00422
3. Modified Page	0.9865	0.00092	0.02865	7.93110	0.00177
4. Henderson & Pabis	0.9866	0.00092	0.02862	7.89861	0.00222
5. Two-Term Exponential	0.9864	0.00093	0.02878	8.01378	0.00151
6. Wang & Singh	0.9916	0.00057	0.02259	3.58212	0.00537
7. Logarithm	0.9954	0.00033	0.01669	2.94521	0.00000
8. Approximation of diffusion	0.9865	0.00092	0.02865	7.93103	0.00177
9. Verman et al.	0.9904	0.00070	0.02420	5.64427	0.00412
10. Two-Term with 4 parameters	0.9866	0.00105	0.02862	7.89860	0.00222
11. Midilli et al.	0.9972	0.00022	0.01295	3.15802	0.00000

ตาราง 6 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 70°C กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 300 วัตต์ และความเร็วรอบของถังหมุนเท่ากับ 10 รอบต่อนาที

Models	Statistical parameters for model selection				
	R ²	χ^2	RMSE	%P	MSE
1. Lewis	0.9970	0.00022	0.01442	3.90745	0.00107
2. Page	0.9983	0.00013	0.01065	2.43599	0.00072
3. Modified Page	0.9970	0.00023	0.01442	3.90736	0.00107
4. Henderson & Pabis	0.9979	0.00016	0.01210	2.87317	-0.00071
5. Two-Term Exponential	0.9985	0.00011	0.00998	1.91875	-0.00010
6. Wang & Singh	0.9857	0.00109	0.03135	10.26489	0.00792
7. Logarithm	0.9980	0.00016	0.01157	2.37530	0.00000
8. Approximation of diffusion	0.9970	0.00023	0.01442	3.90745	0.00107
9. Verman et al.	0.9986	0.00011	0.00978	1.77641	0.00008
10. Two-Term with 4 parameters	0.9986	0.00012	0.00978	1.77966	0.00011
11. Midilli et al.	0.9985	0.00013	0.01020	2.19381	0.00002

ตาราง 7 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 70°C กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 300 วัตต์ และความเร็วรอบของถังหมุนเท่ากับ 20 รอบต่อนาที

Models	Statistical parameters for model selection				
	R ²	χ^2	RMSE	%P	MSE
1. Lewis	0.9926	0.00040	0.01946	3.41607	0.00187
2. Page	0.9933	0.00038	0.01842	2.66221	0.00334
3. Modified Page	0.9926	0.00042	0.01946	3.41608	0.00187
4. Henderson & Pabis	0.9927	0.00042	0.01934	3.51545	0.00109
5. Two-Term Exponential	0.9927	0.00041	0.01929	3.57216	0.00106
6. Wang & Singh	0.9941	0.00033	0.01732	1.65614	0.00461
7. Logarithm	0.9972	0.00017	0.01195	1.44279	0.00000
8. Approximation of diffusion	0.9926	0.00042	0.01946	3.41607	0.00187
9. Verman et al.	0.9943	0.00034	0.01703	2.11579	0.00347
10. Two-Term with 4 parameters	0.9927	0.00047	0.01934	3.51064	0.00108
11. Midilli et al.	0.9976	0.00015	0.01098	1.90043	0.00001

ตาราง 8 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 70°C กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 300 วัตต์ และความเร็วรอบของถังหมุนเท่ากับ 30 รอบต่อนาที

Models	Statistical parameters for model selection				
	R ²	χ^2	RMSE	%P	MSE
1. Lewis	0.9927	0.00055	0.02276	6.44479	-0.00140
2. Page	0.9978	0.00018	0.01259	2.58069	0.00101
3. Modified Page	0.9927	0.00058	0.02276	6.44482	-0.00140
4. Henderson & Pabis	0.9945	0.00043	0.01978	5.45578	0.00205
5. Two-Term Exponential	0.9924	0.00060	0.02332	6.57421	-0.00169
6. Wang & Singh	0.9981	0.00015	0.01178	2.40746	0.00054
7. Logarithm	0.9975	0.00021	0.01335	3.41527	0.00000
8. Approximation of diffusion	0.9927	0.00058	0.02276	6.44479	-0.00140
9. Verman et al.	0.9980	0.00017	0.01192	2.63178	0.00046
10. Two-Term with 4 parameters	0.9945	0.00049	0.01978	5.45580	0.00205
11. Midilli et al.	0.9979	0.00018	0.01215	2.85170	0.00001

ตาราง 9 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 70°C กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 450 วัตต์ และความเร็วรอบของถังหมุนเท่ากับ 10 รอบต่อนาที

Models	Statistical parameters for model selection				
	R ²	χ^2	RMSE	%P	MSE
1. Lewis	0.9897	0.00074	0.02601	4.68558	0.00339
2. Page	0.9912	0.00071	0.02403	5.17736	0.00207
3. Modified Page	0.9897	0.00083	0.02601	4.68553	0.00339
4. Henderson & Pabis	0.9910	0.00072	0.02427	4.87858	0.00030
5. Two-Term Exponential	0.9927	0.00058	0.02185	4.68057	0.00112
6. Wang & Singh	0.9828	0.00138	0.03359	6.64781	0.00713
7. Logarithm	0.9911	0.00080	0.02414	4.49757	0.00000
8. Approximation of diffusion	0.9897	0.00083	0.02601	4.68558	0.00339
9. Verman et al.	0.9928	0.00066	0.02183	4.65614	0.00105
10. Two-Term with 4 parameters	0.9910	0.00093	0.02427	4.87853	0.00030
11. Midilli et al.	0.9946	0.00056	0.01882	4.09053	0.00000

ตาราง 10 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 70°C กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 450 วัตต์ และความเร็วรอบของถังหมุนเท่ากับ 20 รอบต่อนาที

Models	Statistical parameters for model selection				
	R ²	χ^2	RMSE	%P	MSE
1. Lewis	0.9991	0.00006	0.00737	0.76191	-0.00075
2. Page	0.9994	0.00005	0.00610	0.75685	-0.00013
3. Modified Page	0.9991	0.00007	0.00737	0.76191	-0.00075
4. Henderson & Pabis	0.9993	0.00006	0.00687	0.67191	0.00021
5. Two-Term Exponential	0.9989	0.00008	0.00817	0.98234	-0.00085
6. Wang & Singh	0.9990	0.00008	0.00796	1.68000	0.00103
7. Logarithm	0.9993	0.00006	0.00657	0.76997	0.00000
8. Approximation of diffusion	0.9991	0.00007	0.00737	0.76191	-0.00075
9. Verman et al.	0.9991	0.00007	0.00737	0.76198	-0.00075
10. Two-Term with 4 parameters	0.9993	0.00007	0.00687	0.67193	0.00021
11. Midilli et al.	0.9995	0.00005	0.00579	0.60747	0.00000

ตาราง 11 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 70°C กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 450 วัตต์ และความเร็วรอบของถังหมุนเท่ากับ 30 รอบต่อนาที

Models	Statistical parameters for model selection				
	R ²	χ^2	RMSE	%P	MSE
1. Lewis	0.9630	0.00272	0.05011	11.51871	-0.00254
2. Page	0.9852	0.00118	0.03164	4.77753	0.00604
3. Modified Page	0.9630	0.00297	0.05011	11.51879	-0.00254
4. Henderson & Pabis	0.9667	0.00267	0.04755	10.79051	0.00363
5. Two-Term Exponential	0.9624	0.00301	0.05046	11.63292	-0.00252
6. Wang & Singh	0.9905	0.00076	0.02541	5.12636	0.00206
7. Logarithm	0.9907	0.00082	0.02506	5.58728	-0.00002
8. Approximation of diffusion	0.9630	0.00297	0.05011	11.51871	-0.00254
9. Verman et al.	0.9903	0.00085	0.02562	5.25973	0.00199
10. Two-Term with 4 parameters	0.9967	0.00327	0.04755	10.79058	0.00363
11. Midilli et al.	0.9904	0.00094	0.02551	6.28188	0.00000

ตาราง 12 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 80°C กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 150 วัตต์ และความเร็วรอบของถังหมุนเท่ากับ 10 รอบต่อนาที

Models	Statistical parameters for model selection				
	R ²	χ^2	RMSE	%P	MSE
1. Lewis	0.9927	0.00061	0.02398	7.61609	-0.00113
2. Page	0.9986	0.00013	0.01063	1.59755	0.00075
3. Modified Page	0.9927	0.00066	0.02398	7.61611	-0.00113
4. Henderson & Pabis	0.9947	0.00047	0.02037	5.97740	0.00270
5. Two-Term Exponential	0.9923	0.00069	0.02463	7.91562	-0.00086
6. Wang & Singh	0.9985	0.00014	0.01089	2.59053	0.00036
7. Logarithm	0.9979	0.00020	0.01275	2.67226	0.00000
8. Approximation of diffusion	0.9927	0.00066	0.02398	7.61609	-0.00113
9. Verman et al.	0.9987	0.00012	0.01004	1.25519	0.00022
10. Two-Term with 4 parameters	0.9947	0.00055	0.02037	5.97755	0.00270
11. Midilli et al.	0.9986	0.00014	0.01039	1.28237	0.00001

ตาราง 13 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 80°C กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 150 วัตต์ และความเร็วรอบของถังหมุนเท่ากับ 20 รอบต่อนาที

Models	Statistical parameters for model selection				
	R ²	χ^2	RMSE	%P	MSE
1. Lewis	0.9635	0.00269	0.05024	11.75169	-0.00586
2. Page	0.9944	0.00044	0.01972	3.77392	0.00370
3. Modified Page	0.9635	0.00288	0.05024	11.75176	-0.00586
4. Henderson & Pabis	0.9724	0.00218	0.04368	9.84413	0.00361
5. Two-Term Exponential	0.9936	0.00051	0.02105	4.22859	0.00341
6. Wang & Singh	0.9952	0.00038	0.01823	3.58001	-0.00092
7. Logarithm	0.9951	0.00042	0.01842	3.65029	0.00005
8. Approximation of diffusion	0.9635	0.00288	0.05024	11.75169	-0.00586
9. Verman et al.	0.9943	0.00048	0.01977	3.98875	0.00319
10. Two-Term with 4 parameters	0.9724	0.00254	0.04368	9.84406	0.00362
11. Midilli et al.	0.9963	0.00034	0.01591	2.87991	-0.00002

ตาราง 14 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 80°C กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 150 วัตต์ และความเร็วรอบของถังหมุนเท่ากับ 30 รอบต่อนาที

Models	Statistical parameters for model selection				
	R ²	χ^2	RMSE	%P	MSE
1. Lewis	0.9914	0.00065	0.02470	6.33908	-0.00252
2. Page	0.9990	0.00008	0.00822	1.49085	0.00087
3. Modified Page	0.9914	0.00070	0.02470	6.33911	-0.00252
4. Henderson & Pabis	0.9942	0.00047	0.02027	5.12696	0.00221
5. Two-Term Exponential	0.9909	0.00074	0.02541	6.54266	-0.00230
6. Wang & Singh	0.9991	0.00008	0.00818	1.15172	-0.00038
7. Logarithm	0.9987	0.00012	0.00971	1.66972	0.00000
8. Approximation of diffusion	0.9914	0.00070	0.02470	6.33908	-0.00252
9. Verman et al.	0.9992	0.00007	0.00749	1.23963	0.00035
10. Two-Term with 4 parameters	0.9942	0.00055	0.02027	5.12709	0.00221
11. Midilli et al.	0.9992	0.00008	0.00752	0.94078	-0.00002

ตาราง 15 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 80°C กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 300 วัตต์ และความเร็วรอบของถังหมุนเท่ากับ 10 รอบต่อนาที

Models	Statistical parameters for model selection				
	R ²	χ^2	RMSE	%P	MSE
1. Lewis	0.9885	0.00086	0.02799	6.62164	-0.00258
2. Page	0.9966	0.00029	0.01531	2.90771	0.00144
3. Modified Page	0.9885	0.00096	0.02799	6.62164	-0.00258
4. Henderson & Pabis	0.9907	0.00077	0.02517	5.59344	0.00205
5. Two-Term Exponential	0.9880	0.00100	0.02853	6.79263	-0.00253
6. Wang & Singh	0.9974	0.00022	0.01342	2.92165	-0.00011
7. Logarithm	0.9967	0.00031	0.01493	3.50872	0.00000
8. Approximation of diffusion	0.9885	0.00096	0.02799	6.62164	-0.00258
9. Verman et al.	0.9885	0.00108	0.02799	6.62154	-0.00258
10. Two-Term with 4 parameters	0.9907	0.00100	0.02517	5.59353	0.00205
11. Midilli et al.	0.9970	0.00032	0.01431	3.20401	0.00002

ตาราง 16 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 80°C กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 300 วัตต์ และความเร็วรอบของถังหมุนเท่ากับ 20 รอบต่อนาที

Models	Statistical parameters for model selection				
	R ²	χ^2	RMSE	%P	MSE
1. Lewis	0.9971	0.00019	0.01313	2.46266	-0.00187
2. Page	0.9988	0.00009	0.00853	1.34418	-0.00006
3. Modified Page	0.9971	0.00021	0.01313	2.46266	-0.00187
4. Henderson & Pabis	0.9978	0.00016	0.01144	2.18171	0.00057
5. Two-Term Exponential	0.9968	0.00024	0.01387	2.56530	-0.00189
6. Wang & Singh	0.9986	0.00011	0.00928	1.46581	0.00003
7. Logarithm	0.9986	0.00012	0.00929	1.46111	0.00000
8. Approximation of diffusion	0.9971	0.00021	0.01313	2.46266	-0.00187
9. Verman et al.	0.9971	0.00024	0.01313	2.46262	-0.00187
10. Two-Term with 4 parameters	0.9978	0.00021	0.01144	2.18170	0.00057
11. Midilli et al.	0.9988	0.00011	0.00852	1.40554	0.00000

ตาราง 17 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 80°C กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 300 วัตต์ และความเร็วรอบของถังหมุนเท่ากับ 30 รอบต่อนาที

Models	Statistical parameters for model selection				
	R ²	χ^2	RMSE	%P	MSE
1. Lewis	0.9753	0.00176	0.04011	7.57416	-0.00749
2. Page	0.9982	0.00014	0.01073	1.83810	0.00021
3. Modified Page	0.9753	0.00193	0.04011	7.57422	-0.00749
4. Henderson & Pabis	0.9845	0.00121	0.03175	5.67270	0.00228
5. Two-Term Exponential	0.9982	0.00014	0.01093	1.91248	0.00024
6. Wang & Singh	0.9960	0.00031	0.01615	1.73590	-0.00304
7. Logarithm	0.9967	0.00029	0.01472	1.58051	-0.00001
8. Approximation of diffusion	0.9753	0.00193	0.04011	7.57416	-0.00749
9. Verman et al.	0.9982	0.00016	0.01086	1.88843	0.00002
10. Two-Term with 4 parameters	0.9845	0.00151	0.03175	5.67270	0.00228
11. Midilli et al.	0.9983	0.00017	0.01055	1.72571	-0.00001

ตาราง 18 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 80°C กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 450 วัตต์ และความเร็วรอบของถังหมุนเท่ากับ 10 รอบต่อนาที

Models	Statistical parameters for model selection				
	R ²	χ^2	RMSE	%P	MSE
1. Lewis	0.9974	0.00020	0.01349	3.92170	0.00045
2. Page	0.9987	0.00011	0.00963	1.99949	-0.00011
3. Modified Page	0.9974	0.00022	0.01349	3.92170	0.00045
4. Henderson & Pabis	0.9979	0.00018	0.01222	3.53447	-0.00120
5. Two-Term Exponential	0.9985	0.00013	0.01026	2.75649	-0.00053
6. Wang & Singh	0.9919	0.00069	0.02403	6.82479	0.00526
7. Logarithm	0.9986	0.00013	0.00989	2.05020	0.00000
8. Approximation of diffusion	0.9974	0.00022	0.01349	3.92170	0.00045
9. Verman et al.	0.9987	0.00012	0.00967	1.85795	0.00014
10. Two-Term with 4 parameters	0.9987	0.00014	0.00965	1.85938	-0.00001
11. Midilli et al.	0.9987	0.00014	0.00954	1.81032	0.00000

ตาราง 19 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 80°C กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 450 วัตต์ และความเร็วรอบของถังหมุนเท่ากับ 20 รอบต่อนาที

Models	Statistical parameters for model selection				
	R ²	χ^2	RMSE	%P	MSE
1. Lewis	0.9810	0.00113	0.03212	5.36445	0.00578
2. Page	0.9843	0.00102	0.02920	6.01022	0.00300
3. Modified Page	0.9810	0.00124	0.03212	5.36445	0.00578
4. Henderson & Pabis	0.9848	0.00099	0.02870	5.61609	0.00062
5. Two-Term Exponential	0.9879	0.00079	0.02558	5.40511	0.00188
6. Wang & Singh	0.9733	0.00174	0.03806	6.15058	0.00913
7. Logarithm	0.9859	0.00102	0.02762	4.50072	0.00000
8. Approximation of diffusion	0.9810	0.00124	0.03212	5.36445	0.00578
9. Verman et al.	0.9884	0.00084	0.02506	5.38049	0.00122
10. Two-Term with 4 parameters	0.9848	0.00124	0.02870	5.61603	0.00062
11. Midilli et al.	0.9964	0.00029	0.01401	2.14606	0.00000

ตาราง 20 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 80°C กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 450 วัตต์ และความเร็วรอบของถังหมุนเท่ากับ 30 รอบต่อนาที

Models	Statistical parameters for model selection				
	R ²	χ^2	RMSE	%P	MSE
1. Lewis	0.9849	0.00131	0.03468	9.13888	-0.00324
2. Page	0.9968	0.00031	0.01600	3.83254	0.00030
3. Modified Page	0.9849	0.00144	0.03468	9.13888	-0.00324
4. Henderson & Pabis	0.9890	0.00105	0.02963	7.15793	0.00305
5. Two-Term Exponential	0.9844	0.00149	0.03523	9.38397	-0.00288
6. Wang & Singh	0.9962	0.00036	0.01741	3.99309	-0.00221
7. Logarithm	0.9947	0.00056	0.02048	5.26944	0.00000
8. Approximation of diffusion	0.9849	0.00144	0.03468	9.13888	-0.00324
9. Verman et al.	0.9849	0.00160	0.03468	9.13890	-0.00324
10. Two-Term with 4 parameters	0.9890	0.00132	0.02963	7.15794	0.00305
11. Midilli et al.	0.9969	0.00037	0.01580	3.54843	0.00003

ตาราง 21 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 90°C กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 150 วัตต์ และความเร็วรอบของถังหมุนเท่ากับ 10 รอบต่อนาที

Models	Statistical parameters for model selection				
	R ²	χ^2	RMSE	%P	MSE
1. Lewis	0.9842	0.00108	0.03152	8.10837	-0.00079
2. Page	0.9920	0.00060	0.02243	4.46472	0.00396
3. Modified Page	0.9842	0.00119	0.03152	8.10837	-0.00079
4. Henderson & Pabis	0.9853	0.00111	0.03040	7.69363	0.00241
5. Two-Term Exponential	0.9838	0.00122	0.03188	8.21920	-0.00080
6. Wang & Singh	0.9968	0.00024	0.01412	1.87266	0.00338
7. Logarithm	0.9982	0.00015	0.01064	1.44127	0.00000
8. Approximation of diffusion	0.9842	0.00119	0.03152	8.10837	-0.00079
9. Verman et al.	0.9842	0.00132	0.03152	8.10837	-0.00079
10. Two-Term with 4 parameters	0.9853	0.00139	0.03040	7.68949	0.00238
11. Midilli et al.	0.9992	0.00007	0.00700	1.56958	0.00000

ตาราง 22 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 90°C กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 150 วัตต์ และความเร็วรอบของถังหมุนเท่ากับ 20 รอบต่อนาที

Models	Statistical parameters for model selection				
	R ²	χ^2	RMSE	%P	MSE
1. Lewis	0.9995	0.00003	0.00507	0.84486	0.00038
2. Page	0.9996	0.00003	0.00471	0.89911	0.00003
3. Modified Page	0.9995	0.00003	0.00507	0.84486	0.00038
4. Henderson & Pabis	0.9996	0.00003	0.00494	0.86691	-0.00004
5. Two-Term Exponential	0.9996	0.00003	0.00487	0.88678	-0.00009
6. Wang & Singh	0.9978	0.00015	0.01113	2.16612	0.00204
7. Logarithm	0.9996	0.00003	0.00491	0.90268	0.00000
8. Approximation of diffusion	0.9995	0.00003	0.00507	0.84486	0.00038
9. Verman et al.	0.9996	0.00003	0.00461	0.89000	-0.00003
10. Two-Term with 4 parameters	0.9996	0.00004	0.00494	0.86694	-0.00004
11. Midilli et al.	0.9997	0.00003	0.00424	0.65716	0.00000

ตาราง 23 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 90°C กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 150 วัตต์ และความเร็วรอบของถังหมุนเท่ากับ 30 รอบต่อนาที

Models	Statistical parameters for model selection				
	R ²	χ^2	RMSE	%P	MSE
1. Lewis	0.9859	0.00090	0.02911	6.86093	-0.00038
2. Page	0.9913	0.00060	0.02289	5.15141	0.00353
3. Modified Page	0.9859	0.00097	0.02911	6.86096	-0.00038
4. Henderson & Pabis	0.9867	0.00092	0.02830	6.74982	0.00210
5. Two-Term Exponential	0.9859	0.00097	0.02911	6.86091	-0.00038
6. Wang & Singh	0.9950	0.00034	0.01729	3.75033	0.00374
7. Logarithm	0.9971	0.00022	0.01324	2.93803	0.00001
8. Approximation of diffusion	0.9859	0.00097	0.02911	6.86093	-0.00038
9. Verman et al.	0.9926	0.00055	0.02110	4.75573	0.00309
10. Two-Term with 4 parameters	0.9867	0.00107	0.02830	6.74984	0.00210
11. Midilli et al.	0.9983	0.00014	0.01011	2.06674	0.00000

ตาราง 24 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 90°C กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 300 วัตต์ และความเร็วรอบของถังหมุนเท่ากับ 10 รอบต่อนาที

Models	Statistical parameters for model selection				
	R ²	χ^2	RMSE	%P	MSE
1. Lewis	0.9983	0.00012	0.01051	1.93803	-0.00145
2. Page	0.9993	0.00005	0.00674	1.33015	-0.00020
3. Modified Page	0.9983	0.00013	0.01051	1.93811	-0.00145
4. Henderson & Pabis	0.9987	0.00010	0.00901	1.54148	0.00046
5. Two-Term Exponential	0.9980	0.00015	0.01129	2.13133	-0.00152
6. Wang & Singh	0.9993	0.00005	0.00664	1.50176	0.00030
7. Logarithm	0.9990	0.00008	0.00783	1.56776	0.00000
8. Approximation of diffusion	0.9983	0.00013	0.01051	1.93803	-0.00145
9. Verman et al.	0.9983	0.00015	0.01051	1.93815	-0.00145
10. Two-Term with 4 parameters	0.9983	0.00012	0.00901	1.54150	0.00046
11. Midilli et al.	0.9994	0.00006	0.00636	1.14918	0.00000

ตาราง 25 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 90°C กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 300 วัตต์ และความเร็วรอบของถังหมุนเท่ากับ 20 รอบต่อนาที

Models	Statistical parameters for model selection				
	R ²	χ^2	RMSE	%P	MSE
1. Lewis	0.9886	0.00071	0.02543	3.59952	0.00480
2. Page	0.9917	0.00057	0.02178	4.96816	0.00240
3. Modified Page	0.9886	0.00078	0.02543	3.59952	0.00480
4. Henderson & Pabis	0.9916	0.00057	0.02182	4.15803	0.00029
5. Two-Term Exponential	0.9943	0.00039	0.01803	4.24552	0.00141
6. Wang & Singh	0.9820	0.00123	0.03199	4.99505	0.00784
7. Logarithm	0.9918	0.00062	0.02160	3.53789	0.00000
8. Approximation of diffusion	0.9886	0.00078	0.02543	3.59952	0.00480
9. Verman et al.	0.9946	0.00041	0.01752	4.20269	0.00095
10. Two-Term with 4 parameters	0.9916	0.00071	0.02182	4.15802	0.00029
11. Midilli et al.	0.9976	0.00020	0.01167	2.56140	0.00000

ตาราง 26 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 90°C กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 300 วัตต์ และความเร็วรอบของถังหมุนเท่ากับ 30 รอบต่อนาที

Models	Statistical parameters for model selection				
	R ²	χ^2	RMSE	%P	MSE
1. Lewis	0.9942	0.00039	0.01880	2.90941	-0.00216
2. Page	0.9974	0.00019	0.01256	1.69445	0.00039
3. Modified Page	0.9942	0.00042	0.01880	2.90941	-0.00216
4. Henderson & Pabis	0.9954	0.00034	0.01683	2.43466	0.00095
5. Two-Term Exponential	0.9939	0.00045	0.01937	3.03312	-0.00227
6. Wang & Singh	0.9973	0.00020	0.01277	1.91385	0.00008
7. Logarithm	0.9972	0.00022	0.01299	1.48404	0.00000
8. Approximation of diffusion	0.9942	0.00042	0.01880	2.90941	-0.00216
9. Verman et al.	0.9975	0.00020	0.01240	1.70736	0.00019
10. Two-Term with 4 parameters	0.9954	0.00043	0.01683	2.43462	0.00095
11. Midilli et al.	0.9975	0.00023	0.01246	1.62037	0.00000

ตาราง 27 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 90°C กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 450 วัตต์ และความเร็วรอบของถังหมุนเท่ากับ 10 รอบต่อนาที

Models	Statistical parameters for model selection				
	R ²	χ^2	RMSE	%P	MSE
1. Lewis	0.9858	0.00106	0.03084	7.40520	0.00094
2. Page	0.9896	0.00087	0.02636	4.77738	0.00389
3. Modified Page	0.9858	0.00119	0.03084	7.40521	0.00094
4. Henderson & Pabis	0.9860	0.00117	0.03063	7.28856	0.00232
5. Two-Term Exponential	0.9856	0.00121	0.03105	7.50796	0.00086
6. Wang & Singh	0.9927	0.00061	0.02214	3.54915	0.00391
7. Logarithm	0.9941	0.00056	0.01987	3.90403	0.00000
8. Approximation of diffusion	0.9858	0.00119	0.03084	7.40520	0.00094
9. Verman et al.	0.9911	0.00085	0.02445	4.23785	0.00362
10. Two-Term with 4 parameters	0.9860	0.00156	0.03063	7.28873	0.00231
11. Midilli et al.	0.9950	0.00056	0.01837	4.52003	0.00000

ตาราง 28 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 90°C กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 450 วัตต์ และความเร็วรอบของถังหมุนเท่ากับ 20 รอบต่อนาที

Models	Statistical parameters for model selection				
	R ²	χ^2	RMSE	%P	MSE
1. Lewis	0.9929	0.00051	0.02148	4.58406	0.00273
2. Page	0.9931	0.00056	0.02119	4.93046	0.00218
3. Modified Page	0.9929	0.00058	0.02148	4.58410	0.00273
4. Henderson & Pabis	0.9934	0.00054	0.02071	4.86832	0.00069
5. Two-Term Exponential	0.9929	0.00058	0.02148	4.58410	0.00273
6. Wang & Singh	0.9892	0.00087	0.02640	4.57305	0.00558
7. Logarithm	0.9940	0.00055	0.01969	3.97177	0.00000
8. Approximation of diffusion	0.9929	0.00058	0.02148	4.58406	0.00273
9. Verman et al.	0.9929	0.00066	0.02147	4.50744	0.00280
10. Two-Term with 4 parameters	0.9934	0.00071	0.02071	4.86832	0.00069
11. Midilli et al.	0.9963	0.00040	0.01542	3.94628	0.00001

ตาราง 29 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 90°C กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 450 วัตต์ และความเร็วรอบของถังหมุนเท่ากับ 30 รอบต่อนาที

Models	Statistical parameters for model selection				
	R ²	χ^2	RMSE	%P	MSE
1. Lewis	0.9808	0.00131	0.03439	7.42243	-0.00012
2. Page	0.9876	0.00095	0.02757	4.40080	0.00444
3. Modified Page	0.9808	0.00148	0.03439	7.42243	-0.00012
4. Henderson & Pabis	0.9813	0.00144	0.03388	7.18299	0.00223
5. Two-Term Exponential	0.9805	0.00150	0.03464	7.55479	-0.00001
6. Wang & Singh	0.9929	0.00054	0.02087	2.23748	0.00401
7. Logarithm	0.9946	0.00047	0.01822	2.51083	0.00000
8. Approximation of diffusion	0.9808	0.00148	0.03439	7.42243	-0.00012
9. Verman et al.	0.9808	0.00169	0.03439	7.42242	-0.00012
10. Two-Term with 4 parameters	0.9813	0.00191	0.03388	7.18298	0.00223
11. Midilli et al.	0.9967	0.00033	0.01416	2.70815	0.00000

ตาราง 30 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 70°C กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 0 วัตต์ และความเร็วยรอบของถังหมุนเท่ากับ 20 รอบต่อนาที

Models	Statistical parameters for model selection				
	R ²	χ^2	RMSE	%P	MSE
1. Lewis	0.9648	0.00222	0.04607	10.18533	-0.00568
2. Page	0.9935	0.00043	0.01974	3.76084	0.00458
3. Modified Page	0.9648	0.00232	0.04607	10.18538	-0.00568
4. Henderson & Pabis	0.9731	0.00177	0.04022	8.78000	0.00287
5. Two-Term Exponential	0.9928	0.00047	0.02077	4.32420	0.00365
6. Wang & Singh	0.9991	0.00006	0.00735	1.13409	0.00090
7. Logarithm	0.9992	0.00006	0.00695	1.15198	0.00001
8. Approximation of diffusion	0.9648	0.00232	0.04607	10.18538	-0.00568
9. Verman et al.	0.9648	0.00244	0.04607	10.18536	-0.00568
10. Two-Term with 4 parameters	0.9731	0.00196	0.04022	8.78007	0.00287
11. Midilli et al.	0.9992	0.00006	0.00725	1.24251	-0.00006

ตาราง 31 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 80°C กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 0 วัตต์ และความเร็วยรอบของถังหมุนเท่ากับ 20 รอบต่อนาที

Models	Statistical parameters for model selection				
	R ²	χ^2	RMSE	%P	MSE
1. Lewis	0.9780	0.00135	0.03574	8.92919	-0.00154
2. Page	0.9857	0.00093	0.02880	6.75992	0.00347
3. Modified Page	0.9780	0.00143	0.03574	8.92918	-0.00154
4. Henderson & Pabis	0.9798	0.00132	0.03431	8.46057	0.00214
5. Two-Term Exponential	0.9866	0.00087	0.02796	6.60115	0.00285
6. Wang & Singh	0.9919	0.00053	0.02167	4.08766	0.00358
7. Logarithm	0.9938	0.00042	0.01890	3.59659	0.00000
8. Approximation of diffusion	0.9780	0.00143	0.03574	8.92918	-0.00154
9. Verman et al.	0.9780	0.00152	0.03574	8.92918	-0.00154
10. Two-Term with 4 parameters	0.9798	0.00149	0.03431	8.46058	0.00214
11. Midilli et al.	0.9957	0.00032	0.01589	2.98764	0.00000

ตาราง 32 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 90°C กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 0 วัตต์ และความเร็วรอบของถังหมุนเท่ากับ 20 รอบต่อนาที

Models	Statistical parameters for model selection				
	R^2	χ^2	RMSE	%P	MSE
1. Lewis	0.9869	0.00083	0.02799	5.63388	-0.00257
2. Page	0.9950	0.00033	0.01726	3.03204	0.00203
3. Modified Page	0.9869	0.00088	0.02799	5.63388	-0.00257
4. Henderson & Pabis	0.9893	0.00072	0.02534	5.00170	0.00170
5. Two-Term Exponential	0.9865	0.00091	0.02846	5.78739	-0.00256
6. Wang & Singh	0.9960	0.00026	0.01539	2.91686	0.00056
7. Logarithm	0.9958	0.00030	0.01591	2.99423	0.00002
8. Approximation of diffusion	0.9869	0.00088	0.02799	5.63388	-0.00257
9. Verman et al.	0.9957	0.00030	0.01598	2.92350	0.00148
10. Two-Term with 4 parameters	0.9893	0.00081	0.02534	5.01238	0.00170
11. Midilli et al.	0.9959	0.00031	0.01559	2.94129	0.00002

จากตาราง 3 - 32 พบว่า แบบจำลองหรือสมการการอบแห้งที่นำมาศึกษาในงานวิจัยนี้ส่วนใหญ่มีค่า R^2 มากกว่า 0.98-0.99 โดยเฉพาะอย่างยิ่งสมการที่ประกอบด้วยพารามิเตอร์มากกว่า 2 ตัวขึ้นไปมีค่า R^2 มากที่สุดและค่าความผิดพลาดต่ำที่สุด เมื่อพิจารณาค่า R^2 และค่าความผิดพลาดทั้งหมดแล้ว พบว่า แบบจำลองที่ 11 (Midilli et al.) เหมาะสมที่สุดสำหรับ fit ข้อมูลที่ได้จากการอบแห้งในทุกสภาวะการอบแห้ง อย่างไรก็ตาม เนื่องจากสมการการอบแห้งของ Midilli et al. ประกอบด้วยพารามิเตอร์ 4 ตัว ซึ่งใช้สำหรับปรับเส้นโค้งให้เข้ากันได้กับข้อมูลจากการทดลอง ดังนั้นการนำไปใช้ในทางปฏิบัติเพื่อศึกษาพฤติกรรมและศึกษาออกแบบสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งของลูกเต๋อยุ่สูงเร็วในงานวิจัยนี้อาจเกิดความยุ่งยาก ดังนั้น เพื่อให้ง่ายต่อการศึกษาในหัวข้อต่อไป จึงได้นำแบบจำลองการอบแห้งของ Page (แบบจำลองหมายเลข 2) ซึ่งมีค่า R^2 สูงกว่า 0.98 และมีค่า χ^2 ค่า RMSE ค่า %P และค่า MSE ต่ำในทุกสภาวะการอบแห้ง ไปใช้เพื่อศึกษาพฤติกรรมการอบแห้งของลูกเต๋อยุ่สูงเร็วที่เตรียมด้วยวิธีการอบแห้งแบบถังหมุนร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟต่อไป

4.1.4 สมการความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ของแบบจำลองการอบแห้งของ Page

แบบจำลองการอบแห้งของ Page เป็นแบบจำลองการอบแห้งที่ใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับการอธิบายพฤติกรรมของการอบแห้งของวัสดุชีวภาพ [53] สมการนี้ได้นำมาเปรียบเทียบกับอัตราส่วนความชื้นของการทดลองโดยมี 2 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิลมร้อน 3 ระดับ ได้แก่ 70 80 และ 90 องศาเซลเซียส ร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ 3 ระดับ ได้แก่ 150 300 และ 450 วัตต์ และความเร็วรอบของถังหมุน 3 ระดับ ได้แก่ 10 20 และ 30 รอบต่อนาที ซึ่งจะได้พารามิเตอร์ของสมการของ Page คือ ค่าคงที่อัตรา (k) ค่าคงที่เลขชี้กำลัง (n) ดังสมการที่ 2 ในตาราง 2 ในแต่ละสภาวะการอบแห้ง นอกจากนี้สามารถประมาณเวลาการอบแห้ง (DT) และค่าสัมประสิทธิ์แพร่ความชื้นประสิทธิผล (D_{eff}) แสดงดังตาราง 33

ตาราง 33 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	10	0.027580	0.903196	97	576.13	0.9936
70	150	20	0.021024	0.922442	104	487.69	0.9959
70	150	30	0.013413	1.084026	84	684.04	0.9805
70	300	10	0.032418	0.941228	65	819.27	0.9985
70	300	20	0.011982	1.046131	102	498.86	0.9935
70	300	30	0.011993	1.126689	72	716.66	0.9947
70	450	10	0.045137	0.935834	51	1200.05	0.9908
70	450	20	0.028714	1.028012	53	1052.85	0.9997
70	450	30	0.007559	1.316059	60	944.62	0.9706
80	150	10	0.016295	1.142551	58	1012.45	0.9960
80	150	20	0.004537	1.371035	76	770.84	0.9700
80	150	30	0.012578	1.160385	66	848.62	0.9942
80	300	10	0.016859	1.171271	50	1107.33	0.9909
80	300	20	0.021989	1.071240	53	969.67	0.9976
80	300	30	0.008010	1.304987	57	920.11	0.9838
80	450	10	0.046965	0.941580	42	1207.07	0.9976
80	450	20	0.037699	0.908756	63	907.74	0.9816
80	450	30	0.015585	1.215727	42	1223.84	0.9909
90	150	10	0.014279	1.167973	61	978.28	0.9760

Drying conditions			Drying model estimates			D_e $\times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$	R^2
T	MW	RPM	k	n	Predicted DT		
90	150	20	0.027081	0.987016	66	850.54	0.9994
90	150	30	0.011673	1.132321	79	728.15	0.9688
90	300	10	0.023581	1.055092	54	967.80	0.9986
90	300	20	0.039367	0.912697	58	944.14	0.9922
90	300	30	0.018352	1.100191	58	915.00	0.9958
90	450	10	0.023191	1.117536	44	1249.96	0.9837
90	450	20	0.039850	0.976095	45	1238.18	0.9911
90	450	30	0.017501	1.161344	49	1119.10	0.9778
70	0	20	0.002738	1.342274	116	476.87	0.9638
80	0	20	0.008044	1.159323	98	588.66	0.9572
90	0	20	0.007607	1.160318	97	555.75	0.9593

ตาราง 33 แสดงค่าคงที่อัตราการอบแห้ง (k) ค่าคงที่เลขชี้กำลัง (n) ของสมการการอบแห้งของ Page เวลาการอบแห้งที่ทำนายจากสมการการอบแห้งของ Page และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (D_e) ที่สภาวะการอบแห้งแตกต่างกัน จากตาราง 33 พบว่า ผลการทดลองทั้งหมดมีค่าเปลี่ยนแปลงตามสภาวะการอบแห้ง

ค่าคงที่อัตรา (k) บ่งบอกถึงประสิทธิภาพการอบแห้ง โดยที่อัตราการอบแห้งสูงจะแสดงด้วยค่า k ที่สูง ดังนั้นพารามิเตอร์นี้ใช้เพื่อกำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดโดยยึดตามค่า k สูงสุด จากตาราง 33 พบว่า ค่าคงที่อัตราการอบแห้งมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 0.002738 - 0.046965 ซึ่งค่าต่ำสุดได้จากการอบแห้งด้วยลมร้อนอย่างเดียวที่อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 80°C ในขณะที่ค่าสูงสุดได้จากการอบแห้งภายใต้อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 80°C ร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ 450 วัตต์ และความเร็วรอบการหมุนของถังเท่ากับ 10 รอบต่อนาที เมื่อพิจารณาผลของการให้ความร้อนเสริมจากคลื่นไมโครเวฟ พบว่า ค่าคงที่อัตราการอบแห้งสำหรับการอบแห้งลูกเดียวหุงสุกเร็วด้วยการอบแห้งแบบถังหมุนร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ มีค่าคงที่อัตราการอบแห้ง (0.007559 - 0.046965) สูงกว่าการใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียว (0.002738 - 0.008044) จากผลการทดลองดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าการเพิ่มการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟนั้นทำให้อัตราการอบแห้งมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟทำให้โมเลกุลของน้ำภายในวัสดุเกิดการหมุนและความร้อนที่ระดับอุณหภูมิค่าหนึ่งซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกดูดซับด้วยโมเลกุลน้ำ ทำให้น้ำในวัสดุเกิดการระเหยและเคลื่อนที่ออกสู่ผิวภายนอกอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้อัตราการการอบแห้งหรือค่าคงที่อัตราการอบแห้ง นั้นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะการอบแห้งที่ใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียว [54]

เนื่องจากปริมาณความร้อนเชิงปริมาตร (volumetric heat) ที่เกิดจากคลื่นไมโครเวฟแปรผันตามกำลังวัตต์ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาอัตราการอบแห้งที่ส่งผลจากการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังวัตต์ไมโครเวฟ โดยตัวแปรที่ศึกษาอยู่ในช่วง 150 – 450 วัตต์ จากตาราง 33 พบว่า ที่ระดับอุณหภูมิของลมร้อนและระดับความเร็วรอบของถังหมวนคงที่ ค่าคงที่อัตราการอบแห้งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น มีความสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ [9], [45], [55] ซึ่งสามารถอธิบายได้จากโมเลกุลของน้ำ (ความชื้น) ภายในลูกเต๋อยุ่สูงดูดซับปริมาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามากขึ้น ส่งผลให้ความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน

นอกจากอุณหภูมิลมร้อนและกำลังวัตต์ไมโครเวฟแล้ว งานวิจัยนี้ยังได้ศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบของถังหมวนต่อพฤติกรรมกรอบแห้งของลูกเต๋อยุ่สูง จากตาราง 33 พบว่าที่อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 70°C ค่าคงที่อัตราการอบแห้งมีค่าลดลงเมื่อความเร็วรอบของถังหมวนมีค่าเพิ่มขึ้นในทุกะดับของกำลังวัตต์ไมโครเวฟ

ตาราง 34 และตาราง 35 แสดงพารามิเตอร์ทางสถิติสำหรับสมการความสัมพันธ์ที่แตกต่างกัน ซึ่งประกอบด้วยสมการเส้นตรง (Linear) สมการพหุนามกำลังสอง (Quadratic) สมการลอการิทึม (Logarithm) สมการกำลัง (Power) และสมการอาร์เรเนียส (Arrhenius) ของค่าคงที่อัตราการอบแห้ง (k) และค่าคงที่เลขชี้กำลัง (n) ตามลำดับ จากตาราง 34 และตาราง 35 พบว่าสมการพหุนามกำลังสองมีความเหมาะสมที่สุดเมื่อพิจารณาค่า R² สูงสุด และค่า RMSE และ %P ต่ำสุด ดังนั้นสมการการอบแห้งของ Page สำหรับใช้ในการอธิบายพฤติกรรมกรอบแห้งลูกเต๋อยุ่สูงด้วยวิธีการอบแห้งแบบถังหมวนร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ จึงสามารถเขียนได้ดังนี้

$$MR = \exp(-kt^n) \quad (13)$$

โดยที่

$$k = 0.265786 - 0.005799(T) + 0.000005(MW) - 0.001471(RPM) + 0.000049(T)(RPM) - 0.000003(MW)(RPM) + 0.00003(T)^2 - 0.000056(RPM)^2 \quad (14)$$

$$n = -6.00262 + 0.167628(T) + 0.001076(MW) + 0.010081(RPM) - 0.000022(T)(MW) - 0.000578(T)(RPM) + 0.00003(MW)(RPM) - 0.000923(T)^2 + 0.000851(RPM)^2 \quad (15)$$

ตาราง 34 พารามิเตอร์ทางสถิติสำหรับการสมการความสัมพันธ์ที่เหมาะสมของค่าคงที่อัตราการอบแห้ง k

Models	Statistical parameters		
	R ²	RMSE	%P
Linear	0.46	0.00849	47.25531
Quadratic	0.69	0.00648	34.15761
Logarithm	0.40	0.00893	48.13224
Power	0.43	0.00875	45.07788
Arrhenius	0.43	0.00875	45.08597

ตาราง 35 พารามิเตอร์ทางสถิติสำหรับการสมการความสัมพันธ์ที่เหมาะสมของค่าคงที่เลขชี้กำลัง n

Models	Statistical parameters		
	R ²	RMSE	%P
Linear	0.21	0.11436	8.48973
Quadratic	0.59	0.08191	5.58626
Logarithm	0.19	0.11716	8.78218
Power	0.17	0.11720	8.82822
Arrhenius	0.17	0.11730	8.85003

4.2 สภาวะการอบแห้งที่เหมาะสม

4.2.1 ผลตอบสนอง

ผลตอบสนองที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย ค่าคงที่อัตราการอบแห้ง (k) ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (D_e) ค่าเวลาประมาณการอบแห้ง (DT) และค่าการใช้พลังงานจำเพาะ (SEC) ที่ปัจจัยสภาวะการอบแห้งที่ศึกษาประกอบด้วย 3 ปัจจัย 3 ระดับ คือ อุณหภูมิลมร้อน (X_1) กำลังวัตต์ไมโครเวฟ (X_2) และความเร็วรอบของถังหมุน (X_3) โดยใช้สมการพหุนามกำลังสอง (Quadratic equation) ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองของแต่ละผลตอบสนองแสดงในตาราง

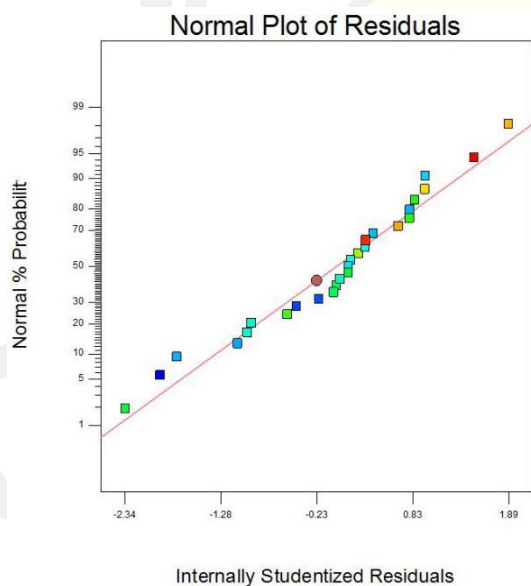
ตาราง 36 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน ANOVA ของ Fitted Model สำหรับผลตอบสนองทั้งหมดที่ใช้ในการหาสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสม

Source	ค่าสัมประสิทธิ์โดยประมาณ			
	k	DT	D _e	SEC
Model (p value)	0.0058 ^b	<0.0001 ^d	<0.0001 ^d	0.0008 ^d
Intercept				
(a ₀)	0.022	61.85	880.11	6.14
Linear terms				
(a ₁) X ₁	0.0008 ^{ns}	-9.67 ^d	111.72 ^d	-0.79 ^b
(a ₂) X ₂	0.0063 ^c	-13.44 ^d	178.15 ^d	1.39 ^d
(a ₃) X ₃	-0.0072 ^c	2.50 ^{ns}	-56.57 ^a	0.69 ^a
Interaction terms				
(a ₁₂) X ₁ X ₂	0.0007 ^{ns}	4.42 ^{ns}	-33.28 ^{ns}	0.27 ^{ns}
(a ₁₃) X ₁ X ₃	0.0049 ^{ns}	2.00 ^{ns}	-15.30 ^{ns}	-0.69 ^{ns}
(a ₂₃) X ₂ X ₃	-0.0045 ^{ns}	0.083 ^{ns}	-5.29 ^{ns}	0.072 ^{ns}
Quadratic terms				
(a ₁₁) X ₁ ²	0.003 ^{ns}	10.44 ^a	-109.11 ^a	0.25 ^{ns}
(a ₂₂) X ₂ ²	0.0024 ^{ns}	0.11 ^{ns}	75.69 ^{ns}	-1.10 ^a
(a ₃₃) X ₃ ²	-0.0056 ^{ns}	-8.39 ^a	98.75 ^a	-0.58 ^{ns}
F value				
Model	4.12	8.65	9.88	5.92
X ₁	0.19	20.45	19.32	8.47
X ₂	10.76	39.55	49.12	26.08
X ₃	13.98	1.37	4.95	6.52
X ₁ X ₂	0.082	2.85	1.14	0.66
X ₁ X ₃	4.29	0.58	0.24	4.28
X ₂ X ₃	3.66	0.001	0.029	0.048
X ₁ ²	0.80	7.96	6.14	0.29
X ₂ ²	0.48	0.0009	2.96	5.43

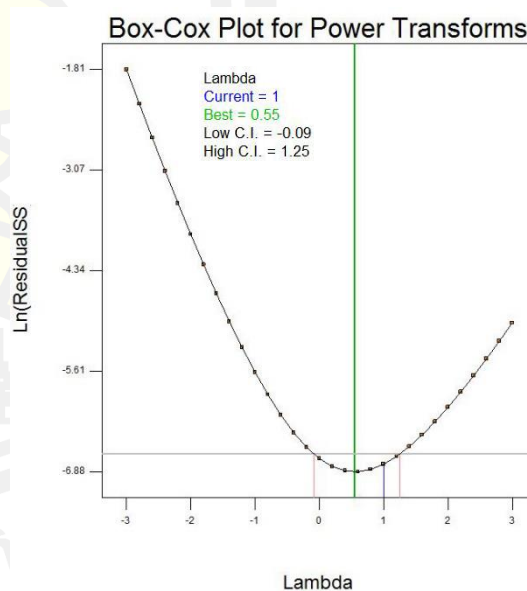
Source	ค่าสัมประสิทธิ์โดยประมาณ			
	k	DT	D _e	SEC
χ^2_3	2.86	5.13	5.03	1.53
R ²	0.6858	0.8208	0.8395	0.7582
Adj.R ²	0.5195	0.7260	0.7546	0.6302
Predicted R ²	0.1989	0.5668	0.5980	0.4196
Adeq. Precision	7.369	11.302	11.748	
C.V. (%)	37.07	14.33	11.68	22.19
Std. Dev.	0.008	9.07	107.84	1.15

ตาราง 36 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของปัจจัยการอบแห้งโดยพิจารณาสมการความสัมพันธ์พหุนามกำลังสองของผลตอบสนองทั้งหมด เมื่อพิจารณาผลตอบสนองค่าคงที่ อัตราการอบแห้ง (k) จากตาราง 36 พบว่า ค่า F value ของแบบจำลองมีค่าเท่ากับ 4.12 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองดังกล่าวมีนัยสำคัญ โดยที่มีโอกาสเพียง 0.58% เท่านั้นที่ค่า Model F-Value ที่มีค่ามากเกิดขึ้นจากสิ่งรบกวน (noise) ค่าของ “Prob > F” มีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่าเทอมของแบบจำลองมีนัยสำคัญ ซึ่งจากตาราง 36 เทอมของกำลังวัตต์ไมโครเวฟและความเร็วรอบมีนัยสำคัญ ค่า Pred R-Squared มีค่าเท่ากับ 0.1989 ซึ่งมีค่าแตกต่างจาก Adj R-Squared (0.5195) มาก ค่าที่มีความแตกต่างกันเช่นนี้อาจแสดงผลของบล็อกที่มีค่ามาก หรืออาจเกิดจากปัญหาที่แบบจำลองหรือข้อมูล หรือทั้งสองอย่าง ดังนั้น ความเป็นไปได้ที่จะทำให้ค่าดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงนั้นคือ การลดจำนวนเทอมของแบบจำลอง การเปลี่ยนฟังก์ชันของผลตอบสนอง หรือการพิจารณาข้อมูลที่มีโดด (outlier) เป็นต้น ค่า Adeq Precision ใช้สำหรับวัดอัตราส่วนของสัญญาณต่อสิ่งรบกวน (signal to noise ratio) ซึ่งปกติอัตราส่วนที่ต้องการมีค่ามากกว่า 4 จากตาราง 36 จะเห็นได้ว่าค่า Adeq Precision มีค่าเท่ากับ 7.369 ซึ่งแสดงสัญญาณที่เพียงพอ (adequate signal) ดังนั้น แบบจำลองนี้จึงสามารถที่จะนำมาใช้เพื่อนำทางไปยังสิ่งที่ต้องการออกแบบได้ จากตาราง 36 จะเห็นได้ว่าค่า F value ของปัจจัยความเร็วรอบของถังหมวนมีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 13.98 รองลงมาคือปัจจัยกำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 10.76 และอุณหภูมิหมวนมีค่าต่ำที่สุดเท่ากับ 0.19 แสดงให้เห็นว่าปัจจัยของความเร็วรอบของถังหมวนส่งผลต่อค่าคงที่อัตราการอบแห้งมากที่สุด รองลงมาคือกำลังวัตต์ไมโครเวฟ และอุณหภูมิหมวน ตามลำดับ

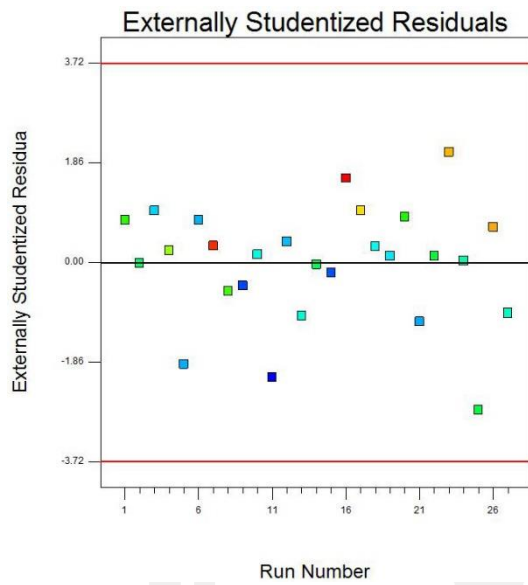
ภาพประกอบ 13 แสดงกราฟสรุปการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อตรวจสอบการแจกแจงปกติของเศษเหลือ (ภาพประกอบ 13(ก)) เพื่อตรวจสอบการแปลงฟังก์ชันโดยใช้การพล็อตแบบ Box-Cox (ภาพประกอบ 13(ข)) เพื่อหาข้อมูลที่ไม่เข้าพวก (ภาพประกอบ 13(ค)) และเพื่อตรวจสอบค่าผิดพลาดของค่าคงที่ (ภาพประกอบ 13(ง)) จากภาพประกอบ 13(ก) จะเห็นได้ว่าค่าเศษเหลือมีค่าอยู่ใกล้กับเส้นทแยงมุมซึ่งแทนข้อมูลที่มีการกระจายแบบปกติ ภาพประกอบ 13(ข) แสดงพล็อตการแปลงฟังก์ชันกำลังของ Box-Cox [60], [61] ซึ่งเป็นการแปลงปรับข้อมูลให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันกำลัง (power transform) ทำให้ข้อมูลที่มีการกระจายแบบปกติ จากภาพประกอบดังกล่าวพบว่าค่าปัจจุบันมีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งมีค่าต่างจากค่าที่ดีที่สุดมีค่าเท่ากับ 0.55 อย่างไรก็ตาม เนื่องจากค่าปัจจุบันอยู่ในช่วงค่าต่ำสุด (-0.09) และค่าสูงสุด (1.25) ดังนั้น แบบจำลองนี้จึงไม่จำเป็นต้องทำการแปลงฟังก์ชันกำลัง ภาพประกอบ 13(ค) และ 13(ง) แสดงการพล็อตระหว่างค่าเศษเหลือ (residuals) กับหมายเลขการทดลอง (run number) และค่าเศษเหลือกับค่าคงที่อัตราการอบแห้งที่ทำนายได้จากแบบจำลอง (predicted drying-rate constant) จากภาพประกอบดังกล่าวจะเห็นได้ว่าค่าเศษเหลือมีการกระจายแบบสุ่มรอบเส้นค่าที่เท่ากับ 0 ดังนั้น จึงถือได้ว่าเป็นการพล็อตเศษเหลือที่ดีและเป็นข้อยืนยันว่าแบบจำลองของค่าคงที่อัตราการอบแห้งสามารถนำไปใช้ในการประมาณค่าได้อย่างดีโดยไม่มีค่าผิดพลาดมาก



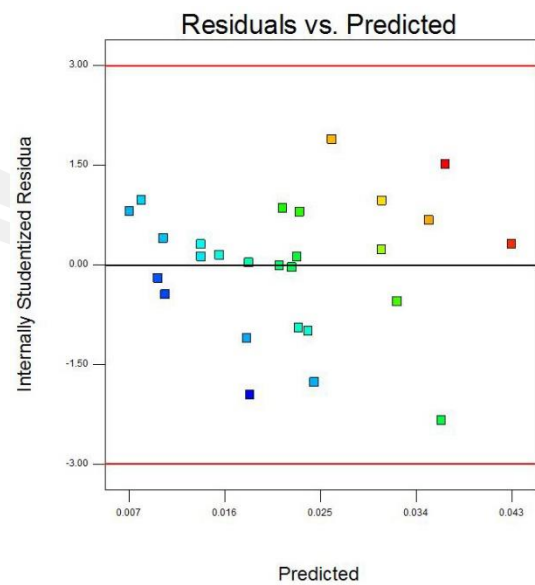
(ก)



(ข)

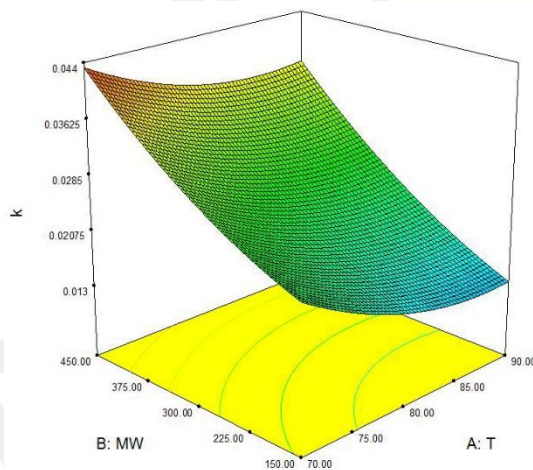


(ค)

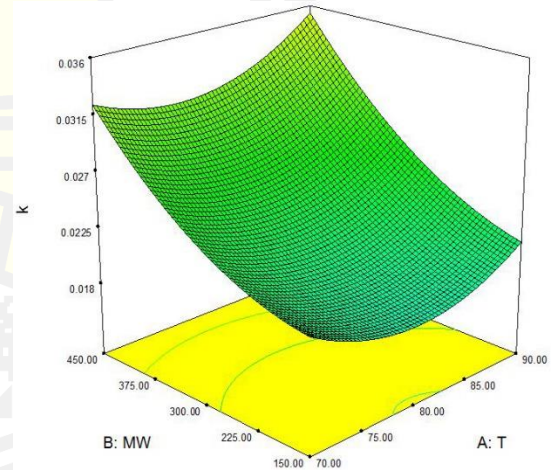


(ง)

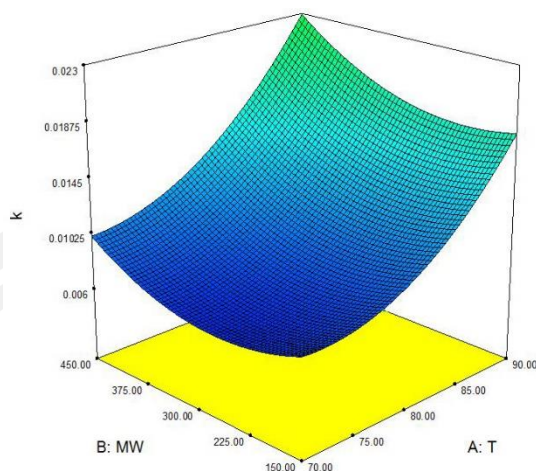
ภาพประกอบ 13 พล็อตของ (ก) normal probability vs. studentized residuals (ข) Box-Cox for power transformation (ค) residual against run number และ (ง) residuals against predicted drying-rate constant



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพประกอบ 14 ผลของอุณหภูมิและกำลังวัตต์ไมโครเวฟต่อค่าคงที่อัตราการอบแห้งที่ความเร็วรอบของถังหมุนเท่ากับ (ก) 10 rpm (ข) 20 rpm และ (ค) 30 rpm

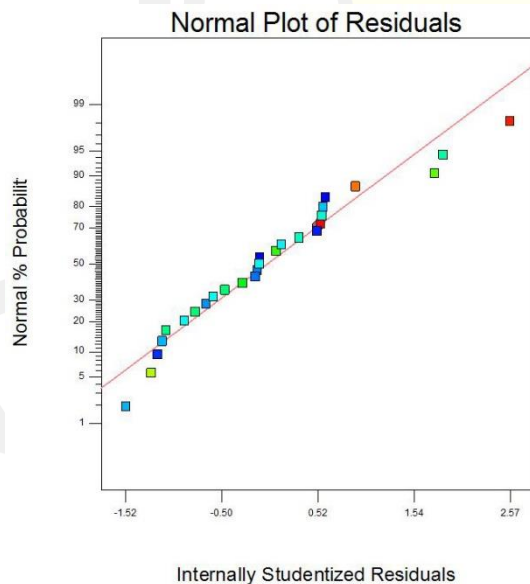
ภาพประกอบ 14 แสดงกราฟ 3 มิติของผลตอบสนองค่าคงที่อัตราการอบแห้งที่ส่งผลจากปัจจัยอุณหภูมิมร้อน (T) และกำลังวัตต์ไมโครเวฟ (MW) ที่ความเร็วรอบของถังหมุนเท่ากับ 10 รอบต่อนาที (ภาพประกอบ 14(ก)) 20 รอบต่อนาที (ภาพประกอบ 14(ข)) และ 30 รอบต่อนาที (ภาพประกอบ 14(ค)) จากภาพประกอบ 12 พบว่าทั้งอุณหภูมิมร้อนและกำลังวัตต์ไมโครเวฟมีผลกระทบในเชิงบวกต่อค่าคงที่อัตราการอบแห้งโดยที่ค่าคงที่อัตราการอบแห้งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิมร้อนและกำลังวัตต์ไมโครเวฟเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะที่ความเร็วรอบของถังหมุนเท่ากับ 10 รอบต่อนาที ซึ่งจะเห็นได้ว่าอิทธิพลในเชิงบวกเห็นได้เด่นชัดเมื่อเปรียบเทียบที่ความเร็วรอบที่สูงขึ้น ภาพประกอบ 14(ก) แสดงกราฟเส้นรูปร่าง (contour plot) ของค่าคงที่อัตราการอบแห้งที่ความเร็วรอบเท่ากับ 10 รอบต่อนาที จากภาพดังกล่าวพบว่าปัจจัยของกำลังวัตต์ไมโครเวฟมีอิทธิพลมากที่สุดที่อุณหภูมิมร้อนเท่ากับ 70°C ซึ่งมีค่าคงที่อัตราการอบแห้งสูงสุดประมาณ 0.044 ที่กำลังวัตต์เท่ากับ 450 วัตต์และอุณหภูมิมร้อนเท่ากับ 70°C ส่วนค่าต่ำสุดมีค่าประมาณ 0.013 ที่สภาวะอุณหภูมิมร้อนเท่ากับ 90°C และกำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 150 วัตต์ เมื่อเพิ่มความเร็วรอบของถังหมุนเป็น 20 รอบต่อนาที (ดังแสดงในภาพประกอบ 14(ข)) พบว่าค่าคงที่อัตราการอบแห้งมีค่าสูงสุดประมาณ 0.036 ภายใต้สภาวะการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนอุณหภูมิมเท่ากับ 90°C ร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟที่กำลังวัตต์เท่ากับ 450 วัตต์ ในขณะที่ค่าต่ำสุดมีค่าประมาณ 0.02 ที่สภาวะอุณหภูมิมร้อนเท่ากับ 80°C และกำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 150 วัตต์ เมื่อพิจารณาลักษณะของกราฟเส้น

รูปร่างดังแสดงในภาพประกอบ 14(ข) แล้ว จะสังเกตได้ว่าอิทธิพลของปัจจัยกำลังวัตต์ไมโครเวฟมีผลต่อค่าคงที่อัตราการอบแห้งมีความสัมพันธ์แปรผันตรง ในขณะที่อิทธิพลของอุณหภูมิมีผลต่อค่าคงที่อัตราการอบแห้งมีความสัมพันธ์แบบเส้นโค้งกับค่าคงที่อัตราการอบแห้งโดยค่าต่ำสุดอยู่ที่อุณหภูมิ 80 °C อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาความเร็วรอบที่ 30 รอบต่อนาที ลักษณะของกราฟเส้นโค้งรูปร่างดังภาพประกอบ 15(ค) กลับมีความแตกต่างกับกราฟในภาพประกอบ 15(ก) และ 15(ข) ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 10 และ 20 รอบต่อนาที ตามลำดับ โดยกำลังวัตต์ไมโครเวฟและอุณหภูมิมีผลส่งผลให้ค่าคงที่อัตราการอบแห้งมีแนวโน้มลดลง โดยค่าสูงสุดมีค่าประมาณ 0.023 ที่สภาวะอุณหภูมิมีผลเท่ากับ 90 °C และกำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 450 วัตต์ ในขณะที่ค่าต่ำสุดมีค่าเพียง 0.006 ได้จากการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนที่อุณหภูมิ 70 °C ร่วมกับการให้ความร้อนเสริมด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ 300 วัตต์ จากภาพประกอบ 15(ค) จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิมีผลเท่ากับ 70 °C ค่าคงที่อัตราการอบแห้งมีค่าต่ำสุดที่อุณหภูมิ และปัจจัยกำลังวัตต์ไมโครเวฟมีอิทธิพลเพียงเล็กน้อยหรือแทบไม่แตกต่างกัน ซึ่งแตกต่างจากผลที่ได้จากความเร็วรอบ 10 และ 20 รอบต่อนาที ดังแสดงในภาพประกอบ 15(ก) และ 15(ข) ตามลำดับ ในขณะที่มีอิทธิพลเชิงบวกเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น จากข้อสังเกตดังกล่าวอาจอธิบายได้โดยลักษณะการเคลื่อนที่ของวัสดุที่แห้งสุกที่มีการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาในแนวราบตามการหมุนของเกลียวลำเลียงภายในถังหมวน เวลาในการกลับทิศทางการเคลื่อนที่อาจไม่เหมาะสม ทำให้เกิดการสะสมของวัสดุที่บริเวณซ้ายสุดหรือขวาสุดของถังหมวนก่อนการเคลื่อนที่กลับในทิศทางตรงกันข้าม ลักษณะการสะสมของวัสดุเช่นนี้อาจส่งผลให้เกิดความไม่สม่ำเสมอในการแลกเปลี่ยนความร้อนจากลมร้อนและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งทำให้เกิดการระเหยของความชื้นที่ไม่สม่ำเสมอเช่นเดียวกัน

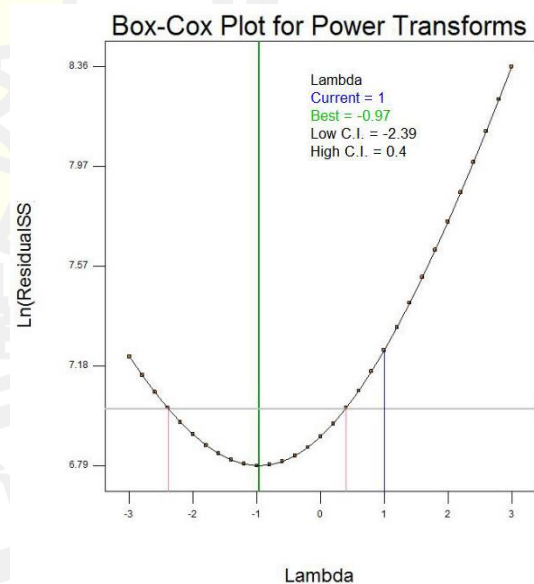
เมื่อพิจารณาผลตอบสนองเวลาการอบแห้ง (DT) จากตาราง 36 พบว่า ค่า F value ของแบบจำลองมีค่าเท่ากับ 8.65 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองดังกล่าวมีนัยสำคัญ โดยที่มีโอกาสเพียง 0.01% เท่านั้นที่ค่า Model F-Value ที่มีค่ามากเกิดขึ้นจากสิ่งรบกวน (noise) ค่าของ “Prob > F” มีค่าน้อยกว่า 0.0001 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่าเทอมของแบบจำลองมีนัยสำคัญ ซึ่งจากตาราง 36 เทอมของพารามิเตอร์เชิงเดี่ยว (monomial parameter) ของอุณหภูมิมีผลและกำลังวัตต์ไมโครเวฟมีนัยสำคัญที่ $p < 0.001$ ในขณะที่พารามิเตอร์เชิงเดี่ยวของความเร็วรอบของถังหมวนและเทอมของปฏิสัมพันธ์ (interaction terms) ไม่มีนัยสำคัญ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาเทอมกำลังสอง (quadratic term) ของพารามิเตอร์อุณหภูมิมีผลและความเร็วรอบของถังหมวนมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น $p < 0.05$ ในขณะที่เทอมกำลังสองของกำลังวัตต์ไมโครเวฟไม่มีนัยสำคัญ จากตาราง 36 ค่า Pred R-Squared มีค่าเท่ากับ 0.5668 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่า Adj R-Squared (0.7260) ค่า Adeq Precision ใช้สำหรับวัดอัตราส่วนของสัญญาณต่อสิ่งรบกวน (signal to noise ratio) ซึ่งปกติอัตราส่วนที่ต้องการมีค่ามากกว่า 4 จากตาราง 36 จะเห็นได้ว่าค่า Adeq Precision มีค่าเท่ากับ

11.302 ซึ่งแสดงสัญญาณที่เพียงพอ (adequate signal) ดังนั้น แบบจำลองนี้จึงสามารถที่จะนำมาใช้เพื่อนำทางไปยังสิ่งที่ต้องการออกแบบได้ เมื่อพิจารณาค่า F value จากตาราง 36 จะเห็นได้ว่าค่า F value ของปัจจัยของกำลังวัตต์ไมโครเวฟมีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 39.55 รองลงมาคืออุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 20.45 และความเร็วรอบของถังหมุ่นมีค่าต่ำที่สุดเท่ากับ 1.37 แสดงให้เห็นว่าปัจจัยของกำลังวัตต์ไมโครเวฟส่งผลต่อเวลาการอบแห้งมากที่สุด รองลงมาคืออุณหภูมิลมร้อน และความเร็วรอบของถังหมุ่น ตามลำดับ

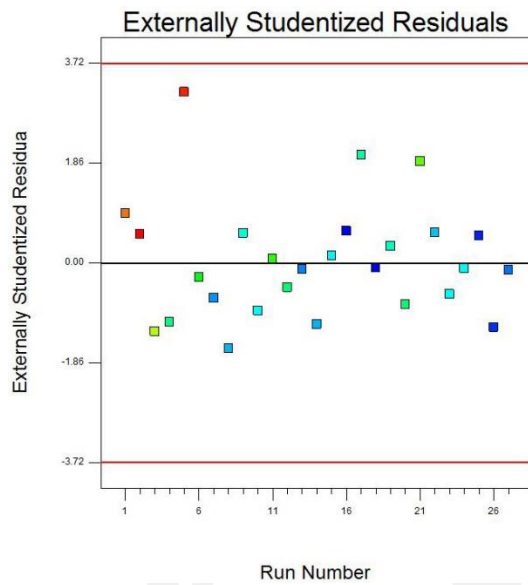
ภาพประกอบ 13(ก) แสดงตำแหน่งของเศษเหลือบนเส้นตรงซึ่งเป็นสิ่งยืนยันถึงการกระจายแบบปกติที่ดีของเศษเหลือ อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาพล็อตของ Box-Cox ในภาพประกอบ 13(ข) พบว่าค่าปัจจุบันของแลมดา (λ) มีค่าเท่ากับ 1 ในขณะที่ค่าที่ดีที่สุดมีค่าเท่ากับ -0.97 ซึ่งมีค่าแตกต่างกันมาก อีกทั้งค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดที่ช่วงความเชื่อมั่น 95% (CI 95%) มีค่าอยู่ในช่วง -2.39 ถึง 0.4 ในกรณีเช่นนี้ ค่าแลมดาที่ดีที่สุดควรเลือกที่ค่าแลมดาเท่ากับ -1 ดังนั้น ควรใช้การแปลงฟังก์ชันแบบอินเวอร์ส (inverse transformation) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลตอบสนอง (1/DT) จากภาพประกอบ 13(ค) และ 13(ง) ค่าเศษเหลืออยู่ในช่วง (เส้นสีแดง) และกระจายอย่างสม่ำเสมอตามเส้นคงที่เท่ากับ 0 ดังนั้น สิ่งที่จะทำให้เกิดรูปแบบไม่เชิงเส้น (nonlinear pattern) หรือความแปรปรวนที่ไม่เท่ากัน (unequal variance) อาจเป็นไปได้และการประมาณแบบจำลองนั้นดีโดยไม่มีข้อผิดพลาดหลัก



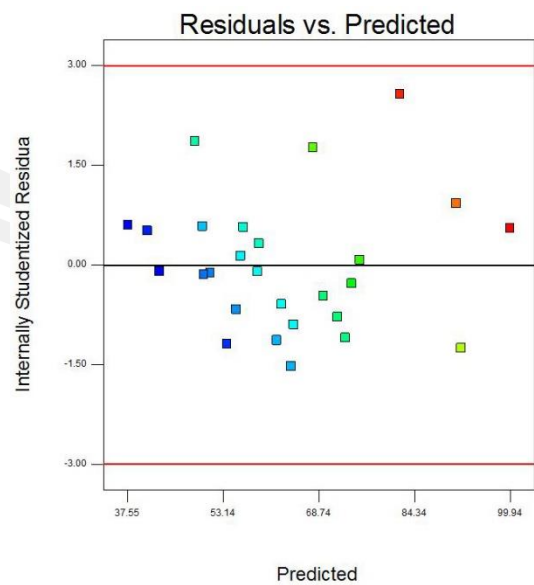
(ก)



(ข)

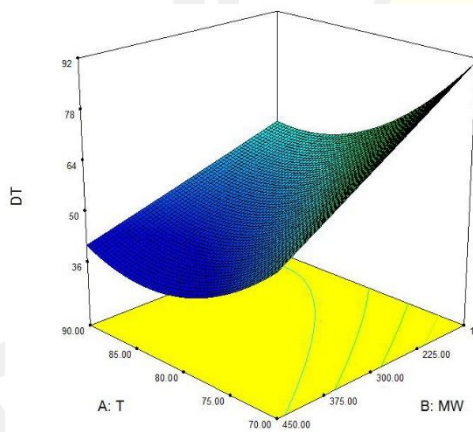


Run Number
(ค)

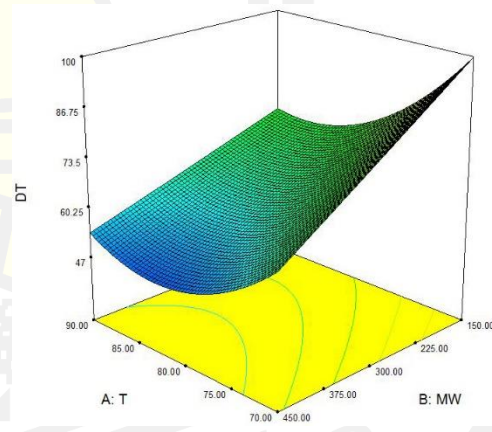


Predicted
(ง)

ภาพประกอบ 15 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

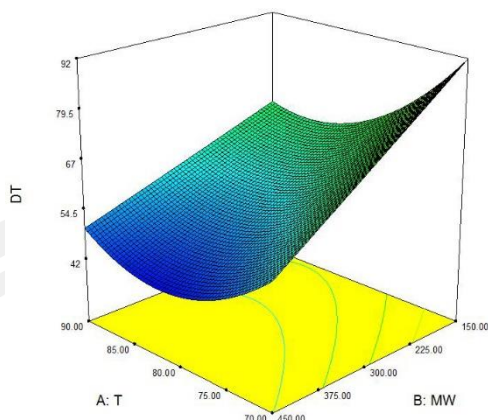


(ก)



(ข)

พหุบัน ปณฺ ทิโต ชิว



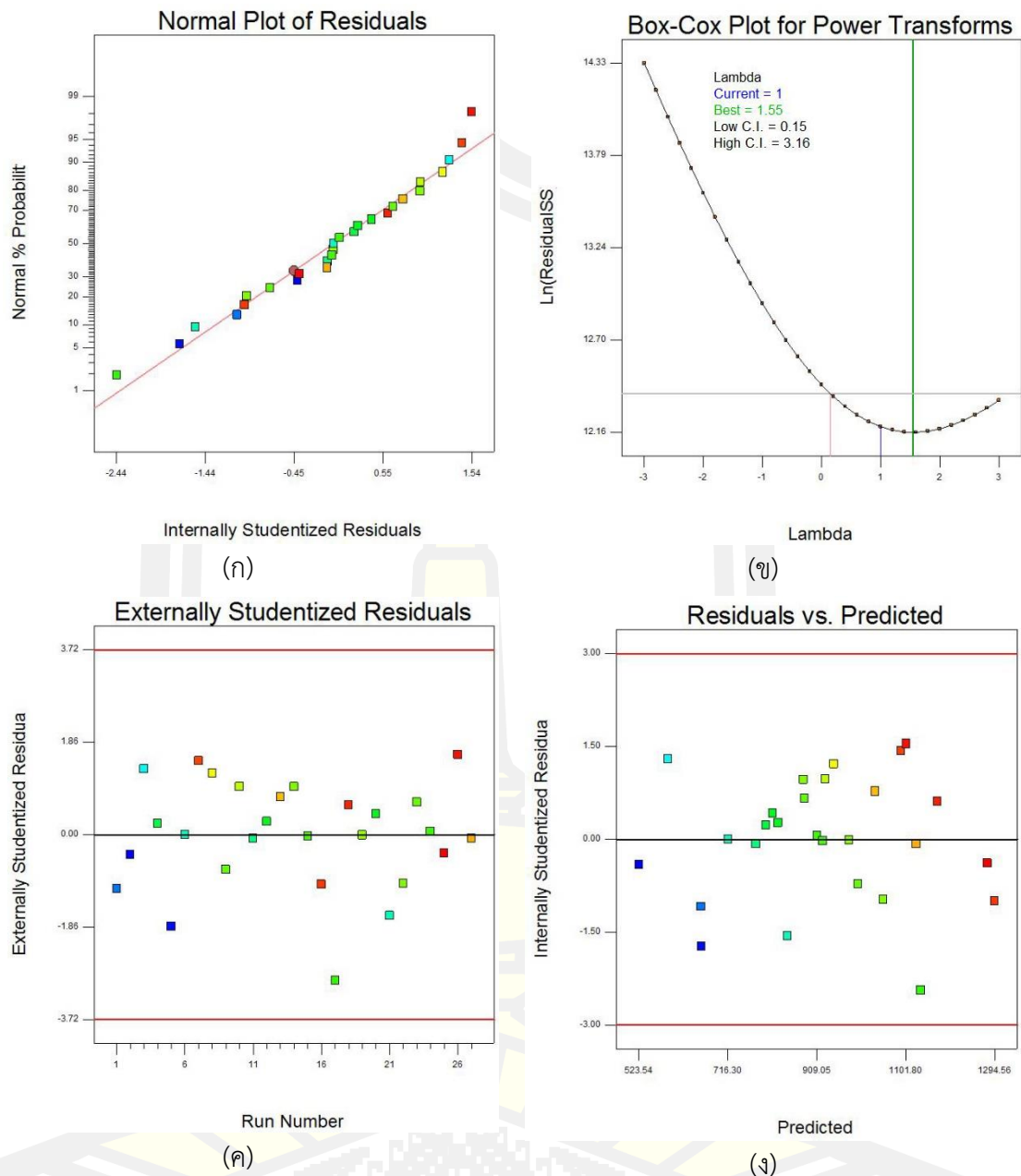
(ค)

ภาพประกอบ 16 ผลของอุณหภูมิและกำลังวัตต์ไมโครเวฟต่อเวลาการอบแห้งที่ความเร็วรอบของถังหมุนเท่ากับ (ก) 10 rpm (ข) 20 rpm และ (ค) 30 rpm

ภาพประกอบ 16 แสดงกราฟเส้นโค้งรูปร่างของเวลาการอบแห้ง (DT) ที่ทำนายจากสมการการอบแห้งของ Page (สมการ 13-15) โดยภาพประกอบ 16(ก) แสดงกราฟเส้นโค้งรูปร่างของเวลาการอบแห้งที่เป็นฟังก์ชันของปัจจัยอุณหภูมิลมร้อน (T) และปัจจัยกำลังวัตต์ไมโครเวฟ (MW) ที่ความเร็วรอบของถังหมุนเท่ากับ 10 รอบต่อนาที ส่วนภาพประกอบ 16(ข) และ 16(ค) แสดงผลการทดลองที่ความเร็วรอบเท่ากับ 20 และ 30 รอบต่อนาที ตามลำดับ จากภาพประกอบ 16 จะสังเกตเห็นว่าลักษณะของเส้นโค้งรูปร่าง 3 มิติที่ความเร็วรอบทั้งสามระดับมีลักษณะแนวโน้มไปในทางเดียวกัน โดยอุณหภูมิลมร้อนและกำลังวัตต์ไมโครเวฟส่งผลในเชิงลบต่อเวลาการอบแห้ง ลักษณะของแนวโน้มเช่นนี้สอดคล้องกับค่าคงที่อัตราการอบแห้งซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปัจจัยทั้งสองเพิ่มขึ้น ดังนั้น เวลาในการอบแห้งที่ต้องการลดความชื้นจากความชื้นเริ่มต้นจนถึงความชื้นสุดท้าย (10% db) จึงใช้เวลาน้อยกว่า เมื่อพิจารณาผลของความเร็วรอบที่มีต่อเวลาการอบแห้งพบว่า ที่ความเร็วรอบ 10 รอบต่อนาที (ภาพประกอบ 16(ก)) เวลาการอบแห้งต่ำสุดมีค่าประมาณ 36-38 นาที ที่อุณหภูมิลมร้อนในช่วง 80-90°C และกำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 450 วัตต์ ในขณะที่ใช้เวลานานที่สุดประมาณ 92 นาที โดยใช้ลมร้อนที่อุณหภูมิ 70°C ร่วมกับการให้ความร้อนเสริมด้วยไมโครเวฟเท่ากับ 150 วัตต์ ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 20 รอบต่อนาที (ภาพประกอบ 16(ข)) และ 30 รอบต่อนาที (ภาพประกอบ 16(ค)) มีลักษณะเส้นโค้งรูปร่างคล้ายกันโดยค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดได้จากสภาวะการอบแห้งที่อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 80-90°C ร่วมกับการใช้ไมโครเวฟ 450 วัตต์ และใช้ลมร้อนอุณหภูมิ 70°C ร่วมกับการใช้ไมโครเวฟ 150 วัตต์ ตามลำดับ เมื่อพิจารณาอิทธิพลของความเร็วรอบของถังหมุนพบว่า ที่ความเร็ว

รอบ 10 รอบต่อนาที ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยที่สุดซึ่งสอดคล้องกับค่าคงที่อัตราการอบแห้งที่สูงสุดที่สังเกตได้จากความเร็วรอบเดียวกันนี้

จากการวิเคราะห์ทางสถิติของการตอบสนองค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (D_e) ดังแสดงในตาราง 36 พบว่า ค่า p value ของแบบจำลองกำลังสองของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (D_e) มีค่าน้อยกว่า 0.0001 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.05 และค่า F value มีค่าเท่ากับ 9.88 (มีค่ามากกว่า 4) แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองดังกล่าวนี้มีนัยสำคัญ โดยมีโอกาสเพียง 0.01% เท่านั้นที่ค่า Model F-Value ที่มีค่ามากเกิดขึ้นจากสิ่งรบกวน (noise) จากตาราง 36 เทอมของพารามิเตอร์เชิงเดียวของทุกปัจจัยมีนัยสำคัญ โดยปัจจัยของอุณหภูมิลมร้อนและกำลังวัตต์ไมโครเวฟมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น $p < 0.001$ ในขณะที่ปัจจัยความเร็วรอบมีนัยสำคัญที่ระดับ $p < 0.05$ อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาเทอมของปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยของแบบจำลอง จะเห็นได้ว่าทุกเทอมไม่มีนัยสำคัญในกรณีของเทอมของปัจจัยกำลังสอง จะเห็นได้ว่าเทอมกำลังของปัจจัยอุณหภูมิลมร้อนและความเร็วรอบของถังหมุนมีนัยสำคัญที่ระดับ $p < 0.05$ ในขณะที่เทอมกำลังสองของกำลังวัตต์ไมโครเวฟไม่มีนัยสำคัญ ค่า Pred R-Squared มีค่าเท่ากับ 0.5980 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่า Adj R-Squared (0.7546) ส่วนค่า Adeq Precision มีค่าเท่ากับ 11.748 ซึ่งแสดงสัญญาณที่เพียงพอ (adequate signal) ดังนั้น แบบจำลองนี้จึงสามารถที่จะนำมาใช้เพื่อนำทางไปยังสิ่งที่ต้องการออกแบบได้ เมื่อพิจารณาค่า F value จากตาราง 36 จะเห็นได้ว่าค่า F value ของปัจจัยของกำลังวัตต์ไมโครเวฟมีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 49.12 รองลงมาคืออุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 19.32 และความเร็วรอบของถังหมุนมีค่าต่ำที่สุดเท่ากับ 4.95 แสดงให้เห็นว่าปัจจัยของกำลังวัตต์ไมโครเวฟส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลมากที่สุด รองลงมาคืออุณหภูมิลมร้อน และความเร็วรอบของถังหมุน ตามลำดับ



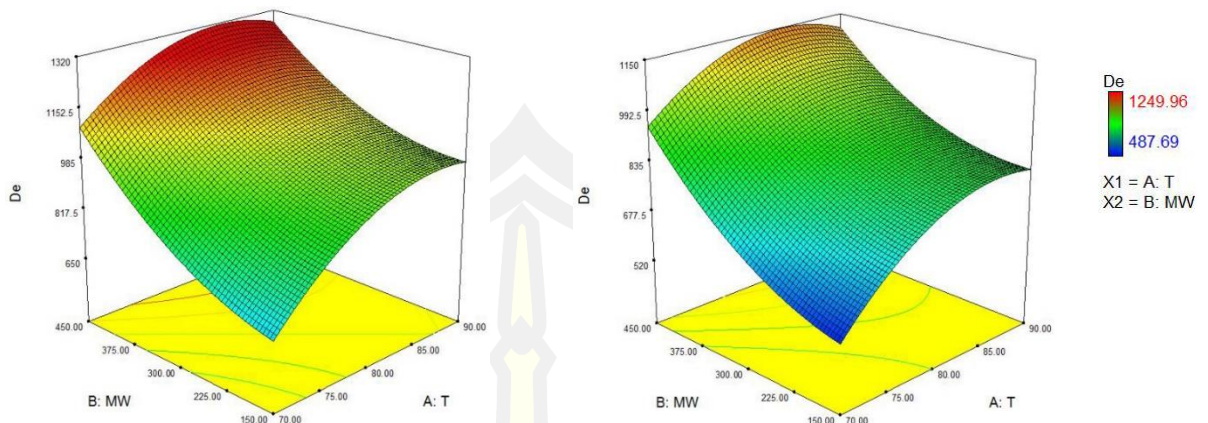
ภาพประกอบ 17 พล็อตของ (ก) normal probability vs. studentized residuals (ข) Box-Cox for power transformation (ค) residual against run number และ (ง) residuals against predicted effective diffusivity coefficient

สรุปพล็อตการวินิจฉัย (diagnostics plots) และสถิติของแบบจำลองสำหรับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (D_e) แสดงในภาพประกอบ 17 จากภาพประกอบ 17(ก) พบว่าค่าเศษเหลือมีค่าอยู่บนตำแหน่งของเส้นทแยงมุมโดยไม่ต้องมีการปรับเปลี่ยนใดๆ แสดงถึงการแจกแจงแบบปกติ ซึ่งสามารถยืนยันได้จากค่าแลมดาปัจจุบัน (1) ที่มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ดีที่สุด (1.55) ดังแสดงในพล็อต

Box-Cox (ภาพประกอบ 17(ข)) โดยค่าปัจจุบันมีค่าอยู่ในช่วง 0.15 ถึง 3.16 ดังนั้น จึงไม่จำเป็นต้องทำการแปลงฟังก์ชัน ภาพประกอบ 17(ค) และ 17(ง) แสดงการพล็อตระหว่างเศษเหลือกับหมายเลขการทดลองและระหว่างเศษเหลือกับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลที่ทำนายจากแบบจำลองตามลำดับ จากภาพประกอบดังกล่าวพบว่าค่าเศษเหลือกระจายรอบเส้นค่าคงที่เท่ากับ 0 แสดงให้เห็นว่าพล็อตเศษเหลือดังกล่าวนี้ดีซึ่งเป็นสิ่งยืนยันได้ว่าแบบจำลองเข้ากันได้ดีกับข้อมูลที่จากการทดลอง

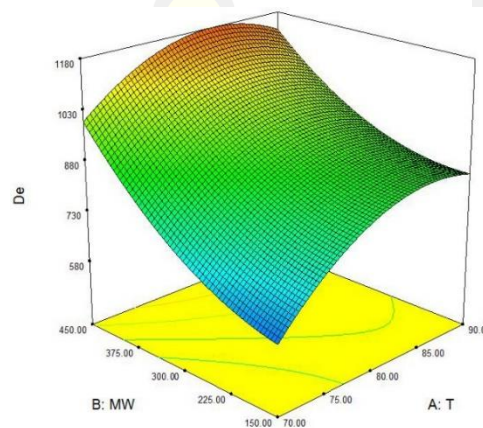
ภาพประกอบ 18 แสดงเส้นโค้งแสดงรูปร่างสามมิติของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (D_e) ที่เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิความร้อน (T) และกำลังวัตต์ไมโครเวฟ (MW) ที่ระดับความเร็วรอบของถึงหมุน 10 รอบต่อนาที (ภาพประกอบ 18(ก)) 20 รอบต่อนาที (ภาพประกอบ 18(ข)) และ 30 รอบต่อนาที (ภาพประกอบ 18(ค))

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (D_e) คือพารามิเตอร์แสดงกลไกการอบแห้งของวัสดุในช่วงการอบแห้งแบบอัตราลดลง (falling-rate period) ซึ่งค่าสูงแสดงถึงน้ำหรือความชื้นภายในวัสดุสามารถแพร่จากข้างในสู่ผิวภายนอกของวัสดุได้เร็ว ส่งผลให้อัตราการอบแห้งสูงและเวลาในการอบแห้งสั้น [62] จากภาพประกอบ 18 พบว่าที่ทุกระดับของความเร็วรอบมีลักษณะของเส้นโค้งแสดงรูปร่างคล้ายกัน คือทั้งปัจจัยอุณหภูมิความร้อนและกำลังวัตต์ไมโครเวฟมีอิทธิพลเชิงบวกต่อค่า D_e โดยปัจจัยกำลังวัตต์ไมโครเวฟมีลักษณะความสัมพันธ์เชิงเส้น ในขณะที่อุณหภูมิความร้อนมีลักษณะความสัมพันธ์กับค่า D_e เป็นเส้นโค้ง ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 10 รอบต่อนาที (ดังแสดงในภาพประกอบ 16(ก)) พบว่า ค่า D_e มีค่าสูงสุดเท่ากับ $1320 \times 10^{-8} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ ที่สภาวะอุณหภูมิความร้อนเท่ากับ 85°C และกำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 450 วัตต์ ในขณะที่ค่าต่ำสุดซึ่งมีค่าประมาณ $650 \times 10^{-8} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ ได้จากการอบแห้งภายใต้สภาวะอุณหภูมิความร้อนและกำลังวัตต์ไมโครเวฟต่ำสุด เมื่อเพิ่มความเร็วรอบกลับส่งผลให้ค่า D_e มีแนวโน้มลดลง โดยที่ความเร็วรอบเท่ากับ 20 รอบต่อนาที ค่า D_e อยู่ในช่วง $520 \times 10^{-8} - 1150 \times 10^{-8} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ และที่ความเร็วรอบเท่ากับ 30 รอบต่อนาที ค่า D_e อยู่ในช่วง $580 \times 10^{-8} - 1180 \times 10^{-8} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ โดยค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดได้จากสภาวะการอบแห้งเดียวกันนั้น คือ ที่อุณหภูมิความร้อนเท่ากับ 70°C ร่วมกับไมโครเวฟ 150 วัตต์ มีค่า D_e ต่ำสุด และที่สภาวะอุณหภูมิความร้อนเท่ากับ 85°C ร่วมกับไมโครเวฟ 450 วัตต์ มีค่า D_e สูงสุด



(ก)

(ข)



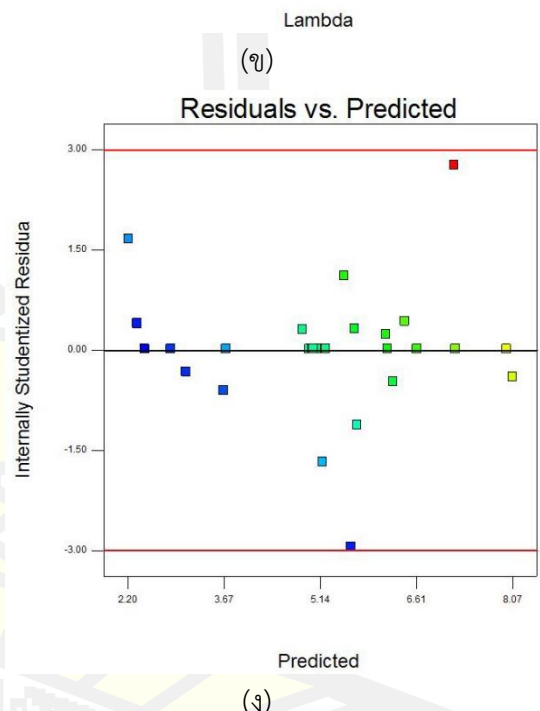
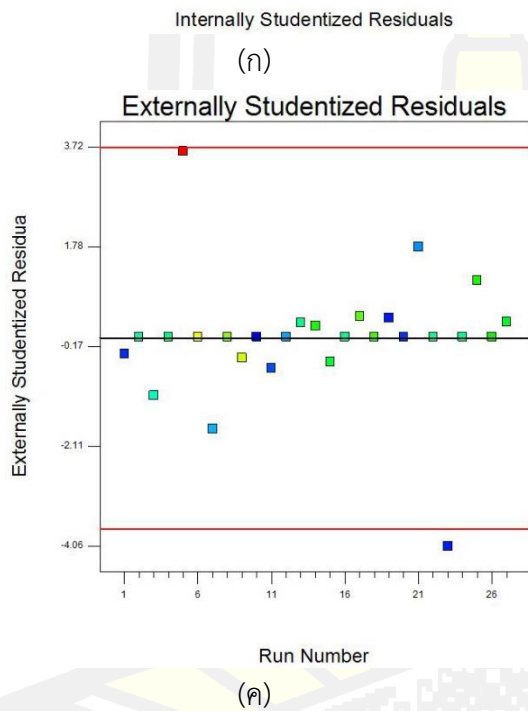
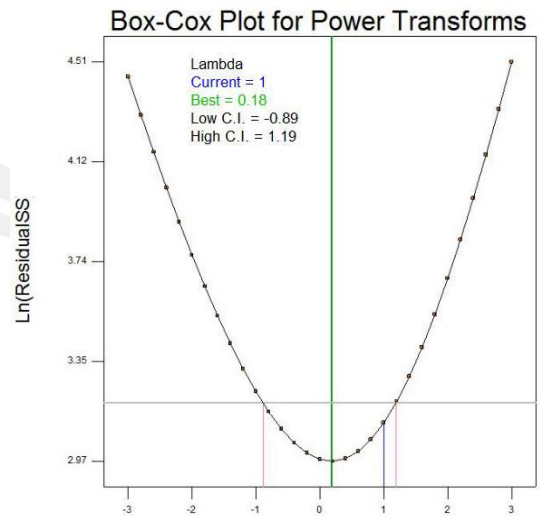
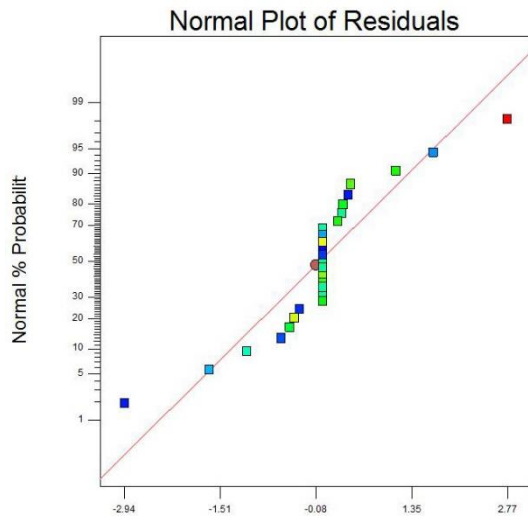
(ค)

ภาพประกอบ 18 ผลของอุณหภูมิและกำลังวัตต์ไม่โครเวฟต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลที่ความเร็วรอบของถังหมุนเท่ากับ (ก) 10 rpm (ข) 20 rpm และ (ค) 30 rpm

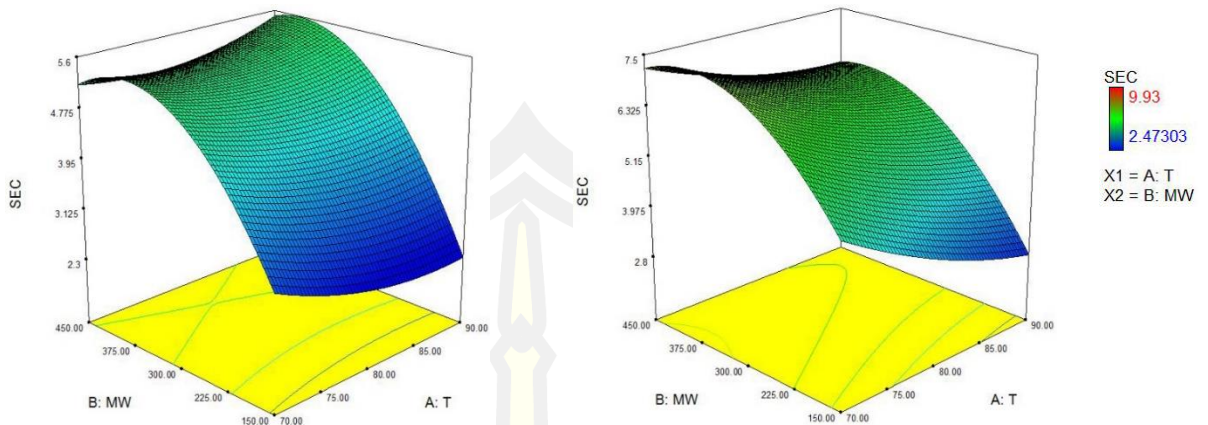
ในการพิจารณาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกระบวนการอบแห้งนั้น นอกจากใช้ค่าคงที่อัตราการอบแห้ง เวลาการอบแห้ง และสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลแล้ว งานวิจัยนี้ยังได้ใช้ค่าการใช้พลังงานจำเพาะ (specific energy consumption, SEC) เพื่อวิเคราะห์หาเทคนิคและสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสม จากตาราง 36 จะเห็นได้ว่า แบบจำลองฟังก์ชันพหุนามอันดับสองของค่าการใช้พลังงานจำเพาะมีความสำคัญ โดยพิจารณาจาก ค่า p value ของแบบจำลองซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.0008 ($p < 0.001$) ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.05 และค่า F value มีค่าเท่ากับ 5.92 (มีค่ามากกว่า 4) แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองดังกล่าวมีความสำคัญ โดยมีโอกาสเพียง 0.08% เท่านั้นที่ค่า Model F-Value ที่มีค่ามากเกิดขึ้นจากสิ่งรบกวน (noise) จากตาราง 36 เทอมของพารามิเตอร์เชิงเดี่ยวของทุกปัจจัยมี

นัยสำคัญ โดยปัจจัยของอุณหภูมิสมร้อนมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น $p < 0.01$ ปัจจัยของกำลังวัตต์ไมโครเวฟมีนัยสำคัญที่ระดับ $p < 0.001$ และปัจจัยความเร็วรอบมีนัยสำคัญที่ระดับ $p < 0.05$ เช่นเดียวกับผลตอบสนองทั้งสามที่ได้อธิบายไปแล้ว เมื่อพิจารณาเทอมของปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยของแบบจำลอง จะเห็นได้ว่าทุกเทอมไม่มีนัยสำคัญ ในกรณีของเทอมของปัจจัยกำลังสอง จะเห็นได้ว่ามีเพียงเทอมกำลังของกำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่านั้นที่มีนัยสำคัญโดยมีนัยสำคัญที่ระดับ $p < 0.05$ นอกจากนี้ จากตาราง 36 พบว่า ค่า Pred R-Squared มีค่าเท่ากับ 0.4196 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่า Adj R-Squared (0.6302) ส่วนค่า Adeq Precision มีค่าเท่ากับ 8.379 ซึ่งแสดงสัญญาณที่เพียงพอ (adequate signal) ดังนั้น แบบจำลองนี้จึงสามารถที่จะนำมาใช้เพื่อนำทางไปยังสิ่งที่ต้องการออกแบบได้ เมื่อพิจารณาค่า F value จากตาราง 36 จะเห็นได้ว่าค่า F value ของปัจจัยของกำลังวัตต์ไมโครเวฟมีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 26.08 รองลงมาคืออุณหภูมิสมร้อนเท่ากับ 8.47 และความเร็วรอบของถังหมวนมีค่าต่ำที่สุดเท่ากับ 6.52 แสดงให้เห็นว่าปัจจัยของกำลังวัตต์ไมโครเวฟส่งผลต่อค่าการใช้พลังงานจำเพาะมากที่สุด รองลงมาคืออุณหภูมิสมร้อน และความเร็วรอบของถังหมวน ตามลำดับ

ภาพประกอบ 19 แสดงกราฟการวินิจฉัยทางสถิติเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของค่าการใช้พลังงานจำเพาะ (specific energy consumption, SEC) ภาพประกอบ 19(ก) แสดงความน่าจะเป็นแบบปกติของเศษเหลือ จากภาพประกอบดังกล่าวจะเห็นได้จากค่าเศษเหลือกระจายตามเส้นทแยงมุม ซึ่งเป็นลักษณะที่ดีของการกระจายเศษเหลือแบบแจกแจงปกติ ดังนั้น จึงไม่จำเป็นต้องทำการแปลงฟังก์ชันโดยยืนยันได้จากกราฟ Box-Cox ในภาพประกอบ 19(ข) ซึ่งทั้งค่าแลมดาปัจจุบัน (1) และค่าแลมดาที่ดีที่สุด (0.18) มีค่าอยู่ในช่วงความเชื่อมั่นต่ำสุดเท่ากับ -0.89 และค่าสูงสุดเท่ากับ 1.19 (CI 95%) เมื่อพิจารณาภาพประกอบ 19(ค) จะเห็นได้ว่าหมายเลขการทดลองที่ 22 อยู่นอกช่วง (เส้นสีแดง) ซึ่งเป็นสภาวะการอบแห้งที่ทำให้เกิดเศษเหลือมีค่ามากเล็กน้อย ในขณะที่ภาพประกอบ 19(ง) แสดงค่าเศษเหลือที่มีการกระจายแบบสุ่มรอบเส้นคงที่เท่ากับ 0 ภายในช่วงทั้งหมด ดังนั้น สิ่งที่จะทำให้เกิดรูปแบบไม่เชิงเส้น (nonlinear pattern) หรือความแปรปรวนที่ไม่เท่ากัน (unequal variance) อาจเป็นไปได้และการประมาณแบบจำลองนั้นดีโดยไม่มีข้อผิดพลาดหลัก

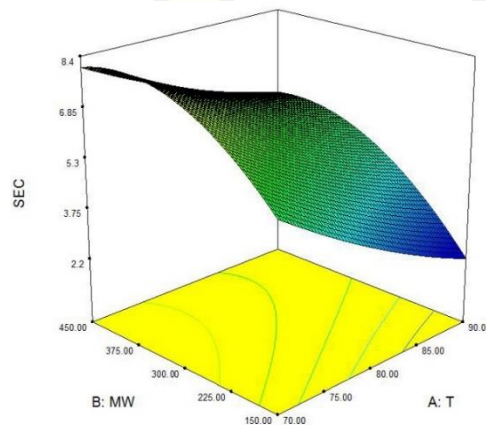


ภาพประกอบ 19 พล็อตของ (ก) normal probability vs. studentized residuals (ข) Box-Cox for power transformation (ค) residual against run number และ (ง) residuals against predicted specific energy consumption



(ก)

(ข)



(ค)

ภาพประกอบ 20 ผลของอุณหภูมิและกำลังวัตต์ไมโครเวฟต่อค่าการใช้พลังงานจำเพาะที่ความเร็วรอบของถังหมุนเท่ากับ (ก) 10 rpm (ข) 20 rpm และ (ค) 30 rpm

นอกจากอัตราการอบแห้งที่สูงซึ่งส่งผลให้เวลาในการอบแห้งสั้นแล้ว การออกแบบกระบวนการอบแห้งใหม่ ๆ จำเป็นต้องคำนึงถึงค่าการใช้พลังงานด้วยเช่นกัน ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาผลของสภาวะการอบแห้งต่อค่าการใช้พลังงานจำเพาะ (SEC) ดังแสดงในภาพประกอบ 18 ซึ่งเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิลมร้อน (T) และกำลังวัตต์ไมโครเวฟ (MW) ที่ระดับความเร็วรอบ 10 รอบต่อนาที (ภาพประกอบ 20(ก)) 20 รอบต่อนาที (ภาพประกอบ 20(ข)) และ 30 รอบต่อนาที (ภาพประกอบ 20(ค))

จากภาพประกอบ 20(ก) พบว่าปัจจัยกำลังวัตต์ไมโครเวฟมีอิทธิพลต่อค่า SEC อย่างเห็นได้ชัด โดยมีเส้นโค้งแสดงรูปร่างมีลักษณะเป็นเส้นโค้งพาราโบลาที่ทุกระดับของอุณหภูมิลมร้อน ในขณะที่

ที่ปัจจัยอุณหภูมิความร้อนส่งผลต่อค่า SEC เพียงเล็กน้อย ซึ่งค่า SEC มีค่าต่ำลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ถึงแม้ว่าที่สภาวะการอบแห้งโดยใช้กำลังวัตต์ไมโครเวฟสูงจะให้อัตราการอบแห้งที่สูงและใช้เวลาการอบแห้งสั้น จากผลการทดลองในภาพประกอบ 20(ก) กลับพบว่าค่า SEC มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้กำลังวัตต์ไมโครเวฟสูงขึ้น ค่า SEC มีค่าต่ำสุดประมาณ 2.3 MJ/kg ที่สภาวะอุณหภูมิความร้อนเท่ากับ 90°C ร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ 150 วัตต์ เมื่อเพิ่มความเร็วรอบเป็น 20 รอบต่อนาทีและ 30 รอบต่อนาที ค่า SEC มีแนวโน้มที่สูงกว่าการใช้ความเร็วรอบที่ 10 รอบต่อนาที โดยค่าต่ำสุดที่ความเร็วรอบ 20 รอบต่อนาที มีค่าประมาณ 2.8 MJ/kg ที่สภาวะการใช้ลมร้อน 90°C ร่วมกับไมโครเวฟ 150 วัตต์ และมีค่าต่ำสุดที่ความเร็วรอบ 30 รอบต่อนาที เท่ากับ 2.2 MJ/kg ที่สภาวะการอบแห้งเดียวกัน ดังนั้น จึงสามารถสรุปได้ว่า เมื่อพิจารณาค่าการใช้พลังงานจำเพาะ สภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมคือการใช้ลมร้อนอุณหภูมิ 90°C ร่วมกับการให้ความร้อนเสริมด้วยไมโครเวฟที่ 150 วัตต์ และใช้ความเร็วรอบของถังหมุนที่ 10 รอบต่อนาที หรือ 30 รอบต่อนาที อย่างไรก็ตาม การหาสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมนั้นจำเป็นต้องพิจารณาทุกปัจจัยที่ศึกษาซึ่งได้จะได้นำเสนอในหัวข้อต่อไป

จากตาราง 36 และกราฟสรุปการวินิจฉัยทางสถิติ (ภาพประกอบ 13 15 17 และ 19) สามารถสรุปได้ว่าเมื่อพิจารณาค่าพารามิเตอร์ทางสถิติทั้งหมดแล้ว แบบจำลองพหุนามกำลังสองสามารถนำไปใช้ในการออกแบบและวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งต่อไปได้ ถึงแม้ว่าจะมีบางเทอมในแบบจำลองที่ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ อย่างไรก็ตาม การเพิ่มคุณภาพของแบบจำลองก็สามารถทำได้เช่นเดียวกัน โดยการลดจำนวนเทอมหรือตัดพารามิเตอร์ที่ไม่มีนัยสำคัญออกจากแบบจำลอง

4.2.2 สภาวะการอบแห้งที่เหมาะสม

จากการวิเคราะห์ผลตอบสนองในหัวข้อที่ 4.2.1 พบว่าปัจจัยที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ซึ่งประกอบด้วยอุณหภูมิความร้อน กำลังวัตต์ไมโครเวฟ และความเร็วรอบของถังหมุนต่างมีอิทธิพลต่อผลตอบสนองในทิศทางที่แตกต่างกัน การพิจารณาสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมนั้นจำเป็นต้องคำนึงถึงปัจจัยทั้งสามพร้อม ๆ กัน ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงได้กำหนดเกณฑ์เพื่อใช้ในการหาสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสม ดังนี้

1. ปัจจัยอุณหภูมิความร้อนต้องอยู่ในช่วงที่ศึกษา คือ $70 - 90^{\circ}\text{C}$
2. ปัจจัยกำลังวัตต์ไมโครเวฟต้องอยู่ในช่วงที่ศึกษา คือ $150 - 450$ วัตต์
3. ปัจจัยความเร็วรอบของถังหมุนต้องอยู่ในช่วงที่ศึกษา คือ $10 - 30$ รอบต่อนาที
4. ผลตอบสนองค่าคงที่อัตราการอบแห้ง (k) มีค่าสูงสุด
5. ผลตอบสนองค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (D_e) มีค่าสูงสุด

6. ผลตอบสนองเวลาการอบแห้ง (DT) มีค่าต่ำสุด

7. ผลตอบสนองค่าการใช้พลังงานจำเพาะ (SEC) มีค่าต่ำสุด

จากเกณฑ์ในการพิจารณาสถานะการอบแห้งที่ดังกล่าวนี้ทำให้ได้ค่าในการออกแบบการทดลอง (Desirability) ที่แตกต่างกัน ซึ่งค่า Desirability มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 โดยที่ค่า 1 แสดงถึงค่าการออกแบบที่ดีที่สุดหรือค่าการออกแบบในอุดมคติ จากการทดลองและวิเคราะห์ค่า Desirability ในงานวิจัยพบว่าค่าสูงสุดมีค่าเท่ากับ 0.85 ดังแสดงในตาราง 37 ซึ่งสถานะการอบแห้งที่เหมาะสมและสอดคล้องกับค่า Desirability สูงสุดนี้ประกอบด้วย อุณหภูมิลมร้อน (T) อยู่ในช่วง 76.40 – 76.59°C กำลังวัตต์ไมโครเวฟ (MW) อยู่ในช่วง 449.99 - 450 วัตต์ และความเร็วรอบของถังหมุนเท่ากับ 10 รอบต่อนาที อย่างไรก็ตาม เพื่อให้สะดวกในเชิงปฏิบัติสถานะการอบแห้งที่เหมาะสมคือ อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 77°C กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 450 วัตต์ และความเร็วรอบของถังหมุนเท่ากับ 10 รอบต่อนาที

ตาราง 37 สถานะการอบแห้งที่เหมาะสมและค่าผลตอบสนอง

Factors				Responses			Desirability
T	MW	RPM	k	DT	D _e	SEC	
76.59	450.00	10.00	0.038477	41.23	1249.95	5.05	0.850
76.50	450.00	10.00	0.038526	41.36	1248.42	5.05	0.850
76.40	449.99	10.00	0.038582	41.51	1246.63	5.05	0.850
76.77	448.75	10.00	0.038257	41.10	1249.97	5.06	0.849
75.78	450.00	10.00	0.038935	42.46	1235.60	5.05	0.848
76.91	447.74	10.00	0.038080	41.01	1249.96	5.07	0.847
77.81	450.00	10.00	0.037865	39.64	1268.74	5.06	0.846
76.39	445.23	10.00	0.038108	42.00	1235.53	5.08	0.843
76.96	450.00	10.70	0.038121	42.00	1238.48	5.20	0.839
80.89	450.00	10.00	0.036706	36.99	1302.01	5.10	0.837

4.2.3 การเปรียบเทียบผลตอบสนองและคุณภาพของลูกเต๋อยุ่สูงเร็ว

เพื่อทดสอบสถานะการอบแห้งที่เหมาะสมที่ได้จากการทำนายด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology) งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองอบแห้งลูกเต๋อยุ่สูงโดยใช้สถานะการอบแห้งที่เหมาะสมที่ได้จากหัวข้อที่ 4.2.2 ซึ่งประกอบด้วย อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 77°C ร่วมกับ

การให้ความร้อนเสริมด้วยไมโครเวฟ 450 วัตต์ และความเร็วรอบของถังหมุนเท่ากับ 10 รอบต่อนาที ทำการตรวจสอบคุณภาพของลูกเต๋อยแห้งและหลังการคืนรูป เพื่อเปรียบเทียบคุณภาพกับลูกเต๋อยที่ได้จากวิธีการหุงสุกแบบดั้งเดิม และวิธีการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง ดังแสดงในตาราง 38

ตาราง 38 การเปรียบเทียบผลตอบสนองและคุณภาพของลูกเต๋อยหุงสุกเร็วที่ได้จากการเทคนิคการอบแห้งที่แตกต่างกัน

Attributes	Drying methods			
	Raw sample	Traditionally cooked	Freeze dried	Proposed method
MC	10.21±0.13	-	0.15±0.04	10.41±0.10
a _w	0.2428±0.0011	-	0.0230±0.0002	0.3046±0.0033
Color				
L*	69.17±0.25	-	73.55±0.18	61.17±0.06
a*	2.49±0.04	-	1.32±0.02	2.23±0.02
b*	19.50±19.50	-	14.89±0.03	19.96±0.03
ΔE	-	-	6.46±0.12	8.02±0.05
Rehydration properties				
Rehydration ratio		-	1.32±0.02	0.897±0.01
Rehydration rate constant		-	0.3086±0.0081	0.1002±0.0106
Rehydration time		-	10±1	20±3
Textural properties		-		
Hardness	-	18628.12±1461.63	7916.37±1220.15	16573.02±2216.45
Adhesiveness	-	-185.75±7.93	-67.43±22.75	-82.53±20.41
Springiness	-	0.460±0.116	0.408±0.144	0.292±0.039
Cohesiveness	-	0.343±0.015	0.335±0.020	0.359±0.018
Chewiness	-	2834.93±567.00	915.67±260.14	1778.85±576.74

จากตาราง 38 พบว่าค่าความชื้นของลูกเดือยหุงสุกเร็วที่ผ่านการอบแห้งด้วยวิธีอบแห้งแบบถึงหมุ่นร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟมีค่า $10.41 \pm 0.10\%$ (wb) ซึ่งมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญกับลูกเดือยก่อนหุงสุก ($10.21 \pm 0.13\%$) ส่วนลูกเดือยที่ผ่านการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งนั้นมีความชื้นค่อนข้างต่ำ ($0.15 \pm 0.04\%$) เนื่องจากวิธีการอบแห้งดังกล่าวนี้เป็นวิธีการอบแห้งในอุดมคติที่สามารถทำให้ความชื้นที่อยู่ในวัสดุกลายเป็นน้ำแข็งแล้วระเหิดออกหมด ทำให้ความชื้นที่เหลืออยู่น้อยมาก ซึ่งสอดคล้องกับค่าปริมาณน้ำอิสระ (a_w) ที่มีค่าต่ำ (0.023 ± 0.0002) เช่นเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งอื่น ๆ จากตาราง 38 จะเห็นได้ว่าค่าปริมาณน้ำอิสระของลูกเดือยที่อบแห้งจากวิธีที่นำเสนอในงานวิจัยนี้มีค่าเท่ากับ 0.3046 ± 0.0033 ใกล้เคียงกับวัตถุดิบที่มีค่าเท่ากับ 0.2428 ± 0.0011 จากปริมาณน้ำอิสระที่ได้จากการทดลองนี้พบว่ามีค่าต่ำกว่า 0.6 ดังนั้น จึงถือได้ว่าเป็นวัสดุอบแห้งที่มีความปลอดภัยระหว่างการเก็บรักษา [63]

สีเป็นคุณภาพทางกายภาพที่ส่งผลต่อการยอมรับของผู้บริโภค โดยผลิตภัณฑ์แปรรูปที่ดีควรรักษาคุณภาพทางด้านสีหรือมีการเปลี่ยนแปลงสีเล็กน้อย ดังนั้น งานวิจัยนี้ได้วัดคุณภาพทางด้านสี ($L^* a^* b^*$) เพื่อทดสอบการเปลี่ยนแปลงของสี (ΔE) โดยเปรียบเทียบกับวัตถุดิบ จากตาราง 38 พบว่าค่าความสว่าง ($L^* = 61.17 \pm 0.06$) ของลูกเดือยที่อบแห้งด้วยวิธีอบแห้งแบบถึงหมุ่นร่วมกับการไมโครเวฟมีสีคล้ำกว่าวัตถุดิบ ในขณะที่ค่าความเป็นสีแดง ($a^* = 2.23 \pm 0.02$) และค่าความเป็นสีเหลือง ($b^* = 19.96 \pm 0.03$) มีค่าใกล้เคียงกับวัตถุดิบ ส่วนลูกเดือยที่ผ่านการอบแห้งด้วยวิธีแช่เยือกแข็งนั้น มีค่าสี L^* (73.55 ± 0.18) มีค่าใกล้เคียงกับวัตถุดิบ ในขณะที่ค่าสี a^* (1.32 ± 0.02) และ b^* (14.89 ± 0.03) มีค่าต่ำกว่าวัตถุดิบเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาค่าการเปลี่ยนแปลงสี (ΔE) ซึ่งแสดงภาพรวมของอิทธิพลของกระบวนการแปรรูปต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้ พบว่า ค่า ΔE ของลูกเดือยที่ผ่านการอบแห้งด้วยวิธีที่นำเสนอมีค่าเท่ากับ 8.02 ± 0.05 ซึ่งใกล้เคียงกับลูกเดือยที่ผ่านการอบแห้งด้วยวิธีแช่เยือกแข็งเท่ากับ 6.46 ± 0.12 ดังนั้น จึงสามารถสรุปได้ว่าวิธีการอบแห้งแบบถึงหมุ่นร่วมกับการไมโครเวฟที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ให้คุณภาพทางด้านสีเป็นที่ยอมรับได้

คุณภาพด้านการคืนรูป (Rehydration properties) ถือได้ว่าเป็นคุณสมบัติที่สำคัญมากสำหรับผลิตภัณฑ์กึ่งสำเร็จรูปหรือผลิตภัณฑ์หุงสุกเร็ว คุณภาพด้านการคืนรูปที่ศึกษาในงานวิจัยประกอบด้วยอัตราส่วนการคืนรูป (Rehydration ratio) ค่าคงที่อัตราการคืนรูป (Rehydration rate constant) และเวลาการคืนรูป (Rehydration time) จากตาราง 38 พบว่าอัตราส่วนการคืนรูปของลูกเดือยที่ผ่านการอบแห้งด้วยวิธีที่นำเสนอมีค่าเท่ากับ 0.897 ± 0.01 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าลูกเดือยที่ผ่านการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งเล็กน้อย (1.32 ± 0.02) แสดงให้เห็นว่าลูกเดือยที่ผ่านการอบแห้งด้วยวิธีที่นำเสนอมีความสามารถในการดูดน้ำกลับได้น้อยกว่า สอดคล้องกับค่าคงที่อัตราการคืนรูปที่วิธีการ

อบแห้งแบบถึงหมุนร่วมกับไมโครเวฟให้ค่าที่ต่ำกว่าการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง ดังนั้น จึงส่งผลให้ใช้เวลาในการคั้นรูปด้วยน้ำร้อนนานกว่าโดยใช้เวลา 20 นาที ในขณะที่ลูกเต๋ยที่ผ่านการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งใช้เวลาคั้นรูปเพียง 10 นาทีเท่านั้น ผลการทดลองดังกล่าวนี้สามารถอธิบายได้ว่าลูกเต๋ยที่ผ่านการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีความเป็นรูปพรุนที่สูงกว่า สามารถดูดน้ำกลับได้มากกว่าในระหว่างกระบวนการคั้นรูป ทำให้แป้งที่ประกอบในลูกเต๋ยสามารถเกิดเป็นเจลได้อีกครั้งในเวลาที่สูงกว่า

นอกจากคุณภาพการคั้นรูปแล้ว คุณสมบัติด้านเนื้อสัมผัสถือได้ว่าเป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่ส่งผลต่อการยอมรับของผู้บริโภค ตาราง 38 แสดงค่าความแข็ง (Hardness) ความเหนียว (Adhesiveness) ความตึง (Springiness) ความเหนียวเกาะติดกัน (Cohesiveness) และความเคี้ยวได้ (Chewiness) ของลูกเต๋ยที่หุงสุกด้วยวิธีดั้งเดิม (ซึ่งพิจารณาเป็นตัวอย่างอ้างอิง) ลูกเต๋ยคั้นรูปที่ผ่านการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง และลูกเต๋ยคั้นรูปที่ผ่านการอบแห้งด้วยวิธีที่นำเสนอ จากตารางดังกล่าวนี้พบว่าลูกเต๋ยที่ผ่านการอบแห้งด้วยวิธีที่นำเสนอเมื่อคั้นรูปแล้วมีเนื้อสัมผัสที่ใกล้เคียงกับตัวอย่างอ้างอิง ในขณะที่ตัวอย่างที่ผ่านการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งเมื่อคั้นรูปแล้วมีค่าความแข็งต่ำกว่าตัวอย่างอ้างอิงอย่างเห็นได้ชัด ดังนั้น จึงสามารถสรุปได้ว่าวิธีการเตรียมลูกเต๋ยหุงสุกเร็วด้วยวิธีการอบแห้งแบบถึงหมุนร่วมกับไมโครเวฟ ให้คุณภาพเนื้อสัมผัสของลูกเต๋ยหลังคั้นรูปในระดับที่ยอมรับได้เมื่อเปรียบเทียบกับลูกเต๋ยที่ผ่านการหุงสุกด้วยวิธีดั้งเดิม

บทที่ 5

สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

5.1 ผลการศึกษาจลนศาสตร์การอบแห้งลูกเดือยหุงสุกเร็วด้วยวิธีการอบแห้งแบบถึงหมูนร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ

การออกแบบแบบจำลองการอบแห้งสำหรับลูกเดือยหุงสุกเร็วที่เตรียมจากกระบวนการอบแห้งแบบถึงหมูนร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ โดยใช้แบบจำลองเอมพิริคัลที่นำเสนอจำนวน 11 สมการ มาเปรียบเทียบกับอัตราส่วนความชื้น (MR) จึงได้ออกแบบการทดลองแบบ Full factorial design จะได้การทดลองทั้งหมด 27 การทดลอง โดยมีปัจจัยการอบแห้ง 3 ปัจจัย คือ อุณหภูมิหมูนร้อนในช่วง 70-90°C กำลังวัตต์ไมโครเวฟในช่วง 150-450 วัตต์ และ ความเร็วรอบของถึงหมูนอยู่ในช่วง 10-30 รอบต่อนาที พบว่า แบบจำลองหรือสมการการอบแห้งที่นำมาศึกษาในงานวิจัยนี้ส่วนใหญ่มีค่า R^2 มากกว่า 0.98-0.99 โดยเฉพาะอย่างยิ่งสมการที่ประกอบด้วยพารามิเตอร์มากกว่า 2 ตัวขึ้นไปมีค่า R^2 มากที่สุดและค่าความผิดพลาดต่ำที่สุด เมื่อพิจารณาค่า R^2 และค่าความผิดพลาดทั้งหมดแล้ว พบว่า แบบจำลองที่ 11 (Midilli et al.) เหมาะสมที่สุดสำหรับ fit ข้อมูลที่ได้จากการอบแห้งในทุกสภาวะการอบแห้ง อย่างไรก็ตามสมการการอบแห้งของ Midilli et al. ประกอบด้วยพารามิเตอร์ 4 ตัว ซึ่งใช้สำหรับปรับเส้นโค้งให้เข้ากันได้กับข้อมูลจากการทดลอง ดังนั้นการนำไปใช้ในทางปฏิบัติเพื่อศึกษาพฤติกรรมและศึกษาออกแบบสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งของลูกเดือยหุงสุกเร็วในงานวิจัยนี้อาจเกิดความยุ่งยาก เพื่อให้ง่ายต่อการศึกษาในหัวข้อต่อไป จึงได้นำแบบจำลองการอบแห้งของ Page (แบบจำลองหมายเลข 2) ซึ่งมีค่า R^2 สูงกว่า 0.98 และมีค่า χ^2 ค่า RMSE ค่า %P และค่า MSE ต่ำในทุกสภาวะการอบแห้ง ไปใช้เพื่อศึกษาพฤติกรรมการอบแห้งของลูกเดือยหุงสุกเร็วที่เตรียมด้วยวิธีการอบแห้งแบบถึงหมูนร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ

แบบจำลองการอบแห้งของ Page เป็นแบบจำลองการอบแห้งที่ใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับการอธิบายพฤติกรรมการอบแห้งของวัสดุชีวภาพ สมการนี้ได้นำมาเปรียบเทียบกับอัตราส่วนความชื้นของการทดลองโดยมี 2 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิหมูนร้อน 3 ระดับ ได้แก่ 70 80 และ 90 องศาเซลเซียส ร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ 3 ระดับ ได้แก่ 150 300 และ 450 วัตต์ และ ความเร็วรอบของถึงหมูน 3 ระดับ ได้แก่ 10 20 และ 30 รอบต่อนาที ซึ่งจะได้พารามิเตอร์ของสมการของ Page คือ ค่าคงที่อัตรา (k) ค่าคงที่เลขชี้กำลัง (n) จากผลการทดลองดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าการเพิ่มการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟนั้นทำให้อัตราการอบแห้งมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากคลื่น

ไมโครเวฟทำให้โมเลกุลของน้ำภายในวัสดุเกิดการหมุนและความร้อนที่ระดับอุณหภูมิค่าหนึ่งซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกดูดซับด้วยโมเลกุลน้ำ ทำให้น้ำในวัสดุเกิดการระเหยและเคลื่อนที่ออกสู่ผิวภายนอกอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้อัตราการการอบแห้งหรือค่าคงที่อัตราการอบแห้ง นั้นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะการอบแห้งที่ใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียวโดยที่พฤติกรรมการอบแห้ง ลูกเต๋อยุ่แห้งเร็วโดยใช้วิธีการอบแห้งแบบถึงหมูนร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟที่ระดับอุณหภูมิความร้อน 80°C และ 90°C มีลักษณะเป็นไปในทางเดียวกันกับสภาวะอุณหภูมิความร้อน 70°C โดยการใช้ไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนสามารถช่วยลดเวลาการอบแห้งของลูกเต๋อยุ่แห้งลงได้ อีกทั้งการใช้กำลังวัตต์ไมโครเวฟสามารถช่วยเร่งให้น้ำหรือความชื้นในวัสดุเกิดการระเหยได้รวดเร็วขึ้น ส่งผลให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นและเวลาในการอบแห้งลดลง ในขณะที่ความเร็วรอบของถังหมูนที่ 10 รอบต่อนาทีเหมาะสมสำหรับกระบวนการอบแห้งที่นำเสนอในงานวิจัยนี้

5.2 สภาวะการอบแห้งที่เหมาะสม

5.2.1 ผลตอบสนอง

เมื่อพิจารณาผลตอบสนองเวลาการอบแห้ง (DT) จะเห็นได้ว่าค่า F value ของปัจจัยของกำลังวัตต์ไมโครเวฟมีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 39.55 รองลงมาคืออุณหภูมิความร้อนเท่ากับ 20.45 และความเร็วรอบของถังหมูนมีค่าต่ำที่สุดเท่ากับ 1.37 แสดงให้เห็นว่าปัจจัยของกำลังวัตต์ไมโครเวฟส่งผลต่อเวลาการอบแห้งมากที่สุด รองลงมาคืออุณหภูมิความร้อน และความเร็วรอบของถังหมูน ตามลำดับ

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (D_e) คือพารามิเตอร์แสดงกลไกการอบแห้งของวัสดุในช่วงการอบแห้งแบบอัตราลดลง (falling-rate period) ซึ่งค่าสูงแสดงถึงน้ำหรือความชื้นภายในวัสดุสามารถแพร่จากข้างในสู่ผิวภายนอกของวัสดุได้เร็ว ส่งผลให้อัตราการอบแห้งสูงและเวลาในการอบแห้งสั้น ทุกระดับของความเร็วรอบมีลักษณะของเส้นโค้งแสดงรูปร่างคล้ายกัน คือทั้งปัจจัยอุณหภูมิความร้อนและกำลังวัตต์ไมโครเวฟมีอิทธิพลเชิงบวกต่อค่า D_e โดยปัจจัยกำลังวัตต์ไมโครเวฟมีลักษณะความสัมพันธ์เชิงเส้น ในขณะที่อุณหภูมิความร้อนมีลักษณะความสัมพันธ์กับค่า D_e เป็นเส้นโค้งที่ความเร็วรอบเท่ากับ 10 รอบต่อนาที ค่า D_e มีค่าสูงสุดเท่ากับ $1320 \times 10^{-8} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ ที่สภาวะอุณหภูมิความร้อนเท่ากับ 85°C และกำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 450 วัตต์ ในขณะที่ค่าต่ำสุดซึ่งมีค่าประมาณ $650 \times 10^{-8} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ ได้จากการอบแห้งภายใต้สภาวะอุณหภูมิความร้อนและกำลังวัตต์ไมโครเวฟต่ำสุด เมื่อเพิ่มความเร็วรอบกลับส่งผลให้ค่า D_e มีแนวโน้มลดลง โดยที่ความเร็วรอบเท่ากับ 20 รอบต่อนาที ค่า D_e อยู่ในช่วง $520 \times 10^{-8} - 1150 \times 10^{-8} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ และที่ความเร็วรอบเท่ากับ 30 รอบต่อนาที ค่า D_e อยู่ในช่วง $580 \times 10^{-8} - 1180 \times 10^{-8} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ โดยค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดได้จากสภาวะการอบแห้งเดียวกัน

นั้น คือ ที่อุณหภูมิร้อนเท่ากับ 70°C ร่วมกับไมโครเวฟ 150 วัตต์ มีค่า D_e ต่ำสุด และที่สภาวะอุณหภูมิร้อนเท่ากับ 85°C ร่วมกับไมโครเวฟ 450 วัตต์ มีค่า D_e สูงสุด

งานวิจัยนี้ยังได้ใช้ค่าการใช้พลังงานจำเพาะ (specific energy consumption, SEC) จะเห็นได้ว่าค่า F value ของปัจจัยของกำลังวัตต์ไมโครเวฟมีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 26.08 รองลงมาคืออุณหภูมิร้อนเท่ากับ 8.47 และความเร็วรอบของถังหมุนมีค่าต่ำที่สุดเท่ากับ 6.52 แสดงให้เห็นว่าปัจจัยของกำลังวัตต์ไมโครเวฟส่งผลต่อค่าการใช้พลังงานจำเพาะมากที่สุด รองลงมาคืออุณหภูมิร้อน และความเร็วรอบของถังหมุน ตามลำดับ

5.2.2 สภาวะการอบแห้งที่เหมาะสม

งานวิจัยนี้จึงได้กำหนดเกณฑ์เพื่อใช้ในการหาสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสม ดังนี้

1. ปัจจัยอุณหภูมิร้อนต้องอยู่ในช่วงที่ศึกษา คือ $70 - 90^{\circ}\text{C}$
2. ปัจจัยกำลังวัตต์ไมโครเวฟต้องอยู่ในช่วงที่ศึกษา คือ $150 - 450$ วัตต์
3. ปัจจัยความเร็วรอบของถังหมุนต้องอยู่ในช่วงที่ศึกษา คือ $10 - 30$ 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 ในงานวิจัยพบว่าค่าสูงสุดมีค่าเท่ากับ 0.85 ซึ่งสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมและสอดคล้องกับค่า Desirability สูงสุดนี้ประกอบด้วย อุณหภูมิร้อน (T) อยู่ในช่วง $76.40 - 76.59^{\circ}\text{C}$ กำลังวัตต์ไมโครเวฟ (MW) อยู่ในช่วง $449.99 - 450$ วัตต์ และความเร็วรอบของถังหมุนเท่ากับ 10 รอบต่อนาที อย่างไรก็ตาม เพื่อให้สะดวกในเชิงปฏิบัติสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมคือ อุณหภูมิร้อนเท่ากับ 77°C กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 450 วัตต์ และความเร็วรอบของถังหมุนเท่ากับ 10 รอบต่อนาที

5.2.3 การเปรียบเทียบผลตอบสนองและคุณภาพของลูกเต๋อยุ่สูงเร็ว

เพื่อทดสอบสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมที่ได้จากการทำนายด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology) ซึ่งประกอบด้วย อุณหภูมิร้อนเท่ากับ 77°C ร่วมกับการให้ความร้อนเสริมด้วยไมโครเวฟ 450 วัตต์ และความเร็วรอบของถังหมุนเท่ากับ 10 รอบต่อนาที ทำการ

ตรวจสอบคุณภาพของลูกเต๋อยแห้งและหลังการคืนรูป เพื่อเปรียบเทียบคุณภาพกับลูกเต๋อยที่ได้จากวิธีการหุงสุกแบบดั้งเดิม และวิธีการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง พบว่าค่าความชื้นของลูกเต๋อยหุงสุกเร็วที่ผ่านการอบแห้งด้วยวิธีอบแห้งแบบถึงหมุนร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟมีค่า $10.41 \pm 0.10\%$ (wb) ซึ่งมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญกับลูกเต๋อยก่อนหุงสุก ($10.21 \pm 0.13\%$) ส่วนลูกเต๋อยที่ผ่านการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งนั้นมีความชื้นค่อนข้างต่ำ ($0.15 \pm 0.04\%$) เนื่องจากวิธีการอบแห้งดังกล่าวนี้เป็นวิธีการอบแห้งในอุดมคติที่สามารถทำให้ความชื้นที่อยู่ในวัสดุกลายเป็นน้ำแข็งแล้วระเหิดออกหมด ทำให้ความชื้นที่เหลืออยู่น้อยมาก ซึ่งสอดคล้องกับค่าปริมาณน้ำอิสระ (a_w) ที่มีค่าต่ำ (0.023 ± 0.0002) เช่นเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งอื่น ๆ จะเห็นได้ว่าค่าปริมาณน้ำอิสระของลูกเต๋อยที่อบแห้งจากวิธีที่นำเสนอในงานวิจัยนี้มีค่าเท่ากับ 0.3046 ± 0.0033 ใกล้เคียงกับวัตถุดิบที่มีค่าเท่ากับ 0.2428 ± 0.0011 จากปริมาณน้ำอิสระที่ได้จากการทดลองนี้พบว่ามีค่าต่ำกว่า 0.6 ดังนั้น จึงถือได้ว่าเป็นวัสดุอบแห้งที่มีความปลอดภัยระหว่างการเก็บรักษา [63]

งานวิจัยนี้ได้วัดคุณภาพทางด้านสี (L^* a^* b^*) เพื่อทดสอบการเปลี่ยนแปลงของสี (ΔE) โดยเปรียบเทียบกับวัตถุดิบ พบว่าค่าความสว่าง ($L^* = 61.17 \pm 0.06$) ของลูกเต๋อยที่อบแห้งด้วยวิธีอบแห้งแบบถึงหมุนร่วมกับไมโครเวฟมีสีคล้ำกว่าวัตถุดิบ ในขณะที่ค่าความเป็นสีแดง ($a^* = 2.23 \pm 0.02$) และค่าความเป็นสีเหลือง ($b^* = 19.96 \pm 0.03$) มีค่าใกล้เคียงกับวัตถุดิบ ส่วนลูกเต๋อยที่ผ่านการอบแห้งด้วยวิธีแช่เยือกแข็งนั้น มีค่าสี L^* (73.55 ± 0.18) มีค่าใกล้เคียงกับวัตถุดิบ ในขณะที่ค่าสี a^* (1.32 ± 0.02) และ b^* (14.89 ± 0.03) มีค่าต่ำกว่าวัตถุดิบเล็กน้อย ดังนั้น จึงสามารถสรุปได้ว่าวิธีการอบแห้งแบบถึงหมุนร่วมกับไมโครเวฟที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ให้คุณภาพทางด้านสีเป็นที่ยอมรับได้

คุณภาพด้านการคืนรูป (Rehydration properties) พบว่าอัตราส่วนการคืนรูปของลูกเต๋อยที่ผ่านการอบแห้งด้วยวิธีที่นำเสนอมีค่าเท่ากับ 0.897 ± 0.01 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าลูกเต๋อยที่ผ่านการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งเล็กน้อย (1.32 ± 0.02) แสดงให้เห็นว่าลูกเต๋อยที่ผ่านการอบแห้งด้วยวิธีที่นำเสนอมีความสามารถในการดูดน้ำกลับได้น้อยกว่า สอดคล้องกับค่าคงที่อัตราการคืนรูปที่วิธีการอบแห้งแบบถึงหมุนร่วมกับไมโครเวฟให้ค่าที่ต่ำกว่าการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง ดังนั้น จึงส่งผลให้ใช้เวลาในการคืนรูปด้วยน้ำร้อนนานกว่าโดยใช้เวลา 20 นาที ในขณะที่ลูกเต๋อยที่ผ่านการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งใช้เวลาคืนรูปเพียง 10 นาทีเท่านั้น ผลการทดลองดังกล่าวนี้สามารถอธิบายได้ว่าลูกเต๋อยที่ผ่านการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีความเป็นรูปพรุนที่สูงกว่า สามารถดูดน้ำกลับได้มากกว่าในระหว่างกระบวนการคืนรูป ทำให้แป้งที่ประกอบในลูกเต๋อยสามารถเกิดเป็นเจลได้อีกครั้งในเวลาสั้นกว่า

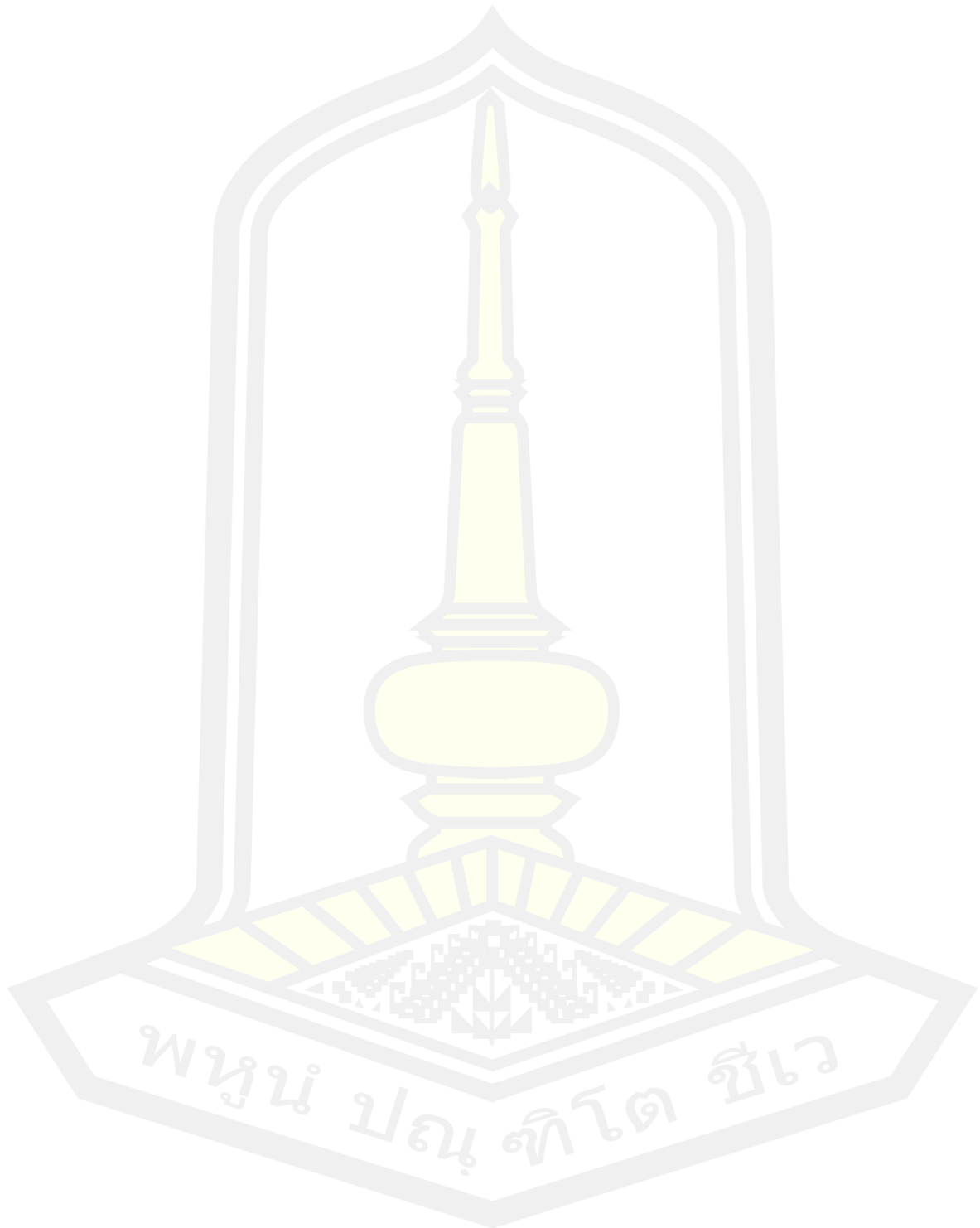
นอกจากคุณภาพการคืนรูปแล้ว คุณสมบัติด้านเนื้อสัมผัสถือได้ว่าเป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่ส่งผลต่อการยอมรับของผู้บริโภค ตาราง 38 แสดงค่าความแข็ง (Hardness) ความเหนียว (Adhesiveness) ความตึง (Springiness) ความเหนียวเกาะติดกัน (Cohesiveness) และความเคี้ยวได้ (Chewiness) ของลูกเต๋อยที่หุงสุกด้วยวิธีดั้งเดิม (ซึ่งพิจารณาเป็นตัวอย่างอ้างอิง) ลูกเต๋อยคืนรูปที่ผ่านการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง และลูกเต๋อยคืนรูปที่ผ่านการอบแห้งด้วยวิธีที่นำเสนอ เมื่อคืนรูปแล้วมีเนื้อสัมผัสที่ใกล้เคียงกับตัวอย่างอ้างอิง ในขณะที่ตัวอย่างที่ผ่านการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งเมื่อคืนรูปแล้วมีความแข็งต่ำกว่าตัวอย่างอ้างอิงอย่างเห็นได้ชัด ดังนั้น จึงสามารถสรุปได้ว่าวิธีการเตรียมลูกเต๋อยหุงสุกเร็วด้วยวิธีการอบแห้งแบบถึงหมุนร่วมกับไมโครเวฟ ให้คุณภาพเนื้อสัมผัสของลูกเต๋อยหลังคืนรูปในระดับที่ยอมรับได้เมื่อเปรียบเทียบกับลูกเต๋อยที่ผ่านการหุงสุกด้วยวิธีดั้งเดิม

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 การประเมินสถานะที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งลูกเต๋อยหุงสุกเร็วด้วยวิธีการอบแห้งแบบถึงหมุนร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟสำหรับลูกเต๋อยหุงสุกเร็วจากคุณสมบัติต่างๆ ที่สำคัญจำเป็นต้องพิจารณาแล้ว ต้องพิจารณาสารต้านอนุมูลอิสระ เป็นหนึ่งในคุณสมบัติด้วย

5.3.2 สำหรับการวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัสโดยใช้คุณภาพของลูกเต๋อยสุกเป็นเกณฑ์ ยังไม่สามารถใช้ประเมินคุณภาพของลูกเต๋อยได้ดีมากนัก จึงควรใช้การทดสอบทางประสาทสัมผัสของผู้บริโภคเป็นเกณฑ์ควบคู่ไปด้วย

บรรณานุกรม



- [1] H. Dutta, Charu, and L. Mahanta, "Laboratory Process Development and Physicochemical Characterization of a Low Amylose and Hydrothermally Treated Ready-to-Eat Rice Product Requiring No Cooking," *Food Bioprocess Technol.*, vol. 7, pp. 212–223, Jan. 2014.
- [2] T. Q. Le and W. Jittanit, "Optimization of operating process parameters for instant brown rice production with microwave-followed by convective hot air drying," *J. Stored Prod. Res.*, vol. 61, pp. 1–8, 2015.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] W. Prasert and P. Suwannaporn, "Optimization of instant jasmine rice process and its physicochemical properties," *J. Food Eng.*, vol. 95, pp. 54–61, Nov. 2009.
- [6] H. H. Chen, "Investigation of Properties of Long-grain Brown Rice Treated by Low-pressure Plasma," *Food Bioprocess Technol.*, vol. 7, no. 9, pp. 2484–2491, 2014.
- [7] X. Chen, P. Qian, X.-J. Zhang, F.-N. Liu, and R.-R. Lu, "Improving Instant Rice Quality by Novel Combined Drying," *Dry. Technol.*, vol. 32, no. 12, pp. 1448–1456, Sep. 2014.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Y.-H. Tseng, J.-H. Yang, H.-L. Chang, Y.-L. Lee, and J.-L. Mau, "Antioxidant properties of methanolic extracts from monascal adlay," *Food Chem.*, vol. 97, no. 3, pp. 375–381, 2006.

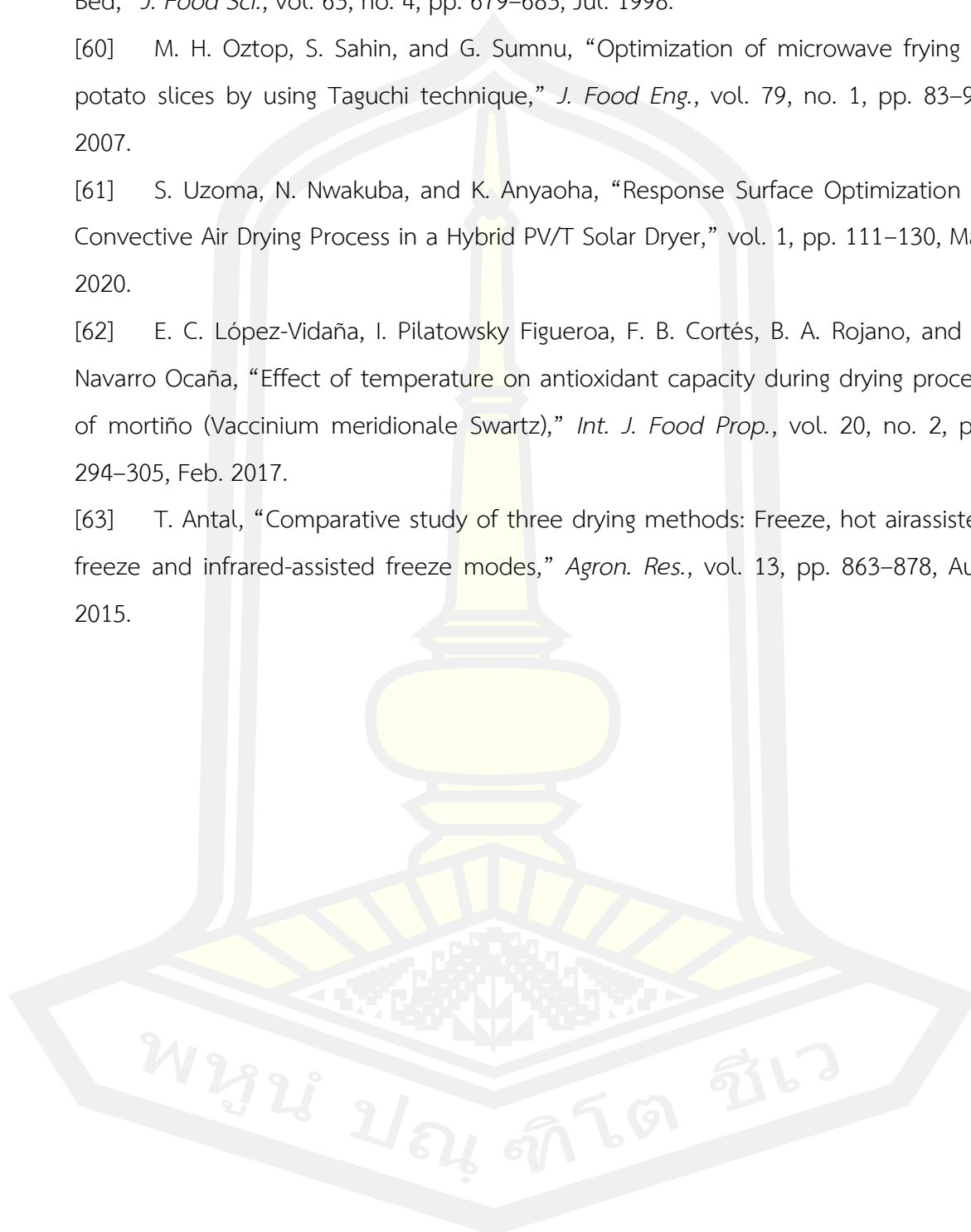
- [11] กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, *เทคโนโลยีของแป้ง*. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2546.
- [12] Encyclopaedia Britannica, *The New Encyclopaedia Britannica*. Encyclopaedia Britannica Inc., 1997.
- [13] ทศนีย์ พรกิจประสาน และอรอนงค์ นัยวิกุล, “ผลิตภัณฑ์ลูกเต๋อย,” *วารสารเกษตรศาสตร์ (วิทย์.)*, vol. 22, pp. 103–109, 2531.
- [14] ดำริ แยมสนรัตน์, “การปลูกเต๋อย,” *กสิกร*, vol. 33, no. 6, pp. 495–501, 2503.
- [15] James A. Duke, “Handbook of Energy Crops,” 1983. [Online]. Available: https://www.hort.purdue.edu/newcrop/duke_energy/dukeindex.html.
- [16] L. M. M. Ottoboni, A. Leite, M. L. N. Targon, A. Crozier, and P. Arruda, “Characterization of the storage protein in seed of *Coix lacryma-jobi* var. Adlay,” *J. Agric. Food Chem.*, vol. 38, no. 3, pp. 631–635, Mar. 1990.
- [17] เกตุอร ทองเครือ, *ชาและชาหม่อน*. กรุงเทพฯ: กรมส่งเสริมการเกษตร สำนักพัฒนาการถ่ายทอดเทคโนโลยี ส่วนส่งเสริมและเผยแพร่, 2547.
- [18] ศิริพร จันทนา, “การใช้แป้งลูกเต๋อยในการทำขนมจีน,” มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2529.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] อรอนงค์ นัยวิกุล, *ข้าว: วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน คณะอุตสาหกรรมเกษตร ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร, 2004.
- [22] A. K. Ozai-Durrani, “Quick-cooking rice and process for making same,” 1948.
- [23] R. L. Roberts, “Production of quick-cooking rice,” 2,610,124, 1954.
- [24] K. Yasumatsu, T. Sawada, K. Sawada, and S. Moritaka, “Preparation of quick-cooking rice,” 3,582,352, 1971.
- [25] 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.

- [26] สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, *การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท*. กรุงเทพมหานคร: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2540.
- [27] วิไล รังสาดทอง, *เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร*. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2547.
- [28] Z. Berk, *Food Process Engineering and Technology*, 1st ed. Oxford: Academic Press, 2009.
- [29] 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.
- [30] R. Singh and D. R. Heldman, *Introduction to food engineering*, 5th ed. Amsterdam: Academic Press, 2014.
- [31] 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.
- [32] ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช, *พื้นฐานการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ*. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2551.
- [33] J. Tang, “Unlocking Potentials of Microwaves for Food Safety and Quality,” *J. Food Sci.*, vol. 80, no. 8, pp. E1776–E1793, Aug. 2015.
- [34] สายสนม ประดิษฐ์ดวง, “การให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟและการฉายรังสีอาหาร,” in *วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอาหาร*, 3rd ed., คณาจารย์ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร, Ed. กรุงเทพมหานคร: คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน, 2543, pp. 173–195.
- [35] S. Chandrasekaran, S. Ramanathan, and T. Basak, “Microwave food processing—A review,” *Food Res. Int.*, vol. 52, no. 1, pp. 243–261, 2013.
- [36] 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.
- [37] C. Kumar, A. Karim, and M. U.H.Joardder (Omar), “Intermittent Drying of Food Products: A Critical Review,” *J. Food Eng.*, Aug. 2014.

- [38] สิริชัย ส่งเสริมพงษ์, เจริญเหรียญ สงวนศรี, and อรอนงค์ นัยวิกุล, “การพัฒนากระบวนการผลิตก๋วยเตี๋ยวเส้นเล็กและเส้นใหญ่แบบใหม่.” สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพมหานคร, 2554.
- [39] สิริชัย ส่งเสริมพงษ์, นพรัตน์ ชีรสุนทรวัฒน์, and มนัสนันท์ ชื้อประเสริฐ, “การอบแห้งเนื้อลำไยสีทองด้วยเครื่องอบแห้งไมโครเวฟแบบสายพานไหลต่อเนื่อง,” in *เทคนิควิจัย (01052491)*, ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2555.
- [40] สิริชัย ส่งเสริมพงษ์, ญัฐธิชา ศรีสุกใส, and รังสิยา พรรคกลิน, “การเปรียบเทียบการอบแห้งกล้วยและขนุนด้วยไมโครเวฟและวิธีอบลมร้อน,” in *เทคนิควิจัย (01052491)*, ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2553.
- [41] สิริชัย ส่งเสริมพงษ์, นันทนิตย์ สุรพันธุ์, and จิราพร สุวรรณวงษ์, “การอบแห้งเครื่องต้มยำด้วยไมโครเวฟแบบสายพานไหลต่อเนื่อง,” in *เทคนิควิจัย (01052491)*, ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2553.
- [42] สิริชัย ส่งเสริมพงษ์, ชลธิชา เชื้อศิริ, and ฐิตาภา โพธิ์แจ่ม, “การอบแห้งกุ้งด้วยไมโครเวฟแบบสายพานไหลต่อเนื่อง,” in *เทคนิควิจัย (01052491)*, ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2554.
- [43] สิริชัย ส่งเสริมพงษ์, อุมาวดี เกตุงาม, and ฉันทย์ชนก วิศิษฐ์ศักดิ์, “เปรียบเทียบการทำแห้งมะพร้าวชิ้นเล็กอบแห้งและมะพร้าวเกล็ดโดยเครื่องไมโครเวฟแบบสายพานไหลต่อเนื่องกับเครื่องอบแห้งลมร้อน,” in *เทคนิควิจัย (01052491)*, ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2553.
- [44] D. Wray and H. S. Ramaswamy, “Novel Concepts in Microwave Drying of Foods,” *Dry. Technol.*, vol. 33, no. 7, pp. 769–783, May 2015.
- [45] 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.
- [46] 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.
- [47] 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.

- [48] A. Arlai and S. Kietbunsri, "Effects of soaking, steaming and vacuum microwave heating on structure and physical property of quick cooking Job's Tear," *Interdiscip. Res. Rev.*, vol. 12, no. 1 SE-Research Articles, pp. 16–21, Apr. 2017.
- [49] O. Bunthawong and S. Jomduang, "The optimal drying temperature and moisture content for microwavable job's tears grains," *Chiang Mai Univ. J. Nat. Sci.*, vol. 15, pp. 163–173, Jan. 2016.
- [50] S. Jomduang and O. Bunthawong, "Optimal Pre-Treatment Processes for Microwavable Puffed Job's Tears Grains," *Chiang Mai Univ. J. Nat. Sci.*, vol. 18, Jan. 2019.
- [51] ศิริญา ทาคำ และดวงใจ ภิรธรรมถาวร, "การพัฒนากระบวนการแปรรูปลูกเดี๋ยหุงสุกเร็ว ด้วยกระบวนการให้ความร้อน," *E-Journal Sci. Technol. Silpakorn Univ.*, vol. 1, no. 2, pp. 83–94, 2557.
- [52] วีระ ศรีอริยะกุล, "อิทธิพลของการพ่นไอน้ำก่อนที่มีต่อการผลิตข้าวเหนียวโดยใช้เทคนิคฟลูอิดเซชันที่ใช้อากาศร้อน," มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2549.
- [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.
- [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.
- [55] Y. Soysal, "Microwave Drying Characteristics of Parsley," *Biosyst. Eng.*, vol. 89, no. 2, pp. 167–173, 2004.
- [56] P. Luangmalawat, S. Prachayawarakorn, A. Nathakaranakule, and S. Saponronnarit, "Effect of temperature on drying characteristics and quality of cooked rice," *LWT - Food Sci. Technol.*, vol. 41, no. 4, pp. 716–723, 2008.
- [57] 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.
- [58] 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.

- [59] 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.
- [60] M. H. Oztop, S. Sahin, and G. Sumnu, "Optimization of microwave frying of potato slices by using Taguchi technique," *J. Food Eng.*, vol. 79, no. 1, pp. 83–91, 2007.
- [61] S. Uzoma, N. Nwakuba, and K. Anyaoha, "Response Surface Optimization of Convective Air Drying Process in a Hybrid PV/T Solar Dryer," vol. 1, pp. 111–130, May 2020.
- [62] E. C. López-Vidaña, I. Pilatowsky Figueroa, F. B. Cortés, B. A. Rojano, and A. Navarro Ocaña, "Effect of temperature on antioxidant capacity during drying process of mortiño (*Vaccinium meridionale* Swartz)," *Int. J. Food Prop.*, vol. 20, no. 2, pp. 294–305, Feb. 2017.
- [63] T. Antal, "Comparative study of three drying methods: Freeze, hot air-assisted freeze and infrared-assisted freeze modes," *Agron. Res.*, vol. 13, pp. 863–878, Aug. 2015.



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายเมธา สินธุ์โคตร
วันเกิด	26ตุลาคม2529
สถานที่เกิด	77 หมู่ 3บ้านหนองแวงใต้ ตำบลขม้น อำเภอมือง จังหวัดกาฬสินธุ์
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	66 หมู่ 14 บ้านเม่นใหญ่ ตำบลแก่งเลิงจาน อำเภอมือง จังหวัดมหาสารคาม
ตำแหน่งหน้าที่การงาน	ครูอัตราจ้าง
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	ภาควิชาเทคโนโลยีเครื่องกล วิทยาลัยเทคนิคมหาสารคาม ต.ตลาด อ.เมือง จ.มหาสารคาม
ประวัติการศึกษา	พ.ศ.2548 ประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.) สาขาวิชาช่างยนต์ วิทยาลัยเทคนิคกาฬสินธุ์ พ.ศ.2550 ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) สาขาวิชาเครื่องกล วิทยาลัยเทคนิคกาฬสินธุ์ พ.ศ.2554 ประกาศนียบัตรครูเทคนิคชั้นสูง (ปทส.) สาขาวิชาเครื่องกล วิทยาลัยเทคนิคกาฬสินธุ์ พ.ศ.2566 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

พูน ปณ ทัต ชีเว