



การอบแห้งดักแด่ใหม่อีรีด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน

วิทยานิพนธ์

ของ

มงคลชัย คำปากดี

พหุ ประชิต โสเว

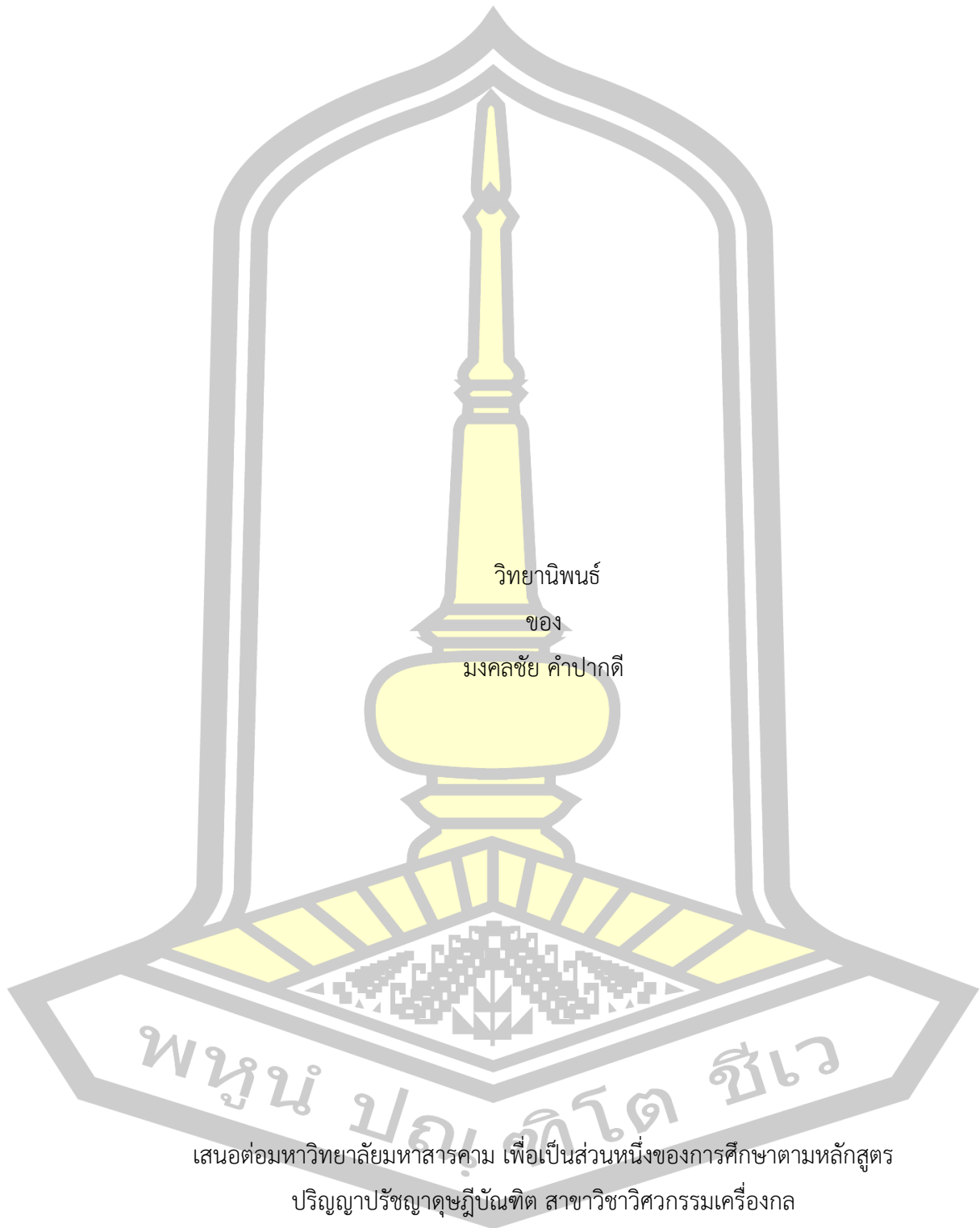
เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

พฤษภาคม 2561

สงวนลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การอบแห้งดักแด่ไหมอีรี่ด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน



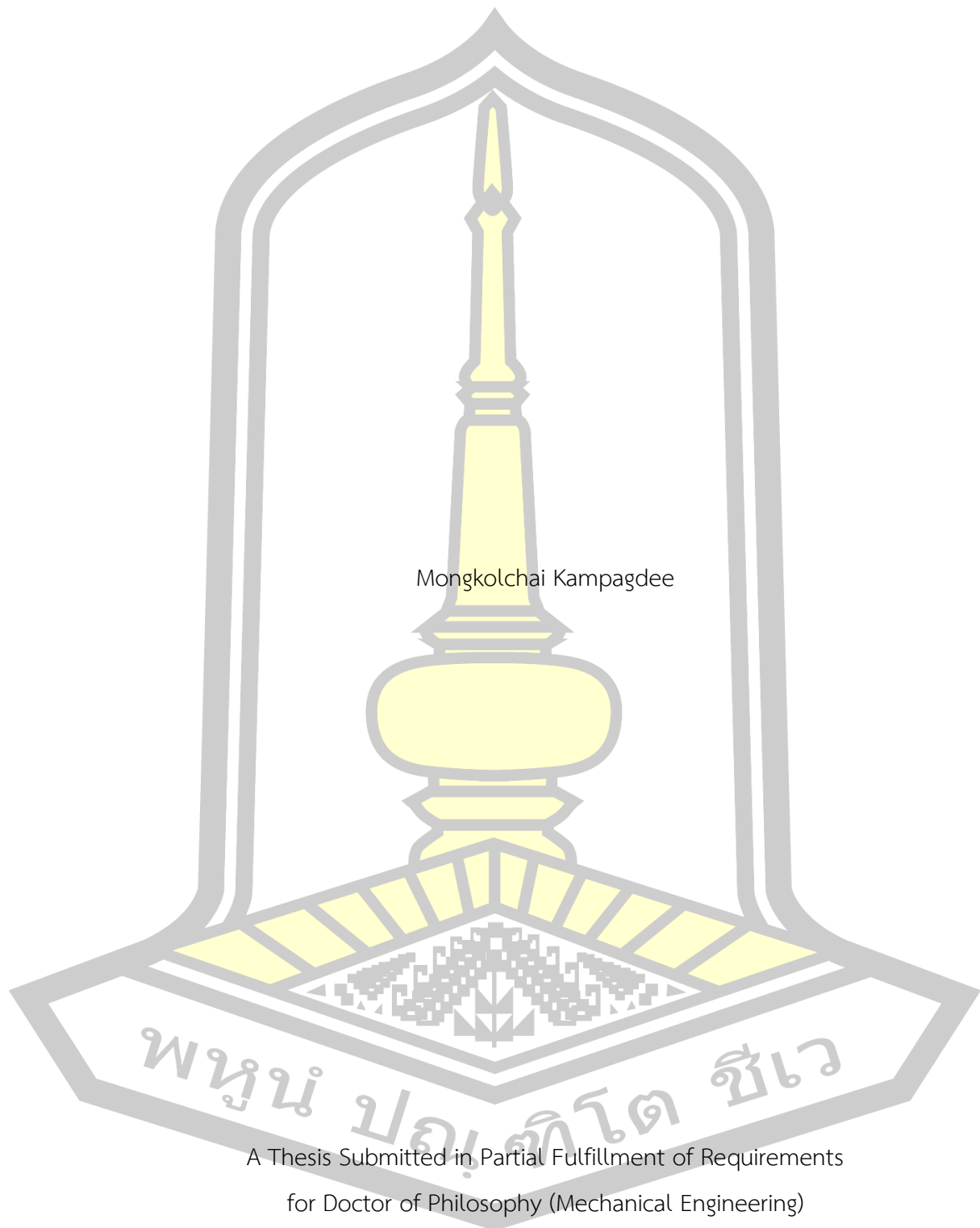
เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

พฤษภาคม 2561

สงวนลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Drying of Silkworm Pupae by Microwave-hot Air Combination



Mongkolchai Kampagdee

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

November 2018

Copyright of Mahasarakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายมงคลชัย คำปากดี
แล้วเห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชา
วิศวกรรมเครื่องกล ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(รศ. ดร. วีระเชษฐ์ จิตตานิษฐ์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผศ. ดร. ณัฐพล ภูมิสะอาด)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผศ. ดร. ละมุล วิเศษ)

กรรมการ

(ผศ. ดร. จักรมาส เลหาวิช)

กรรมการ

(ผศ. ดร. ทรงชัย วิริยะอำไพวงศ์)

กรรมการ

(ผศ. ดร. ชีรพัฒน์ ชมภูคำ)

มหาวิทยาลัยอนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญา ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

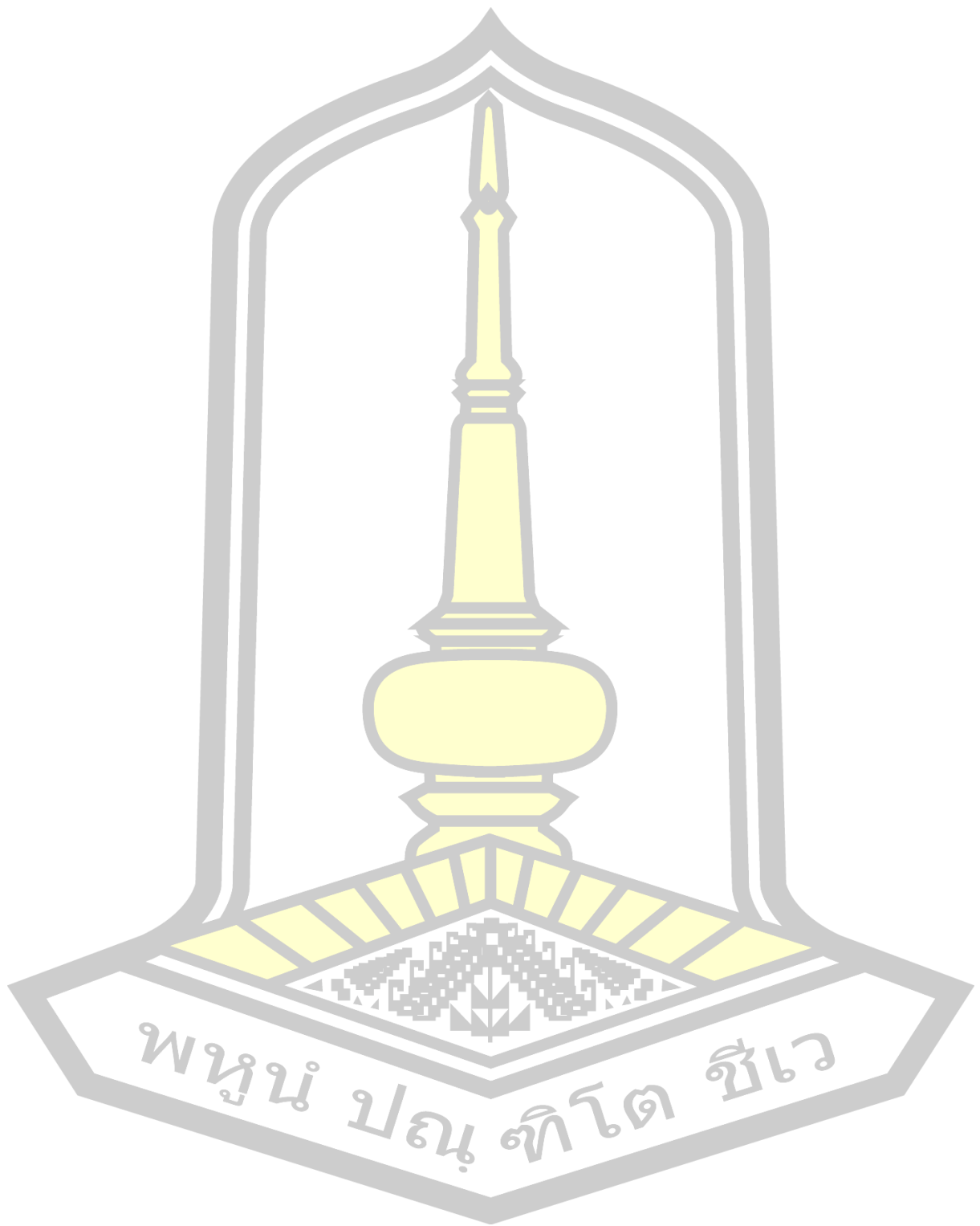
(รศ. ดร. อนงค์ฤทธิ์ แข็งแรง)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ผศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วัน.....เดือน.....ปี.....



พหุมนุ ปณ ทิโต ชีเว

ชื่อเรื่อง	การอบแห้งผักแต่ใหม่ออร์ด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน		
ผู้วิจัย	มงคลชัย คำปากดี		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐพล ภูมิสะอาด ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ละมุล วิเศษ		
ปริญญา	ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต	สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม	ปีการศึกษา	2561

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของความหนาแน่นกำลังไมโครเวฟ อุณหภูมิ อากาศร้อน และความเร็วลมต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งผักแต่ใหม่ คุณภาพ แบบจำลอง คณิตศาสตร์ การใช้พลังงานจำเพาะและสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อน การทดลองแบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นการอบแห้งผักแต่ใหม่ด้วยอากาศร้อนเพียงอย่างเดียวที่อุณหภูมิอากาศร้อน 3 ระดับ คือ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส และความเร็ว 0.5 และ 1.0 เมตรต่อวินาที ส่วนที่สอง การอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน ที่ความหนาแน่นไมโครเวฟ 0.67 1.00 และ 1.33 วัตต์ต่อกรัม ร่วมกับอากาศร้อน 3 ระดับ คือ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส และใช้ความเร็วลมคงที่ 1 เมตรต่อวินาที ความชื้นผักแต่ใหม่เริ่มต้นประมาณร้อยละ 72 ฐานเปียก อบแห้งจนได้ความชื้นสุดท้ายร้อยละ 10 ฐานเปียก หลังการอบแห้งวิเคราะห์คุณภาพด้านสี ความสว่าง (L^*) ความเป็นสีแดง (a^*) และความเป็นสีเหลือง (b^*)

จากผลการทดลองพบว่า การอบแห้งด้วยอากาศร้อนเพียงอย่างเดียว อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิอากาศร้อนและความเร็วลม โดยการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 0.5 เมตรต่อวินาที ใช้เวลาในการลดความชื้น 945 585 และ 405 นาที ที่ความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที ใช้เวลาอบแห้ง 465 345 และ 225 นาที ตามลำดับส่วนอัตราการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อนจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความหนาแน่นไมโครเวฟ โดยอุณหภูมิไม่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง การอบแห้งที่ความหนาแน่นไมโครเวฟ 1.33 วัตต์ต่อกรัม ร่วมกับลมร้อนทุกระดับอุณหภูมิ ใช้เวลาในการอบแห้ง 16 นาที เมื่อพิจารณาค่าพลังงานจำเพาะพบว่า การอบแห้งด้วยไมโครเวฟ 1.33 วัตต์ต่อกรัม ร่วมกับอากาศร้อน 50 องศาเซลเซียส ใช้พลังงานจำเพาะน้อยที่สุด 12 กิโลจูลต่อกิโลกรัม สำหรับค่าสี พบว่า ค่า L^* ของผักแต่ใหม่มีแนวโน้มลดลง ค่า a^* และ b^* เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและความหนาแน่นไมโครเวฟเพิ่มขึ้น โดยค่า L^* ของการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อนจะมีค่าสูงกว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อนเพียงอย่างเดียว สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มี

ค่าเพิ่มขึ้นตามความหนาแน่นไมโครเวฟ ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0.00775 - 0.0186 ตารางเซนติเมตรต่อ
นาที การทำนายผลการอบแห้งดักแต่ใหม่ด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อนด้วยสมการแบบจำลอง
ทางคณิตศาสตร์พบว่า สมการของ Page สามารถทำนายผลการอบแห้งได้ดีที่สุด

คำสำคัญ : ดักแต่ใหม่อีรี, ไมโครเวฟแบบต่อเนื่อง, การใช้พลังงานจำเพาะ, สัมประสิทธิ์การแพร่
ความชื้น



TITLE Drying of Silkworm Pupae by Microwave-hot Air Combination
AUTHOR Mongkolchai Kampagdee
ADVISORS Assistant Professor Nattapol Poomsa-ad , Ph.D.
 Assistant Professor Lamul Wiset , Ph.D.
DEGREE Doctor of Philosophy **MAJOR** Mechanical Engineering
UNIVERSITY Mahasarakham **YEAR** 2018
 University

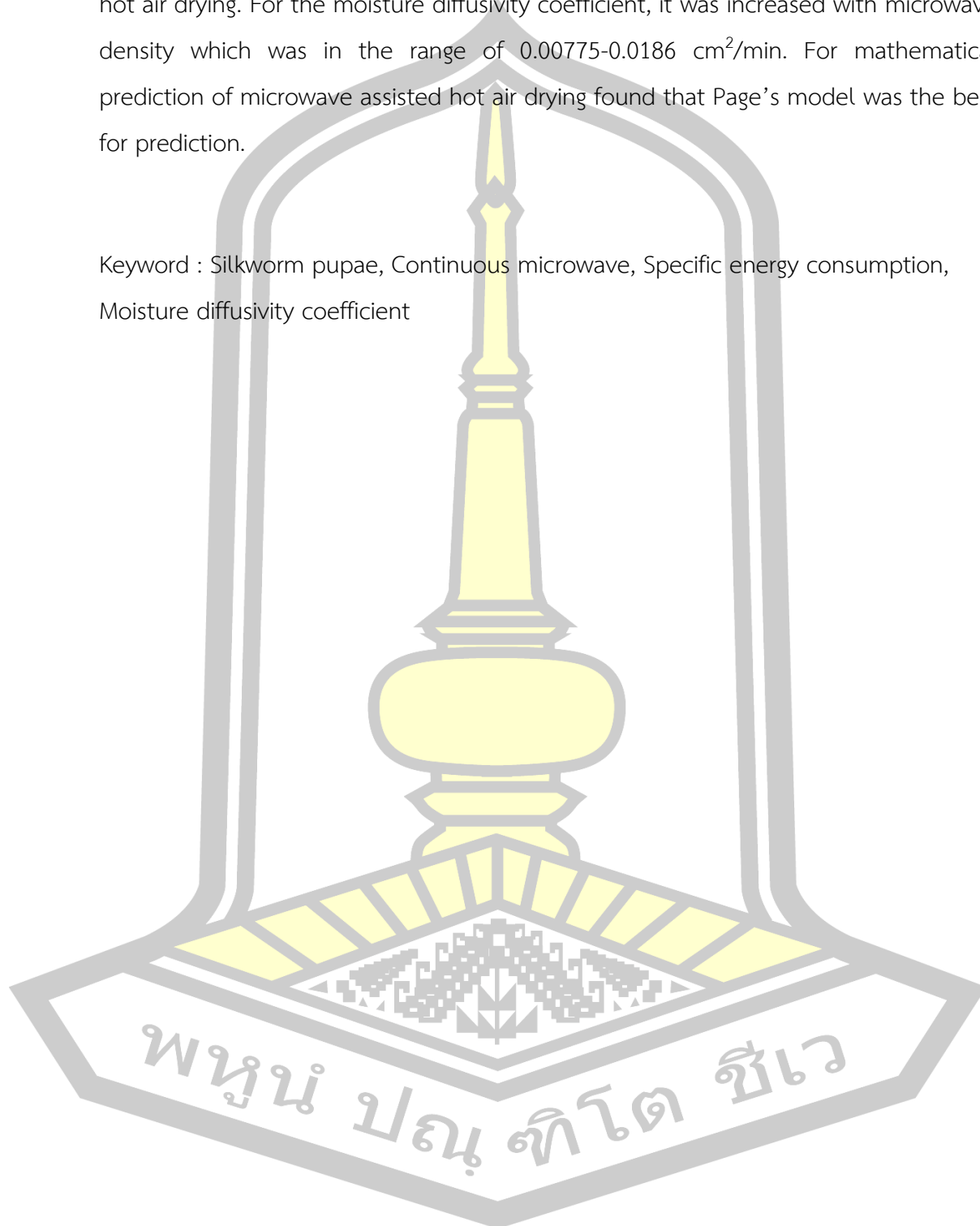
ABSTRACT

The aims of this research are to study the effect of microwave density, drying temperature and air velocity on drying kinetics of silkworm pupae, quality, mathematical model, specific energy consumption and moisture diffusivity coefficient. The experiment was divided into 2 parts. The first part was the drying of silkworms with hot air only at temperature of 50, 60 and 70 °C with air velocity of 0.5 and 1.0 m/s. The second part was microwave drying with hot air combination at microwave density of 0.67, 1.00 and 1.33 W/g with hot air at 50, 60 and 70 °C at air velocity of 1 m/s. Initial moisture of silkworm pupae at about 72 percent wet basis was dried until the final moisture content down to 10 percent wet basis. After drying, color values, brightness (L^*), redness (a^*), and yellowness (b^*) were determined.

Results showed that only hot air drying, drying rate was increased with drying temperature and air velocity. Drying at 50, 60 and 70 degrees Celsius at air velocity of 0.5 m/s took 945, 585 and 405 min, at 1.0 m/s took 465, 345 and 225 min, respectively. Moreover, the drying rate of drying with microwave-hot air combination was increased with microwave density, while as the temperature did not affect to the drying rate. The drying time of drying at microwave density of 1.33 W/g with hot air temperature was 16 min. When considering in specific energy consumption found that drying at microwave density of 1.33 W/g combined with air temperature of 50 °C had the lowest value of 12 kJ/kg. For color values, the trend of L^* was decreased and a^* b^* were increased when the drying temperature and microwave density

increased. The L^* of drying by microwave-hot air combination was higher than only hot air drying. For the moisture diffusivity coefficient, it was increased with microwave density which was in the range of 0.00775-0.0186 cm^2/min . For mathematical prediction of microwave assisted hot air drying found that Page's model was the best for prediction.

Keyword : Silkworm pupae, Continuous microwave, Specific energy consumption, Moisture diffusivity coefficient



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างสูงยิ่งจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพล ภูมิสะอาด อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ละมุล วิเศษ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำข้อคิดเห็นตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.วีระเชษฐ์ จิตตามิชัย ประธานกรรมการสอบผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทรงชัย วิริยะอำไพวงศ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักรมาส เลาหวนิช และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรพัฒน์ ชมภูคำ กรรมการสอบ ซึ่งได้กรุณาตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น นอกจากนี้ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ และผู้ที่ไม่ได้กล่าวถึง ที่เป็นกำลังใจและให้ความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ท้ายนี้ผู้วิจัยขอน้อมรำลึกถึงอำนาจบารมีของคุณพระศรีรัตนตรัย และสิ่งศักดิ์สิทธิ์ทั้งหลายที่อยู่ในสากลโลก อันเป็นที่พึ่งให้ผู้วิจัยมีสติปัญญาในการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ผู้วิจัยขอให้เป็นกตเวทิตาแต่บิดา มารดา ครอบครัวของผู้วิจัย ตลอดจนผู้แต่งหนังสือและบทความต่างๆ ที่ให้ความรู้แก่ผู้วิจัยจนสามารถให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยดี

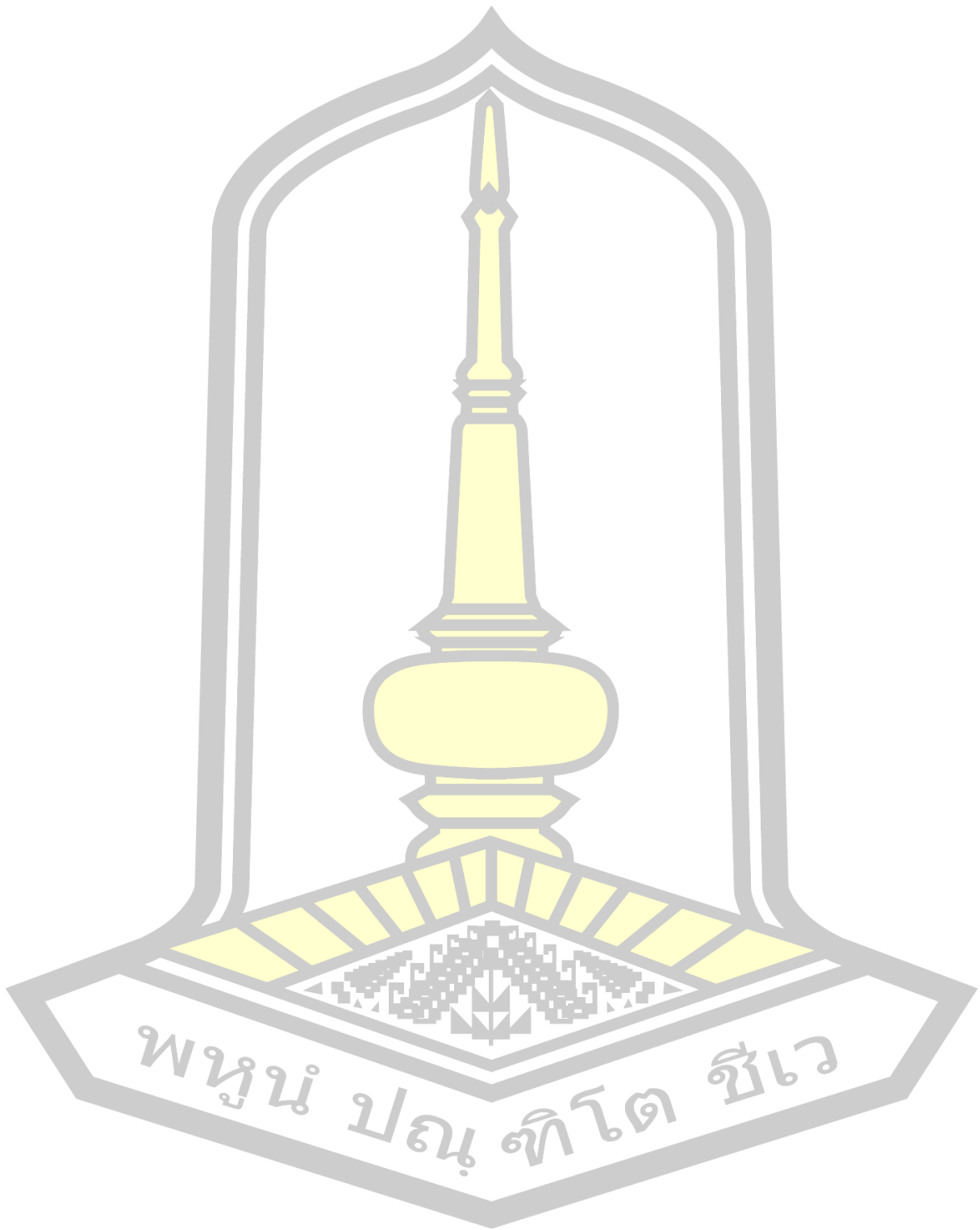
มงคลชัย คำปากดี

พูน ปณ ทิโต ชีเว

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ฉ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ฅ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพประกอบ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ภูมิหลัง.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 สมมุติฐานของการวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.6 สถานที่ดำเนินงาน.....	4
บทที่ 2 ปรีทัศน์เอกสารข้อมูล.....	5
2.1 ดักแต่้ไหมอีรี่ (Silkworm pupae).....	5
2.2 การอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน.....	7
2.3 การออกแบบเครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน.....	11
2.4 ทฤษฎีการอบแห้ง.....	14
2.5 ความชื้น (moisture content).....	18
2.6 อัตราส่วนความชื้น (moisture ratio).....	19
2.7 แบบจำลองการอบแห้งชั้นบาง.....	20

2.8 การประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น	21
2.9 การวัดค่าสี	22
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	23
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	30
3.1 การเตรียมดักแด่ไหมอีรี่	30
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	30
3.3 การทำงานของเครื่องอบแห้งไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน	31
3.4 การทดสอบหาค่ากำลังไมโครเวฟของเครื่องอบแห้งไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน	32
3.5 การดำเนินการทดลองเครื่องอบแห้งไมโครเวฟ	32
3.6 การดำเนินการทดลองอบแห้งดักแด่ไหมอีรี่	34
3.7 ขั้นตอนการศึกษาการอบแห้งดักแด่ไหมอีรี่	35
3.8 จลนศาสตร์การอบแห้งดักแด่ไหมอีรี่ด้วยการอบแห้งดักแด่ไหมอีรี่ร่วมกับอากาศร้อน	37
3.9 ศึกษาความสัมพันธ์พลังงานจำเพาะ	39
3.10 การวิเคราะห์คุณภาพสี	40
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปราย	42
4.1 ผลการทดสอบของเครื่องอบแห้งไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน	42
4.2 ผลการศึกษาอบแห้งดักแด่ไหมอีรี่ด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน	46
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	90
5.1 ผลการทดลองอบแห้งดักแด่ไหมอีรี่ด้วยอากาศร้อนเพียงอย่างเดียว	90
5.2 ผลการอบแห้งดักแด่ไหมด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน	90
5.3 ข้อเสนอแนะ	91
บรรณานุกรม	93
ภาคผนวก	99
ภาคผนวก ก. ค่าความชื้นการอบแห้งดักแด่ไหมอีรี่	100



สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 2.1 องค์ประกอบของกรดอะมิโนในดักแด่ไหมอีรี่	6
ตาราง 2.2 สมการแบบจำลองการอบแห้งชั้นบาง	21
ตาราง 4.1 ผลการทดสอบค่ากำลังไมโครเวฟที่ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่างๆ	43
ตาราง 4.2 กำลังไมโครเวฟดูดซับที่ตำแหน่งต่างๆ ในห้องอบไมโครเวฟ	44
ตาราง 4.3 ผลการทดลองค่าของกำลังไมโครเวฟเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงมวลน้ำที่ดูดซับ	45
ตาราง 4.4 ค่าสื่อดักแด่ไหมอีรี่อบแห้งด้วยอากาศร้อนเพียงอย่างเดียว	51
ตาราง 4.5 ค่าสื่อดักแด่ไหมอีรี่ภายหลังการอบแห้งดักแด่ไหมอีรี่ด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน	67
ตาราง 4.6 ค่าสีของดักแด่ไหมอบแห้งการทดลองที่ 3	75
ตาราง 4.7 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ	76
ตาราง 4.8 ค่าคงที่ของสมการคณิตศาสตร์การอบแห้งดักแด่ไหมอีรี่ด้วยไมโครเวฟและอากาศร้อน..	77
ตาราง 4.9 ค่าความชื้นจากการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ลอการิทึมธรรมชาติอัตราส่วนความชื้นดักแด่ไหมอีรี่และเวลาที่ใช้การอบแห้ง	87

พูน ปณ ทิโต ชีเว

สารบัญภาพประกอบ

	หน้า
ภาพประกอบ 2.1 การเจริญเติบโตดักแด้ไหมอีรี่.....	5
ภาพประกอบ 2.2 แล็บแม่เหล็กไฟฟ้า	7
ภาพประกอบ 2.3 ผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า dielectric loss ของน้ำและน้ำแข็ง... ..	9
ภาพประกอบ 2.4 แมกนีตรอนที่ใช้ในเตาไมโครเวฟ	9
ภาพประกอบ 2.5 แผนผังระบบเครื่องอบแห้งไมโครเวฟ	12
ภาพประกอบ 2.6 แผนผังเครื่องอบแห้งไมโครเวฟร่วมกับสุญญากาศ.....	13
ภาพประกอบ 2.7 แผนผังระบบการควบคุมกำลังไมโครเวฟ.....	13
ภาพประกอบ 2.8 การเคลื่อนที่ของความชื้นออกจากชั้นของอาหารระหว่างการอบแห้ง	15
ภาพประกอบ 2.9 การอบแห้งภายใต้คงที่	16
ภาพประกอบ 2.10 ช่วงอัตราการอบแห้ง.....	16
ภาพประกอบ 2.11 ค่าสีในระบบ CIE L* a* b*.....	23
ภาพประกอบ 3.1 เครื่องอบแห้งไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน	31
ภาพประกอบ 3.2 ตำแหน่งการวัดค่ากำลังไมโครเวฟภายในห้องอบแห้งไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน	33
ภาพประกอบ 3.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาอบแห้ง	38
ภาพประกอบ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างลอการิธึมธรรมชาติของอัตราส่วนความชื้นกับ เวลาการอบแห้ง.....	39
ภาพประกอบ 3.5 เครื่องวัดสี รุ่น Color Flex EZ CFEZ0939.....	41
ภาพประกอบ 4.1 ปริมาณความชื้นดักแด้ไหมอีรี่ในระหว่างการอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่ อุณหภูมิต่าง ๆ.....	47
ภาพประกอบ 4.2 ปริมาณอัตราส่วนความชื้นดักแด้ไหมอีรี่ในระหว่างการอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่ อุณหภูมิต่าง ๆ.....	48

ภาพประกอบ 4.17 เปรียบเทียบผลการทำนายการอบแห้งผักแต่ใหม่ออร์ที่อุณหภูมิตั้งที่ 50 องศาเซลเซียส ร่วมกับกำลังไมโครเวฟที่ความหนาแน่นต่างๆ 80

ภาพประกอบ 4.18 กราฟเปรียบเทียบผลการทำนายการอบแห้งผักแต่ใหม่ออร์ที่อุณหภูมิตั้งที่ 60 องศาเซลเซียส ร่วมกับไมโครเวฟที่ความหนาแน่นต่างๆ 81

ภาพประกอบ 4.19 กราฟเปรียบเทียบผลการทำนายการอบแห้งผักแต่ใหม่ออร์ที่อุณหภูมิตั้งที่ 70 องศาเซลเซียส ร่วมกับไมโครเวฟที่ความหนาแน่นต่างๆ 83

ภาพประกอบ 4.20 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นจากการทดลองกับการทำนายด้วยสมการชั้นบาง 84

ภาพประกอบ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมธรรมชาติของอัตราส่วนความชื้นกับเวลาการอบแห้งผักแต่ใหม่ออร์ด้วยความหนาแน่นไมโครเวฟ 0.67, 1.00 และ 1.33 วัตต์ต่อกรัม ที่อุณหภูมิตั้งที่ 50 องศาเซลเซียส 86

ภาพประกอบ 4.22 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นผักแต่ใหม่ออร์ด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อนที่สถานะแตกต่างกัน 88



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ภูมิหลัง

ไหมเป็นแมลงผีเสื้อกลางคืนชนิดหนึ่งที่น่ามาเพาะเลี้ยงเพื่อผลิตผ้าไหม จากการเก็บเกี่ยวรังไหมนอกจากจะได้เส้นไหมแล้วยังมีผลพลอยได้ คือ ตัวดักแด้ไหมซึ่งคิดเป็นน้ำหนักประมาณร้อยละ 60 ของรังไหม (Longvah, Mangthya, & Ramulu, 2011) ปริมาณของดักแด้ไหมมีจำนวนเพิ่มมากขึ้นในแต่ละปีสอดคล้องกับความนิยมและความต้องการผลิตภัณฑ์ผ้าไหมที่เพิ่มมากขึ้น นับตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันมีหลายประเทศนิยมนำดักแด้ไหมมารับประทานเป็นอาหาร เช่น ประเทศแถบแอฟริกา อเมริกา ยุโรป และเอเชีย เนื่องจากมีรสชาติที่อร่อยและมีสารอาหารที่มีประโยชน์ จากการวิเคราะห์องค์ประกอบและคุณค่าทางโภชนาการพบว่าดักแด้ไหมมีปริมาณโปรตีนสูงและเป็นโปรตีนที่มีคุณภาพดีมากกว่าร้อยละ 50 ของน้ำหนักแห้ง (Zhou & Han, 2006) ซึ่งมีปริมาณมากกว่าในเนื้อหมูถึง 2 เท่าและมากกว่าไข่และนมถึง 4 เท่า (Yang, Tang, Tong, & Liu, 2009) นอกจากนี้ดักแด้ไหมยังประกอบด้วยกรดอะมิโนถึง 18 ชนิด และมี 8 ชนิดที่มีความจำเป็นต่อร่างกายมนุษย์ ดังนั้นดักแด้ไหมจึงเป็นแหล่งโปรตีนที่มีราคาถูก ทั้งยังสามารถเพิ่มผลผลิตจำนวนมากได้ในระยะเวลาสั้นๆ ประเทศไทยมีการเลี้ยงไหมกันมากในภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ นิยมนำดักแด้ไหมมารับประทานเป็นอาหาร ดังจะเห็นได้ตามตลาดท้องถิ่นและวิสาหกิจชุมชน โดยนำมาทอดซึ่งเป็นวิธีที่นิยมในท้องตลาด นอกจากนี้ยังได้มีการนำดักแด้ไหมมาแปรรูปในแบบต่างๆ เพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าและช่วยยืดระยะเวลาการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ดักแด้ไหม เช่นดักแด้ไหมอบแห้งบรรจุกระป๋อง ดักแด้ไหมอบแห้งบรรจุฟอยล์ และดักแด้ไหมแช่แข็ง เป็นต้น (ชวธีร์ ศรีแก้ว & สิริชัย ส่งเสริมพงษ์, 2555)

โดยทั่วไปเกษตรกรจะนำดักแด้ไหมที่เก็บเกี่ยวได้มาลวกให้สุกแล้วเก็บในห้องเย็น แต่เนื่องจากดักแด้ไหมสุกยังมีความชื้นที่สูง ทำให้ไม่สามารถเก็บรักษาไว้นานได้เพราะจะทำให้เกิดการเน่าเสีย มีกลิ่นหืน และรสชาติไม่ดี ทำให้เกิดปัญหาในการจัดเก็บเมื่อดักแด้ไหมที่มีปริมาณมาก การใช้เทคนิคการอบแห้งเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ซึ่งมีบทบาทสำคัญจากมุมมองเชิงพาณิชย์ การอบแห้งโดยการพาความร้อนเป็นเทคนิคที่ได้รับการยอมรับมากที่สุด แต่การอบแห้งผลิตภัณฑ์สัมผัสกับอุณหภูมิสูงเป็นเวลานานทำให้เกิดความเสียหายต่อ รสชาติ สี สารอาหาร และใช้พลังงานอบแห้งมาก เพื่อป้องกันการสูญเสียคุณภาพการใช้เทคโนโลยีใหม่ที่สร้างความร้อนที่รวดเร็ว

และมีประสิทธิภาพเช่น ไมโครเวฟและคลื่นวิทยุ จึงได้รับความนิยมจากนักวิจัยอย่างแพร่หลายหลายคนในวงกว้าง (Das & Arora, 2018)

การอบแห้งด้วยไมโครเวฟ ใช้หลักการของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของน้ำที่อยู่ภายในผลิตภัณฑ์ ทำให้โมเลกุลของน้ำเกิดการหมุนตัวอย่างรวดเร็วและเกิดการชนกระแทกของโมเลกุลของน้ำทำให้เกิดความร้อนขึ้นอย่างรวดเร็ว จากปฏิกิริยาดังกล่าวความร้อนจะเกิดขึ้นภายในของผลิตภัณฑ์ ทำให้เกิดความดันภายในผลิตภัณฑ์ผลักดันน้ำจากภายในออกมายังผิวนอกได้เร็วขึ้น ทำให้กระบวนการอบแห้งมีระยะเวลาการอบแห้งแบบคงที่เพิ่มขึ้น (Tsuruta, Tanigawa, & Sashi, 2015) การใช้พลังงานไมโครเวฟในการอบแห้งผลิตภัณฑ์เป็นวิธีการที่ช่วยแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างการอบแห้งด้วยการพาอากาศร้อนและช่วยรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในขั้นสุดท้าย (Aghilinategh, Rafiee, Hosseinpour, Omid, & Mohtasebi, 2015) ด้วยคุณสมบัติดังกล่าวทำให้ไมโครเวฟถูกนำมาใช้ร่วมกับอากาศร้อนเพื่อชดเชยและแก้ไขปัญหที่เกิดขึ้นจากการอบแห้งด้วยอากาศร้อนเพียงอย่างเดียว และได้นำไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อนมาใช้ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรอย่างแพร่หลาย เช่น มันฝรั่ง (Pu, Song, Song, & Wang, 2017) ถั่วเหลือง และเมล็ดคาโนลา (Hemis, Gariépy, Choudhary, & Raghavan, 2017) เป็นต้น เมื่อเปรียบเทียบกับ การอบแห้งด้วยอากาศร้อน การอบแห้งแบบไมโครเวฟมีข้อดีหลายอย่าง อย่างไรก็ตามการใช้ไมโครเวฟมีข้อเสีย คือ ความร้อนที่ไม่สม่ำเสมอในกระบวนการอบแห้งสาเหตุเนื่องจากปริมาณความชื้นในผลิตภัณฑ์ รูปร่างของผลิตภัณฑ์ และระบบการทำงานของไมโครเวฟ

ไมโครเวฟทั่วไปในท้องตลาดมีหลักการทำงานระบบแบบปิด-เปิด โดยเมื่อไมโครเวฟทำงานพลังงานจะถูกจ่ายให้ไมโครเวฟ 100% และเมื่อระบบไม่ทำงานพลังงานจะจ่ายไฟ 0 % ส่งผลให้มีอุณหภูมิสูงเมื่อไมโครเวฟทำงานและอุณหภูมิต่ำลงเมื่อไมโครเวฟไม่ทำงาน (Sunjka, Rennie, Beaudry, & Raghavan, 2004) เนื่องจากการกระจายกำลังของไมโครเวฟไม่สม่ำเสมอ การใช้กำลังไมโครเวฟอย่างต่อเนื่องระหว่างการอบแห้งด้วยไมโครเวฟช่วยให้เกิดความร้อนภายในผลิตภัณฑ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อรูปร่างของผลิตภัณฑ์แน่นอน ดังนั้นจึงมีการนำเทคนิคการอบแห้งไมโครเวฟร่วมกับเทคนิคการอบแห้งอื่น ๆ เพื่อให้ได้การอบแห้งแบบสม่ำเสมอรวดเร็วและมีประสิทธิภาพโดยไม่มีการสูญเสียคุณภาพของผลิตภัณฑ์ (J. Wang, Xiong, & Yu, 2004) ซึ่งทำงานไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อนเป็นอีกวิธีหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ร่วมกันในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร

จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้นผู้วิจัย จึงสนใจศึกษาการอบแห้งผักผลไม้ด้วยเทคนิคการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน โดยศึกษาปัจจัยของกำลังไมโครเวฟทำงานอย่างต่อเนื่อง และมีค่าคงที่ตลอดการอบแห้ง ความเร็วอากาศร้อน และอุณหภูมิของอากาศที่เหมาะสม ทั้งยังศึกษาประสิทธิภาพของการใช้พลังงานที่ใช้ในการอบแห้งผักผลไม้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน
- 1.2.2 เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อนที่สภาวะการอบแห้งต่างกัน
- 1.2.3 เพื่อศึกษาคุณภาพของดกแต่ใหม่อีรีหลังการอบแห้ง และค่าความสิ้นเปลืองการใช้พลังงานจำเพาะ และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น
- 1.2.4 เพื่อศึกษาหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น ของการอบแห้งดกแต่ใหม่อีรี

1.3 สมมุติฐานของการวิจัย

การอบแห้งดกแต่ใหม่อีรีด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อนที่ระดับแตกต่างกัน จะส่งผลทำให้การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของสีภายหลังการอบแห้งมีความแตกต่างกัน และการนำไมโครเวฟมาอบแห้งร่วมกับอากาศร้อนทำให้ใช้เวลาการอบแห้งที่สั้นลง

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาการอบแห้งดกแต่ใหม่พันธุ์อีรีจากอำเภอนาคู จังหวัดกาฬสินธุ์
- 1.4.2 เครื่องอบแห้งแบบไมโครเวฟกับอากาศร้อนมีขนาดห้องอบแห้งยาว 30 เซนติเมตร กว้าง 21 เซนติเมตร และสูง 24 เซนติเมตร
- 1.4.3 ศึกษาการอบแห้งดกแต่ใหม่อีรีโดยได้แบ่งการทดลองเป็น 3 การทดลอง ได้แก่
 - การทดลองที่ 1 การอบแห้งด้วยอากาศร้อนเพียงอย่างเดียว
 - ปัจจัยที่ใช้ในการศึกษา
 - อุณหภูมิอากาศร้อน 3 ระดับ คือ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส
 - ความเร็วลม 2 ระดับ คือ 0.5 และ 1.0 เมตรต่อวินาที
 - การทดลองที่ 2 ศึกษาปัจจัยที่มีผลในการอบแห้งดกแต่ใหม่อีรีด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน
 - ปัจจัยที่ใช้ในการศึกษา
 - ความหนาแน่นไมโครเวฟ 3 ระดับ คือ 0.67, 1.33 และ 2.00 วัตต์ต่อกรัม
 - อุณหภูมิอากาศร้อน 3 ระดับ คือ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส

ความเร็วลมคงที่ 1.0 และ 2.0 เมตรต่อวินาที

การทดลองที่ 3 ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งผักแห้งใหม่ออร์แกนิกด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน

ปัจจัยที่ใช้ในการศึกษา

ความหนาแน่นไมโครเวฟ 3 ระดับ คือ 0.67, 1.00 และ 1.33 วัตต์ต่อกรัม

อุณหภูมิอากาศร้อน 3 ระดับ คือ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส

ความเร็วลมคงที่ 1.0 เมตรต่อวินาที

1.4.4 ดักแต่ใหม่ออร์แกนิกที่ความชื้นเริ่มต้นเท่ากับร้อยละ 72 ฐานเปียก และความชื้นสุดท้ายร้อยละ 10 ฐานเปียก

1.4.5 สมบัติทางกายภาพสีของผักแห้งใหม่ออร์แกนิกภายหลังการอบแห้ง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้เครื่องอบแห้งไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อนที่มีการทำงานของแมกนีตรอนแบบต่อเนื่อง

1.5.2 ทราบถึงปัจจัยที่มีผลของต่อการอบแห้งผักแห้งใหม่ออร์แกนิกด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน

1.5.3 ทราบถึงสมบัติทางกายภาพสีของผักแห้งใหม่ที่ผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน ที่สภาวะแตกต่างกัน

1.6 สถานที่ดำเนินงาน

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

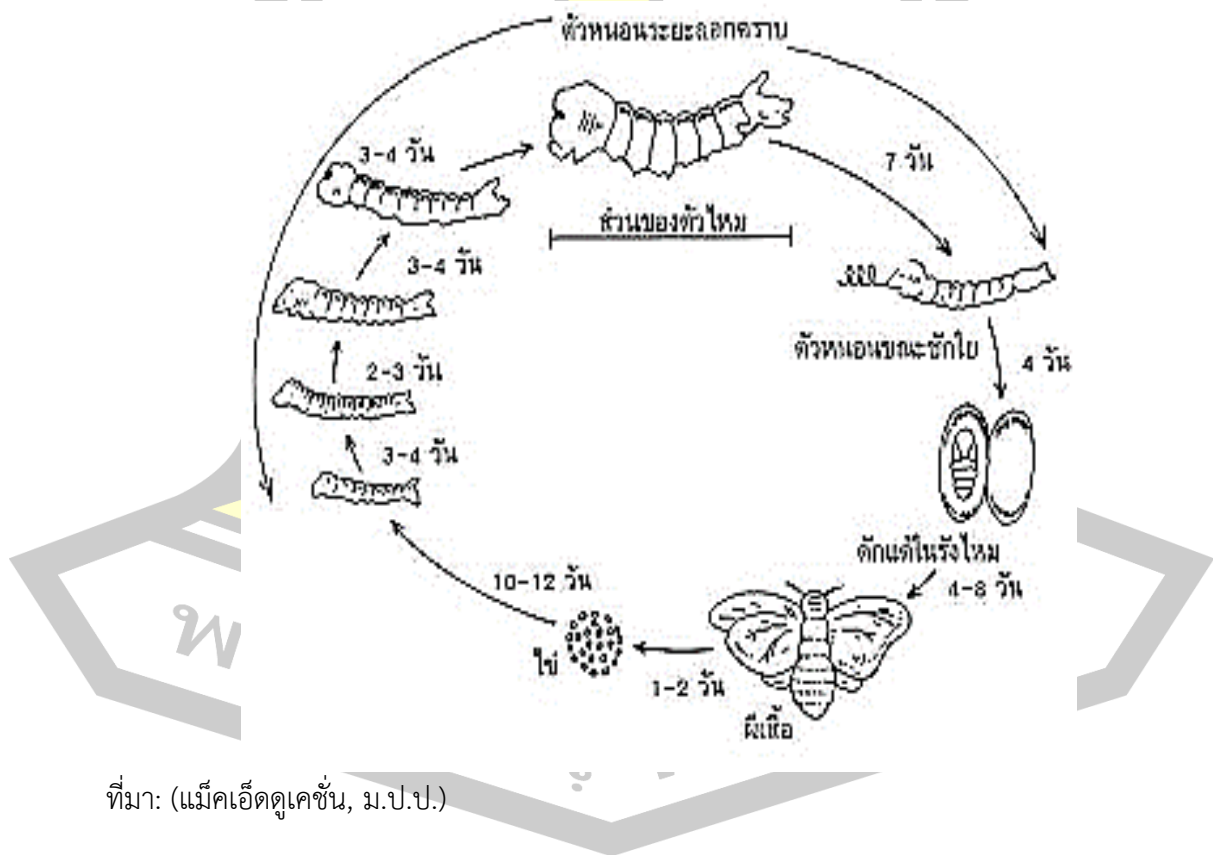
พูน ปณ ทิโต ชีเว

ปริทัศน์เอกสารข้อมูล

2.1 ดักแด้ไหมอีรี่ (Silkworm pupae)

ดักแด้ไหมอีรี่ (Philosoiaricinii, Attacusricinii or P. cynthia) เป็นไหมป่าสายพันธุ์ที่กินใบมันสำปะหลัง (cassava plant) และใบละหุ่ง (castor plant) เป็นผีเสื้อกลางคืนในอันดับ Lepidoptera วงศ์ Saturniidae เป็นไหมชนิดฟักตลอดปี (polyvoltine) ไหมอีรี่สามารถเลี้ยงได้ตลอดปี ขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศในแต่ละพื้นที่ เลี้ยงได้ทั้งในที่สูงและที่ราบ มีวงจรชีวิต 45 - 60 วัน การเติบโตแบ่งเป็น 4 ระยะด้วยกัน คือ ไข่ ตัวหนอน ดักแด้ไหม และผีเสื้อ ดังแสดงในภาพประกอบ

2.1



ภาพประกอบ 0.1 การเจริญเติบโตดักแด้ไหมอีรี่

ดักแด้ไหมอีรีเดิมเพาะเลี้ยงที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือประเทศไทย ใช้ในการผลิตผ้าไหม จากการเพาะเลี้ยงไหม ดักแด้ไหมคือผลพลอยได้จากการเก็บเกี่ยวรังไหม มีปริมาณน้ำหนักร้อยละ 60 ของรังไหม นิยมนำมารับประทานกันมาก ซึ่งจะพบการซื้อขายกันมากในตลาดท้องถิ่นในประเทศต่างๆ เช่น ญี่ปุ่น อินเดีย ไทย จีน และเกาหลี ดักแด้ไหมได้รับความนิยมนำมารับประทานเป็นอาหาร เนื่องจากมีคุณค่าทางโภชนาการโปรตีนสูงซึ่งเป็นสารอาหารที่มีมากเป็นอันดับหนึ่งในดักแด้ไหม โดยปริมาณโปรตีนจะขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ไหมและอาหารที่ใช้เลี้ยงตัวไหม องค์ประกอบที่สำคัญของโปรตีนในดักแด้ไหมอีรีประกอบด้วยกรดอะมิโน 18 ชนิด ซึ่งมีกรดอะมิโน 8 ชนิด ที่จำเป็นสำหรับร่างกาย ดังแสดงรายละเอียดในตาราง 2.1

ตาราง 0.1 องค์ประกอบของกรดอะมิโนในดักแด้ไหมอีรี

ชนิดกรดอะมิโน	ปริมาณกรดอะมิโนในดักแด้ไหมอีรี (กรัม/100 กรัม)
Aspartic acid	9.89
Threonine	4.75
Serine	5.25
Glutamic acid	12.9
Proline	6.46
Glycine	4.94
Alanine	6.14
Cystine	0.53
Valine	5.36
Methionine	2.31
Isoleucine	4.42
Leucine	6.63
Tyrosine	6.40
Phenylalanine	5.24
Histidine	2.67
Lysine	6.54
Arginine	4.41
Total amino acid	94.8
Total essential amino acid	44.9

ที่มา: (Longvah et al., 2011)

2.2 การอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน

2.2.1 การอบแห้งด้วยการพาความร้อน

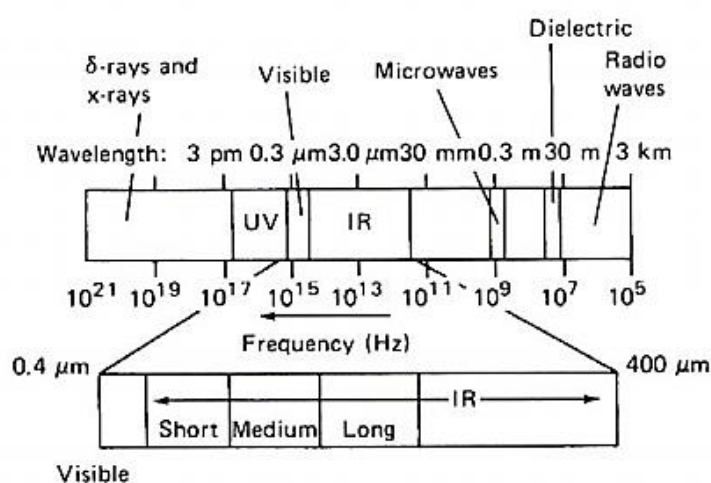
คือการอบแห้งที่ใช้ความร้อนระเหยน้ำจากผลิตภัณฑ์ โดยอาศัยหลักการพาความร้อนสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ การพาความร้อนตามธรรมชาติ และการพาความร้อนแบบบังคับ

1) การเคลื่อนที่ของอากาศแบบธรรมชาติ สามารถเกิดขึ้นได้เนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ คือ อากาศที่อุณหภูมิสูงจะมีความหนาแน่นต่ำกว่าอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำ ทำให้เกิดการหมุนเวียนของอากาศ ข้อดีของการอบแห้งแบบนี้ คือ ต้นทุนต่ำ ดูแลรักษาง่าย แต่มีข้อเสียคือมีประสิทธิภาพในการอบแห้งต่ำ

2) การเคลื่อนที่ของอากาศแบบบังคับ การอบแห้งแบบนี้จะใช้พัดลมเป่าอากาศเป็นตัวช่วยในการหมุนเวียนของอากาศ ทำให้อากาศมีประสิทธิภาพในการอบแห้งสูงขึ้น แต่มีข้อเสียคือค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นในส่วนของการพัดลมเป่าอากาศและการดูแลรักษา

2.2.2 การอบแห้งด้วยไมโครเวฟ

ไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic wave) ที่มีความถี่ระหว่าง 300 เมกกะ เฮิร์ต ถึง 300 จิกะเฮิร์ต หรือระหว่างความยาวคลื่น 1 มิลลิเมตร ถึง 100 เซนติเมตร (Rosenthal, 1992) ดังแสดงในภาพประกอบ 2.2 ไมโครเวฟไม่ใช่ความร้อนแต่อยู่ในรูปของพลังงาน และถูกเปลี่ยนไปเป็นความร้อนโดยการสั่นสะเทือนของอนุภาคที่มีประจุและหมุนตัวโมเลกุลที่มีขั้ว ทำให้เกิดการเสียดสีหรือชนกับอนุภาคหรือโมเลกุลที่อยู่ข้างเคียงกัน ซึ่งเกิดขึ้นหลังจากที่ผลิตภัณฑ์ได้รับคลื่น



ที่มา: (Fellows, 2000)

ภาพประกอบ 0.2 แถบแม่เหล็กไฟฟ้า

การดูดซับพลังงานดังกล่าวเป็นผลให้เกิดความร้อนขึ้น (Fellows, 2000) และมีความแตกต่างจากการให้ความร้อนแบบโอมมิคตรงที่ความร้อนแบบโอมมิคนั้นเกิดจากความต้านทานกระแสไฟฟ้า (electrical resistance) ของผลิตภัณฑ์และเปลี่ยนเป็นความร้อนโดยตรง และข้อดีอีกประการหนึ่ง คือ ไมโครเวฟไม่ใช้ป้อนในการลำเลียงผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในท่อให้ผ่านกระบวนการดังกล่าวจึงไม่เป็นการทำลายคุณลักษณะหรือโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ (รุ่งนภา พงศสวัสดิ์มานิต, ม.ป.ป.)

การทำให้เกิดความร้อนจากพลังงานไดอิเล็กทริก (dielectric heating)

(Fellows, 2000) รายงานว่าพลังงานไดอิเล็กทริก (dielectric energy) จากคลื่นไมโครเวฟและความถี่วิทยุ (radio frequency) เป็นพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าอย่างหนึ่ง ซึ่งส่งผ่านในรูปแบบของคลื่น (wave) และแทรก (penetrate) เข้าไปในผลิตภัณฑ์และพลังงานนี้จะถูกดูดซับ (absorb) และเปลี่ยนแปลงเป็นพลังงานความร้อนขึ้น โดยทั่วไปเราสามารถทำให้เกิดความร้อนในผลิตภัณฑ์ได้ทั้งโดยทางตรง (direct method) ซึ่งความร้อนจะเกิดขึ้นภายในตัวของผลิตภัณฑ์ เช่น ความร้อนที่เกิดจากไมโครเวฟและคลื่นวิทยุและโดยทางอ้อม (Indirect method) ซึ่งเป็นการทำให้เกิดความร้อนขึ้นภายนอกและส่งผ่านพื้นผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ไปยังด้านใน โดยเกิดจากการแผ่รังสี (radiation) การพาความร้อน (convection) หรือการนำความร้อน (conduction)

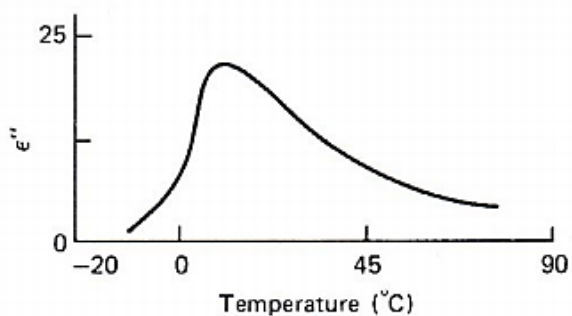
คุณสมบัติไดอิเล็กทริก (dielectric properties) ของผลิตภัณฑ์

คุณสมบัติไดอิเล็กทริกของผลิตภัณฑ์โดย (Singh & Heldman, 2001) รายงานว่าในกระบวนการแปรรูปด้วยไมโครเวฟจะเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติทางไฟฟ้า (electrical properties) ของผลิตภัณฑ์ที่ถูกทำให้เกิดความร้อน ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวจะมีความสำคัญต่อการสร้างสูตรผลิตภัณฑ์เพื่อใช้กับไมโครเวฟ คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่สำคัญและแสดงเป็นค่าตัวเลข ได้แก่

relative dielectric constant (ϵ') เป็นค่าที่แสดงความสามารถของผลิตภัณฑ์ในการกักเก็บพลังงานไฟฟ้าไว้เมื่อนำไปวางในสนามไฟฟ้ากระแสสลับ ถ้าค่านี้สูงแสดงว่าเก็บพลังงานได้มาก โดยค่านี้ จะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิและความชื้นของผลิตภัณฑ์

relative dielectric loss (ϵ'') เป็นค่าที่แสดงความสามารถของผลิตภัณฑ์ที่จะกระจายพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานความร้อน ถ้าค่านี้สูงแสดงว่าจะเกิดความร้อนสูง คำว่า “loss” หรือสูญเสียหมายถึงการเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน

(Fellows, 2000) รายงานว่าอุณหภูมิจะมีผลต่อคุณสมบัติไดอิเล็กทริกอย่างมากจากรายงานการทดลองพบว่าค่านี้จะลดลงไปอย่างต่อเนื่องในระหว่างที่น้ำเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็งแสดงในภาพประกอบ 2.3 คลื่นไมโครเวฟผ่านน้ำแข็งจะถูกดูดซับพลังงานไว้ได้น้อยกว่ามากเมื่อเทียบกับคลื่นไมโครเวฟที่ผ่านน้ำปกติ ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องจากการที่โมเลกุลของน้ำเคลื่อนที่ได้ น้อยลงหรือดูดซับพลังงานจากสนามไฟฟ้ากระแสสลับได้น้อยลง



ที่มา: (Fellows, 2000)

ภาพประกอบ 0.3 ผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า dielectric loss ของน้ำและน้ำแข็ง

แมกนีตรอน

แมกนีตรอนเป็นหัวใจของเตาไมโครเวฟทำหน้าที่สร้างคลื่นไมโครเวฟ มีลักษณะเป็นหลอดสุญญากาศที่มีโครงสร้างภายนอกเป็นโลหะเพื่อเพิ่มความแข็งแรง โดยมีแผ่นลักษณะเป็นปีกเพื่อใช้ในการระบายความร้อน ดังแสดงในภาพประกอบ 2.4



ที่มา: (ซัชชัย อิเล็กทรอนิกส์, ม.ป.ป.)

ภาพประกอบ 0.4 แมกนีตรอนที่ใช้ในเตาไมโครเวฟ

ปัจจัยที่มีผลต่อพลังงานที่ถูกดูดซับในอาหาร

(Buffler, 1993) รายงานว่าพลังงานที่ถูกดูดซับในผลิตภัณฑ์ภายในเตาไมโครเวฟขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังนี้

แมกนีตรอน คุณสมบัติเฉพาะของแมกนีตรอนที่ทำให้เตาไมโครเวฟมีความสามารถในการทำความร้อนแก่ผลิตภัณฑ์แตกต่างกันไป ปัญหาที่สำคัญของแมกนีตรอนคือตัวแม่เหล็กที่ใช้ ถ้าได้รับความร้อนแล้วความแรงของสนามแม่เหล็กที่ถูกสร้างขึ้นจะลดลง เป็นผลให้กำลังไฟออกมา น้อยลง ซึ่งอาจสูญเสียมากถึง 20% และมักเกิดขึ้นในช่วง 5-10 นาทีแรกหลังจากเริ่มเปิดเครื่อง

แหล่งพลังงาน (power supply) มีผลต่อพลังงานที่ถูกสร้างขึ้นและที่ถูกดูดซับในผลิตภัณฑ์ โดยจะมีผลประมาณ + 15% ของพลังงานที่ถูกสร้างขึ้น

ขนาดผลิตภัณฑ์ (load volume) พลังงานที่ถูกดูดซับจะขึ้นอยู่กับขนาดของผลิตภัณฑ์ซึ่งจะเป็นไปตามขนาดของช่องใส่ผลิตภัณฑ์ (cavity) จากการทดสอบพบว่าปริมาณพลังงานที่ถูกดูดซับจะลดลงเมื่อขนาดของผลิตภัณฑ์มีค่าลดลง

สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ (load geometry) มีผลต่อการเกิดความร้อนในผลิตภัณฑ์ชนิดเดียวกันและมีมวลเท่ากัน อย่างไรก็ตามยังไม่มีผลการรายงานที่ชัดเจนเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของผลิตภัณฑ์และการจัดเรียงของผลิตภัณฑ์รวมทั้งช่องใส่ผลิตภัณฑ์

อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ คุณสมบัติไดอิเล็กทริกและพลังงานที่ถูกดูดซับในผลิตภัณฑ์ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในลักษณะที่ซับซ้อน รวมทั้งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ อัตราการเกิดความร้อนในผลิตภัณฑ์ ซึ่งคุณสมบัติเกี่ยวกับการดูดซับพลังงานจะลดลงตามอุณหภูมิ จะเกิดซ้ำลงเมื่อผลิตภัณฑ์ถูกทำให้ร้อนขึ้น แต่ในแฮม (ham) ซึ่งคุณสมบัติในการดูดซับพลังงานจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมินั้น จะเกิดความร้อนสูงขึ้นเรื่อยๆ จนอาจทำให้ไหม้ได้ถ้าไม่ระมัดระวัง ทั้งนี้เป็นผลจากการหมุนของสารที่มีขีดจำกัดที่ได้กล่าวมาแล้ว

ความร้อนจำเพาะ (specific heat) ของภาชนะบรรจุผลิตภัณฑ์และอุณหภูมิ โดยคุณสมบัติด้านความร้อน (thermal properties) หรืออุณหภูมิของภาชนะบรรจุซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของผลิตภัณฑ์จะสามารถทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานที่ถูกดูดซับจากผลิตภัณฑ์ไปยังภาชนะบรรจุหรือสิ่งที่หุ้มห่อผลิตภัณฑ์ได้

ตำแหน่งและขนาดของช่องใส่ผลิตภัณฑ์ในเตาไมโครเวฟ จะมีผลต่อความสม่ำเสมอของการทำให้ผลิตภัณฑ์ร้อนถึงประมาณ + 20% โดยเฉพาะชิ้นผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดเล็ก

เตาไมโครเวฟ ลักษณะต่างๆของเตาไมโครเวฟที่อาจมีผลต่อพลังงานที่ถูกดูดซับ ได้แก่ ขนาด (size) ช่องใส่ผลิตภัณฑ์ โดยปกติช่องใส่ผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดใหญ่กว่าพบว่าพลังงานที่ถูกดูดซับในผลิตภัณฑ์จะมีค่าน้อยกว่า แต่ยังไม่มีการศึกษาที่แน่ชัด วัสดุ (materials) ที่ใช้ทำช่องใส่ผลิตภัณฑ์ ถ้าใช้วัสดุที่มีความสามารถในการนำไฟฟ้าสูงกว่า จะทำให้มีพลังงานที่ผลิตภัณฑ์ดูดซับ

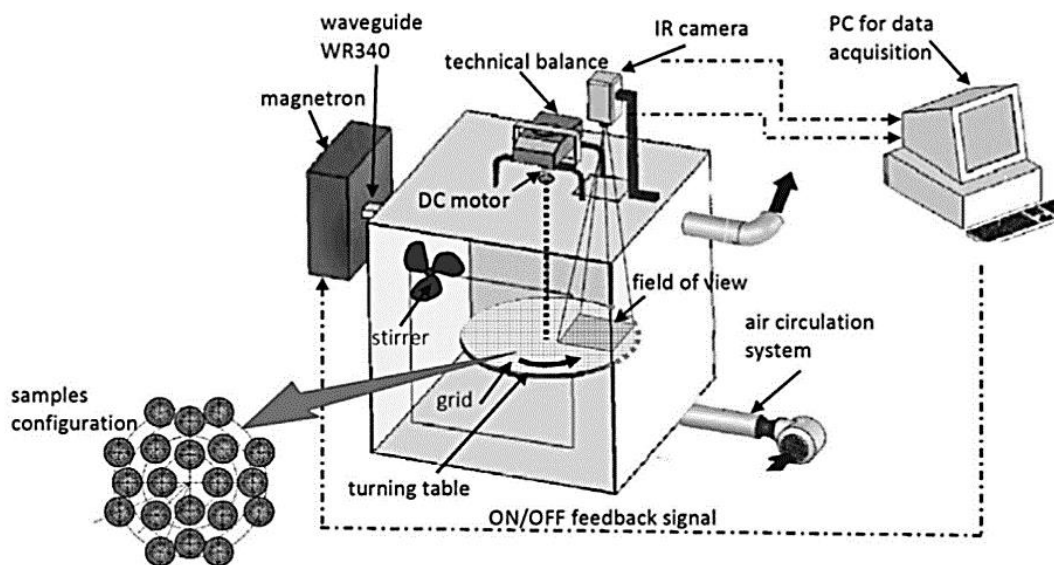
มากกว่าระบบของเตาไมโครเวฟที่ใช้วัสดุที่มีความสามารถในการนำไฟฟ้าต่ำ แต่ยังไม่มีการศึกษาที่แน่ชัดในเรื่องนี้

2.3 การออกแบบเครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน

ไมโครเวฟมีคุณสมบัติเฉพาะหลายประการซึ่งข้อได้เปรียบที่สำคัญอย่างหนึ่งคือการเกิดความร้อนขึ้นภายในผลิตภัณฑ์ทำให้สามารถขจัดน้ำภายในผลิตภัณฑ์ที่มีประสิทธิภาพสูง ทำให้เวลาอบแห้งใช้เวลาสั้นลงอย่างมากเมื่อเทียบกับวิธีการอบแห้งแบบดั้งเดิม (Song et al., 2017) โดยการเปลี่ยนพลังงานไมโครเวฟเป็นความร้อนในผลิตภัณฑ์เกิดจากโมเลกุลน้ำ เมื่อน้ำถูกนำเข้าไปในสนามแม่เหล็ก โมเลกุลน้ำและสนามแม่เหล็กจะเกิดการดูดและผลักกัน ทำให้เกิดการหมุนของโมเลกุลน้ำในสนามแม่เหล็กไฟฟ้าอย่างรวดเร็ว ทำให้โมเลกุลของน้ำเกิดการชนกระแทกและการเสียดสีกันเกิดความร้อนขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้น้ำภายในของผลิตภัณฑ์เคลื่อนที่ในรูปแบบของของเหลวหรือไอน้ำมายังพื้นผิวของผลิตภัณฑ์ ทำให้ไมโครเวฟเป็นวิธีที่ทำให้เกิดความร้อนที่มีต้นทุนต่ำ (Berteli & Marsaioli, 2005) และแก้ไขข้อเสียของการอบแห้งด้วยอากาศร้อนเพียงอย่างเดียว ทำให้สามารถรักษาคุณภาพทางกายภาพและทางเคมีของผลิตภัณฑ์ ไม่ให้ถูกทำลายหรือถูกทำลายน้อยลงเป็นผลให้สามารถคงคุณสมบัติที่ดีไว้ได้ (Andrés, Bilbao, & Fito, 2004) แต่เนื่องจากพลังงานของไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าการกระจายตัวของคลื่นไม่สม่ำเสมอส่งผลให้ความร้อนในการอบแห้งไม่สม่ำเสมอด้วย

จากข้อเสียดังกล่าวได้มีนักวิจัยออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟ เพื่อควบคุมและแก้ไขข้อเสียดังกล่าว ได้แก่

(Cuccurullo, Giordano, Metallo, & Cinquanta, 2017) ได้ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและการหมุนเวียนอากาศในการอบแห้งบวบหั่นบางด้วยไมโครเวฟ เครื่องอบแห้งมีขนาดห้องอบแห้ง 1 ลูกบาศก์เมตร แมกนีตรอน ขนาด 2 กิโลวัตต์ ได้มีการติดตั้งใบพัดลมแบบ 3 ใบ ขนาดความยาวของใบพัดลม เท่ากับ 19 เซนติเมตร โดยแต่ละมุมจะมี มุมบิดใบแตกต่างกันติดตั้งไว้ในห้องอบแห้ง เพื่อสะท้อนคลื่นหรือกระจายคลื่นไมโครเวฟให้ทั่วถึงภายในห้องอบแห้ง ซึ่งมีขนาดของห้องอบแห้งที่มีรูปร่างสมมาตร ดังแสดงในภาพประกอบ 2.5

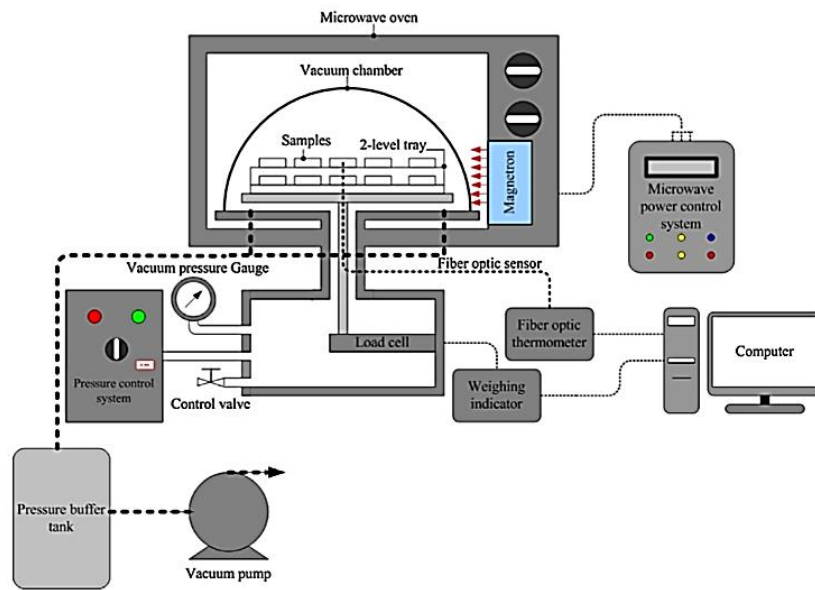


ที่มา: (Cuccurullo et al., 2017)

ภาพประกอบ 0.5 แผนผังระบบเครื่องอบแห้งไมโครเวฟ

(Paengkanya, Sophonrarnit, & Nathakarnakule, 2015) ได้ศึกษาเครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟดังแสดงในภาพประกอบ 2.6 ได้ดัดแปลงเครื่องอบไมโครเวฟที่มีขายตามท้องตลาดโดยใช้เครื่องไมโครเวฟยี่ห้อแอลจี ขนาดห้องอบ 24 ลิตร แมกนีตรอนขนาด 800 วัตต์ ในการศึกษาการอบแห้งทุเรียนแผ่น โดยได้ออกแบบภาคเป็นสองชั้นมีก้านต่อไปยังบนโพลดเซลเพื่อชั่งน้ำหนักทุเรียนแผ่นเมื่อเวลาและความชื้นเปลี่ยนแปลง โดยผลที่ได้จะถูกแสดงที่คอมพิวเตอร์ แมกนีตรอนจะถูกควบคุมกำลังไมโครเวฟด้วยตัวควบคุมระบบไมโครเวฟ อีกทั้งความดันจะถูกควบคุมด้วยชุดควบคุมความดันภายในห้องอบแห้ง

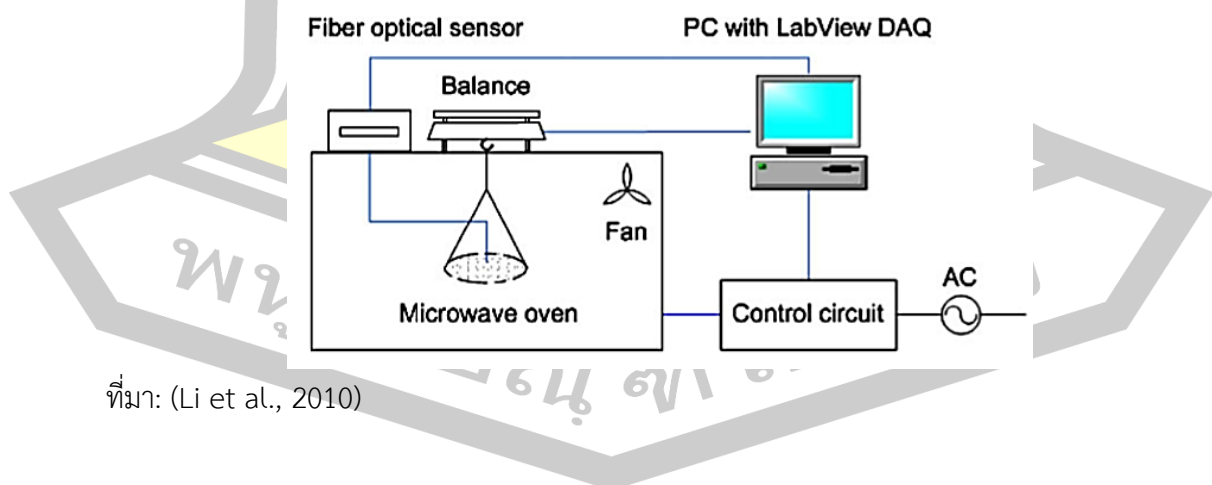
พูน ปณ ทิโต ชีเว



ที่มา: (Paengkanya et al., 2015)

ภาพประกอบ 0.6 แผนผังเครื่องอบแห้งไมโครเวฟร่วมกับสุญญากาศ

(Li et al., 2010) ศึกษาอุณหภูมิและการควบคุมกำลังไมโครเวฟในการอบแห้ง โดยออกแบบระบบควบคุมการทำงานของไมโครเวฟด้วยอุณหภูมิการอบแห้งด้วยคอมพิวเตอร์ คอมพิวเตอร์จะควบคุมการเปิด - ปิดการทำงานของไมโครเวฟ ตามสัญญาณจากอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์อบแห้ง ซึ่งถูกวัดด้วยเซนเซอร์ในตำแหน่งอบแห้งผลิตภัณฑ์ ดังแสดงในภาพประกอบ 2.7



ที่มา: (Li et al., 2010)

ภาพประกอบ 0.7 แผนผังระบบการควบคุมกำลังไมโครเวฟ

2.4 ทฤษฎีการอบแห้ง

การอบแห้ง คือการลดความชื้นของผลิตภัณฑ์จนถึงระดับที่สามารถระงับการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ได้คือมีค่าปริมาณน้ำอิสระต่ำกว่า 0.6 ทำให้เก็บผลิตภัณฑ์ไว้ได้นาน (วีไล รังสาดทอง, 2547) และการอบแห้งจะต้องมีการให้พลังงานแก่ผลิตภัณฑ์เพื่อให้ น้ำในผลิตภัณฑ์เปลี่ยนสถานะเป็นไอแล้วเคลื่อนย้ายออกจากผลิตภัณฑ์โดยขณะทำการอบแห้งจะเกิดปรากฏการณ์ต่างๆดังนี้

2.4.1 การถ่ายเทความร้อนและมวลสาร

การถ่ายเทความร้อนและมวลสารจะทำให้ผลิตภัณฑ์แห้งเร็วขึ้นโดยทำได้หลายวิธี ดังนี้ (สุคนธ์ ชื่นศรีงาม & วรณวิบูลย์ กาญจนกฤษ, 2546)

1) การให้กระแสลมร้อนเคลื่อนที่ผ่านผลิตภัณฑ์ กระแสลมร้อนทำหน้าที่ให้ความร้อนและเคลื่อนย้ายไอน้ำ การถ่ายเทความร้อนแบบนี้เป็นการพาความร้อน (convection)

2) การแผ่ผลิตภัณฑ์เป็นชั้นบางๆบนพื้นผิวที่ให้ความร้อน โดยผลิตภัณฑ์ได้รับความร้อนแบบการนำความร้อน (conduction) ทำให้ไอน้ำกระจายตัวออกสู่บรรยากาศเหนือผลิตภัณฑ์อาจมีระบบดูดอากาศออกจากผิวผลิตภัณฑ์ซึ่งสามารถลดความชื้นได้ต่ำลงอีกหรือต้องใช้อุณหภูมิอบแห้งที่สูงขึ้น

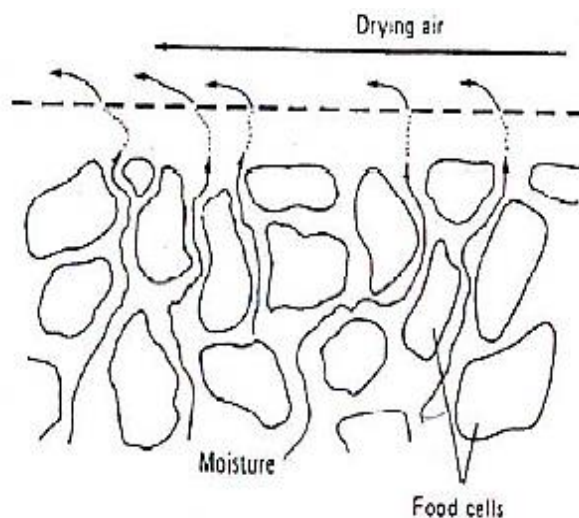
3) การให้ความร้อนแก่ผลิตภัณฑ์ในเครื่องอบด้วยการนำความร้อนหรือการแผ่รังสีร่วมกับการดูดอากาศที่มีไอน้ำออกไปควบแน่นข้างนอก

4) การปรับสภาพความดันและอุณหภูมิให้น้ำในผลิตภัณฑ์เป็นของแข็งที่ระดับต่ำกว่าจุดร่วมสามสถานะ (triple point) แล้วให้พลังงานความร้อนหรือลดความดันลงอีกทำให้เกิดการระเหิดน้ำเปลี่ยนสถานะจากของแข็งกลายเป็นไอโดยตรงวิธีนี้เรียกว่าการทำแห้งด้วยการแช่เยือกแข็ง (freeze drying)

การลดความชื้นอีกแบบที่ไม่เกี่ยวกับพลังงานความร้อนแต่เป็นการใช้ความดันออสโมติกลดปริมาณน้ำจากชั้นผลิตภัณฑ์ได้แก่การทำผลไม้แช่อิ่มซึ่งน้ำภายในจะเคลื่อนย้ายออกมาที่น้ำเชื่อมข้างนอกและน้ำตาลจะเคลื่อนที่เข้าไปในชั้นผลไม้จนความเข้มข้นของน้ำตาลภายในและภายนอกชั้นผลไม้เท่ากันแต่วิธีนี้คงเหลือน้ำในชั้นผลไม้ก็มากจึงนิยมไปอบแห้งต่อ

2.4.2 กลไกการอบแห้ง

เมื่ออากาศร้อนหรือลมร้อนพัดผ่านผิวหน้าผลิตภัณฑ์ที่เปียก ความร้อนจะถูกถ่ายเทไปยังผิวของผลิตภัณฑ์และน้ำในผลิตภัณฑ์จะระเหยออกมาด้วยความร้อนแฝงของการเกิดไอน้ำจะแพร่ผ่านอากาศและถูกพัดพาไปโดยลมร้อนที่เคลื่อนที่ ดังแสดงในภาพประกอบ 2.8 (วีไล รังสาดทอง, 2547)



ที่มา: (วิลโลว์ รังสาดทอง, 2547)

ภาพประกอบ 0.8 การเคลื่อนที่ของความชื้นออกจากชั้นของอาหารระหว่างการอบแห้ง

สภาวะดังกล่าวจะทำให้ความดันไอที่ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ต่ำกว่าความดันไอด้านในของผลิตภัณฑ์เป็นผลให้เกิดความแตกต่างของความดันไอละเอียดขึ้นผลิตภัณฑ์ชั้นด้านในจะมีความดันไอสุงและค่อยๆลดต่ำลงเมื่อชั้นผลิตภัณฑ์เข้าใกล้อากาศแห้งความแตกต่างนี้ทำให้เกิดแรงดันเพื่อไล่น้ำออกจากผลิตภัณฑ์ น้ำจะเคลื่อนที่ไปยังผิวหน้าด้วยกลไกดังต่อไปนี้

1) การเคลื่อนที่ของเหลวโดยแรงคาปิลลารี (capillary force) เป็นการเคลื่อนที่ในอาหารที่มีเซลล์โปร่งมีช่องว่างระหว่างเซลล์ต่อเนื่องกันเป็นทางแคบๆเกิดแรงดันของน้ำขึ้นมาตามท่อการเคลื่อนที่สะดวกรวดเร็วแต่จะหยุดเมื่อน้ำในทางแคบๆนั้นขาดตอนลง

2) การแพร่ของของเหลวซึ่งเกิดจากความแตกต่างของความเข้มข้นของตัวทำละลายในผลิตภัณฑ์ส่วนต่างๆ

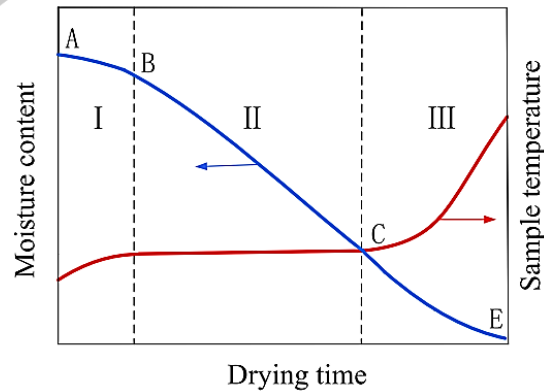
3) การแพร่ของของเหลวซึ่งถูกดูดซับโดยผิวหน้าของของแข็งในผลิตภัณฑ์

4) ความแตกต่างของความดันไอทำให้เกิดการแพร่ของไอน้ำในช่องอากาศของผลิตภัณฑ์

2.4.3 อัตราการอบแห้ง

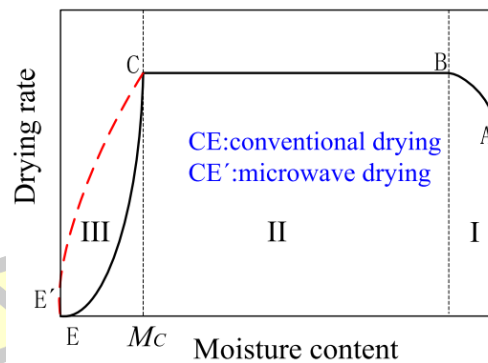
การอบแห้งผลิตภัณฑ์ที่โครงสร้างภายในเป็นรูพรุนสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ช่วงของการอบแห้ง คือ ช่วงอัตราการอบแห้งแบบคงที่ (constant rate period) และช่วงอัตราการอบแห้งแบบลดลง (falling rate period) ที่ช่วงของอัตราการอบแห้งแบบคงที่ ผลิตภัณฑ์จะมีปริมาณความชื้นมากกว่าความชื้นวิกฤต (critical moisture content) คือผลิตภัณฑ์จะมีปริมาณความชื้นที่

บริเวณผิวเป็นจำนวนมาก ความชื้นที่ผิวผลิตภัณฑ์จะระเหยไปในอากาศ โดยอาศัยการถ่ายเทความร้อนระหว่างอากาศและผลิตภัณฑ์มักจะเกิดขึ้นที่บริเวณผิวนอกเท่านั้น ที่ช่วงของอัตราการอบแห้งแบบลดลงจะเกิดขึ้นเมื่อปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ต่ำกว่าความชื้นวิกฤต น้ำภายในวัสดุจะเคลื่อนที่มายังผิวนอกในลักษณะของของเหลวและไอน้ำ และระเหยจากผิวไปยังอากาศ



ที่มา: (Song et al., 2017)

ภาพประกอบ 0.9 การอบแห้งภายใต้คงที่



ที่มา: (Song et al., 2017)

ภาพประกอบ 0.10 ช่วงอัตราการอบแห้ง

จากภาพประกอบ 2.9 และภาพประกอบ 2.10 สามารถแบ่งกราฟออกเป็น 3 ช่วงสามารถอธิบายปรากฏการณ์ของการอบแห้งแต่ละช่วงได้ดังนี้

ช่วง AB เป็นช่วงเริ่มต้นของการอบแห้ง ซึ่งใช้ระยะเวลาสั้นๆ ผิวผลิตภัณฑ์ยังมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิกระเปาะเปียก (wet bulb temperature)

ช่วง BC แสดงถึงอัตราการอบแห้งแบบคงที่ ในช่วงนี้ที่ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์จะอิมตัวไปด้วยไอน้ำ ทำให้การอบแห้งจะดำเนินไปในอัตราคงที่ ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งช่วงนี้ คือ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วลม อาจเป็นไปได้ว่าความขรุขระของผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ที่มีชั้นฟิล์มของน้ำอยู่ จะเพิ่มการถ่ายเทมวลและการถ่ายเทความร้อน อุณหภูมิที่ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ขณะนี้จะเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียก ในช่วงนี้น้ำภายในจะเคลื่อนตัวมาสู่ผิวนอกตลอดเวลาเพื่อทดแทนน้ำในส่วนที่ระเหยออกไปในอัตราส่วนที่เท่ากัน โดยกลไกและการเคลื่อนย้ายของน้ำจะแปรผันไปตามโครงสร้างของผลิตภัณฑ์

ช่วง CE แสดงถึงอัตราการอบแห้งแบบลดลง (falling rate) น้ำที่ผิวหน้าผลิตภัณฑ์จะหมดไปเรื่อยๆ เนื่องจากอัตราการเคลื่อนที่ของน้ำไปยังผิวหน้าต่ำกว่าอัตราการระเหยของน้ำจากผิวไปยังอากาศ ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์จะแห้งลงเรื่อยๆ อัตราการดึงน้ำออกของช่วงนี้จึงช้ากว่าช่วงอัตราการอบแห้งแบบคงที่ อัตราการระเหยของน้ำจะถูกควบคุมโดยความต้านทานต่อการเคลื่อนที่ของผลิตภัณฑ์ในขณะนั้น ทำให้อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์สูงกว่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกปริมาณความชื้นจะต่ำลงเรื่อยๆ ระยะทางในการแพร่หรือการเคลื่อนที่ของความร้อนและมวลจะมากขึ้น จนในที่สุดความเข้มข้นของน้ำภายในที่เป็นความชื้นน้ำอิสระจะหมดไป ความชื้นวัสดุที่หาได้ ณ จุดนี้ คือ ความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content) หรือจุด E จะไม่มีการลดลงของปริมาณความชื้นอีก (Song et al., 2017)

2.4.4 ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง

อัตราการอบแห้งผลิตภัณฑ์โดยทั่วไปที่ใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางในการส่งผ่านความร้อนจะเกิดขึ้นช้าหรือเร็วขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญซึ่งมีผลต่อการอบแห้ง คือ

1) ลักษณะทางธรรมชาติของผลิตภัณฑ์

เป็นปัจจัยสำคัญที่สุดที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งของผลิตภัณฑ์ ถ้าสภาพทางธรรมชาติของผลิตภัณฑ์เอื้ออำนวยต่อการส่งผ่านความร้อนไปยังโมเลกุลของน้ำภายในเนื้อผลิตภัณฑ์และเอื้ออำนวยต่อการเคลื่อนที่ของไอน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ เช่น ผลิตภัณฑ์ที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุน โมเลกุลของน้ำในเนื้อผลิตภัณฑ์สามารถเคลื่อนที่ออกมาได้ง่ายทำให้อัตราการอบแห้งเร็วขึ้น

2) ขนาดและรูปร่างของผลิตภัณฑ์

ผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดและรูปร่างที่ทำให้อัตราส่วนของพื้นที่ต่อปริมาตรมาก จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งผ่านความร้อนให้ทั่วชั้นผลิตภัณฑ์ทำให้การระเหยน้ำออกจากเนื้อผลิตภัณฑ์ดีขึ้น อัตราการอบแห้งจึงเร็วขึ้น

3) ปริมาณและการจัดเรียงผลิตภัณฑ์

ผลิตภัณฑ์ที่นำมาจัดเรียงซ้อนกันหลายๆ ชั้นในถาดทำให้ปริมาณของผลิตภัณฑ์ต่อถาดมากเกินไปจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่อยู่บริเวณตรงกลางได้รับความร้อนไม่ทั่วถึง ทำให้

บริเวณนั้นเมื่ออัตราการอบแห้งที่ช้า การจัดเรียงที่เหมาะสมควรทำการจัดเรียงแบบชั้นบางเพื่อให้ผลิตภัณฑ์ได้รับความร้อนอย่างสม่ำเสมอ

4) อุณหภูมิของอากาศร้อน

เมื่ออุณหภูมิของอากาศร้อนสูงขึ้นอัตราการอบแห้งก็จะเร็วขึ้น เนื่องจากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของอากาศร้อนกับผลิตภัณฑ์มีมากทำให้การถ่ายเทความร้อนสู่น้ำในเนื้อผลิตภัณฑ์ได้ดีจึงทำให้น้ำในเนื้อผลิตภัณฑ์เคลื่อนที่และระเหยได้เร็วขึ้น ถึงแม้ว่าอุณหภูมิที่สูงจะทำให้อัตราการอบแห้งเร็วขึ้น แต่ก็ต้องคำนึงถึงความเหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการอบแห้งด้วย

5) ความชื้นของอากาศร้อน

หากความชื้นของอากาศร้อนมีค่ามากจะมีผลให้การเคลื่อนที่ของน้ำและการระเหยของไอน้ำออกจากเนื้อผลิตภัณฑ์ได้ยาก

6) ความดันของบรรยากาศ

การอบแห้งโดยทั่วไปมักทำที่ความดันหนึ่งบรรยากาศ ถ้าหากมีการลดลงของบรรยากาศในขณะที่ทำการอบแห้งจะทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น เนื่องจากจะทำให้จุดเดือดของน้ำลดลงซึ่งการอบแห้งประเภทนี้เหมาะกับการอบแห้งที่เสื่อมคุณภาพได้ง่ายเนื่องจากความร้อน เครื่องอบแห้งมีการลดความดันในสภาวะการอบแห้ง เช่น เครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบลูกกลิ้ง เป็นต้น

7) ความเร็วอากาศร้อน

ความร้อนของอากาศร้อนหากมีค่ามากจะทำให้เกิดการระเหยของน้ำที่ผิวหน้าผลิตภัณฑ์ได้ดีขึ้น ทำให้อัตราการอบแห้งเร็วขึ้น

8) สมบัติเชิงความร้อน

คุณสมบัติเชิงความร้อนของผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้ง คือ ความร้อนจำเพาะ สภาพการนำความร้อน และการแพร่ความร้อน ส่วนคุณสมบัติทางฟิสิกส์ ได้แก่ ความหนาแน่น และสัดส่วนช่องว่างอากาศในการอบแห้ง

2.5 ความชื้น (moisture content)

ความชื้น คือค่าบ่งบอกปริมาณน้ำที่มีอยู่ในอาหาร เป็นสมบัติที่มีความสำคัญมากเนื่องจากเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการเน่าเสียของผลิตภัณฑ์จากการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ เช่น แบคทีเรีย ยีส และรา นอกจากนี้ความชื้นมีผลต่อสมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงความร้อน เช่น จุดหลอมเหลว จุดเดือด การนำความร้อน (thermal conductivity) ความร้อนจำเพาะ (specific heat) คุณภาพทางประสาทสัมผัสซึ่งมีผลต่อการยอมรับของผลิตภัณฑ์ ได้แก่ เนื้อสัมผัส (texture) เช่น ความกรอบ ความหนืด (viscosity) การเกาะติดกันเป็นก้อน (caking) การเกิดปฏิกิริยาเคมีต่างๆ ของ

ผลิตภัณฑ์ ที่มีผลกระทบทางลบต่ออาหารระหว่างการเก็บรักษา เช่น ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล (browning reaction) ปฏิกิริยาออกซิเดชันของลิพิด (lipid oxidation)

ปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์จะอธิบายอยู่ในรูปร้อยละความชื้น ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ร้อยละความชื้นฐานเปียก และร้อยละความชื้นฐานแห้ง โดยร้อยละฐานเปียกสามารถหาได้จากสมการที่ 2.1

$$m_{wb} = \frac{m_w - m_d}{m_w} \times 100 \quad (2.1)$$

เมื่อ m_{wb} คือ ร้อยละความชื้นฐานเปียก
 m_w คือ มวลของน้ำในอาหาร (กรัม)
 m_d คือ มวลแห้งของอาหาร (กรัม)

ร้อยละความชื้นฐานแห้ง (m_{db}) โดยร้อยละฐานแห้งสามารถหาได้จากสมการ 2.2

$$m_{db} = \frac{m_w - m_d}{m_d} \quad (2.2)$$

เมื่อ m_{db} คือ ร้อยละความชื้นฐานแห้ง
 m_w คือ มวลของน้ำในอาหาร (กรัม)
 m_d คือ มวลแห้งของอาหาร (กรัม)

2.6 อัตราส่วนความชื้น (moisture ratio)

อัตราส่วนความชื้น คือ ค่าที่บ่งบอกถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงมวลน้ำในผลิตภัณฑ์เทียบกับความชื้นเริ่มต้นเมื่อเวลาอบแห้งดำเนินไปตลอดเวลาใดๆ เขียนได้ดังสมการ 2.3 (Akgun & Doymaz, 2005)

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_o - M_{eq}} \quad (2.3)$$

- เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความขึ้น
 M_t คือ ความขึ้นที่เวลาอบแห้งใดๆ (เปอร์เซ็นต์ฐานแห้ง)
 M_o คือ ความขึ้นเริ่มต้น (เปอร์เซ็นต์ฐานแห้ง)
 M_{eq} คือ ความขึ้นสมดุล (เปอร์เซ็นต์ฐานแห้ง)

เมื่อค่าความขึ้นสมดุลมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับความขึ้นเริ่มต้น และความขึ้นที่เวลาใดๆ จึงละค่าความขึ้นสมดุลข้างต้น สามารถเขียนสมการใหม่ได้ ดังนี้ (Akgun & Doymaz, 2005)

$$MR = \frac{M_t}{M_o} \quad (2.4)$$

2.7 แบบจำลองการอบแห้งชั้นบาง

มีนักวิจัยจำนวนมากที่นำเสนอรูปแบบจำลองการอบแห้งแบบชั้นบางเพื่อใช้อธิบายพฤติกรรม การอบแห้งผลิตภัณฑ์ โดยบ่อยครั้งพบว่าความสัมพันธ์กึ่งทฤษฎีที่เรียกว่าแบบจำลองการอบแห้งแบบชั้นบางซึ่งมีรูปแบบที่คล้ายกับกับกฎของนิวตันของการทำความเย็น ถูกแนะนำสำหรับใช้อธิบายอัตราการอบแห้งผลิตภัณฑ์ ปกติแล้วแบบจำลองการอบแห้งชั้นบางอยู่บนพื้นฐานของทฤษฎีการแพร่ แต่มีการสมมติว่ามีความต้านทานการแพร่ในชั้นบางของผลิตภัณฑ์อบแห้ง

ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความขึ้นของผลิตภัณฑ์ตลอดระยะเวลาการอบแห้ง ถูกนำมาสร้างสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ทำนายระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ซึ่งสมการอบแห้งชั้นบางเป็นสมการที่ได้จากผลการทดลอง สามารถใช้ทำนายอัตราการอบแห้งได้ดีแต่ใช้ได้กับเฉพาะผลิตภัณฑ์ในช่วงการอบแห้งที่ตรงกับสภาวะการทดลองเท่านั้น ตัวอย่างสมการชั้นบางที่นิยมนำมาใช้ทำนายผลการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร แสดงในตาราง 2.2

พหุ ประถมศึกษา

ตาราง 0.2 สมการแบบจำลองการอบแห้งชั้นบาง

สมการ	ชื่อ	ที่มา
$MR = \exp(-kt)$	Newton	Panchariya <i>et al.</i> (2002)
$MR = \exp(-kt^n)$	Page	Kashaninejad <i>et al.</i> (2007)
$MR = a \exp(-kt)$	Henderson and Pabis	Kashaninejad <i>et al.</i> (2007)
$MR = a \exp(-k_0t) + b \exp(k_1t)$	Two term	Gunhan <i>et al.</i> (2005)
$MR = 1 + at + bt^2$	Wang and Singh	Togrul and Pehliven (2004)
$MR = a \exp(-kt) + (1-a)\exp(-kb)$	Approximation of diffusior	Togrul and Pehliven (2004)
$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	Midilli, Kucuk and Yapar	Guo <i>et al.</i> (2014)
$MR = a \exp(-kt) + (1-a)\exp(-kat)$	Two term exponential	Panchariya <i>et al.</i> (2002)

2.8 การประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น

(N. Wang & Brennan, 1992) ซึ่งชี้ให้เห็นว่า การอบแห้งของผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่มักเกิดในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง หมายความว่า การถ่ายเทความชื้นระหว่างการอบแห้งถูกจำกัดหรือถูกควบคุมโดยการแพร่ภายในผลิตภัณฑ์ ซึ่งสามารถอธิบายได้ตามกฎการแพร่ของ Fick และหากพิจารณาให้ผลิตภัณฑ์มีทรงกระบอกแบบมีขอบเขตจำกัด (finite cylindrical) สามารถเขียนในรูปอนุพันธ์การแพร่ ได้ดังสมการที่ 2.5

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{eff} \left(\frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial M}{\partial r} + \frac{\partial^2 M}{\partial z^2} \right) \quad (2.5)$$

เมื่อ D_{eff} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (ตารางเมตรต่อชั่วโมง)

r คือ รัศมีของทรงกระบอก (เมตร)

t คือ เวลา (วินาที)

z คือ ความยาวของทรงกระบอก (เมตร)

เงื่อนไขเริ่มต้นและขอบเขตนี้จะแสดงดังต่อไปนี้

$$\text{at } t = 0, 0 \leq r \leq r_0, -l \leq z \leq +l; \quad M = M_i$$

$$\text{at } t > 0, r = r_0, z = \pm l; \quad M = M_e$$

$$\frac{\partial M}{\partial r} = 0$$

at $t > 0, r = 0, -1 \leq z \leq +l;$

จากการวิเคราะห์สมการ 2.5 โดย Crank (1975) พบว่าสัดส่วนความชื้นดักแต่ใหม่อีรีสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.6

$$MR = \frac{8}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{4}{\lambda_m^2} \exp\left(\frac{\lambda_m^2 D_{eff} t}{r_o^2}\right) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 (2n+1)^2 D_{eff} t}{4l^2}\right) \quad (2.6)$$

เมื่อ λ_m คือ root of Bessel function ของ the first kind และ zero order
 r_o คือ รัศมีของผลิตภัณฑ์ (เมตร)
 l คือ ครึ่งหนึ่งของความยาวผลิตภัณฑ์ (เมตร)

2.9 การวัดค่าสี

สี เป็นคุณสมบัติเชิงแสงที่สามารถใช้บรรยายคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ทางชีวภาพได้ง่ายที่สุด วิธีหนึ่งในการอธิบายสีของวัตถุผลิตภัณฑ์ด้วยคำพูด มาตรฐานของการบรรยายลักษณะสีอาจจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับประสบการณ์ ลักษณะทางกายภาพของตาของผู้บรรยาย ลักษณะแสงที่ตกกระทบ ดังนั้นการวัดและบรรยายสีในเชิงวิชาการจึงต้องมีการจัดมาตรฐานเพื่อเป็นการลดความไม่แน่นอน (bias) ของผู้บรรยายสีของผลิตภัณฑ์นั้นๆ ปัจจัยที่ทำให้เกิดสีมีอยู่ 3 ประเภท (จารุพงศ์ วาฤทธิ, 2547)

2.9.1 แหล่งกำเนิดแสง (light source)

แหล่งกำเนิดแสงมีผลอย่างมากในการบรรยายสีของวัตถุ แหล่งกำเนิดแสงถ้ามีแสงแตกต่างจากสีขาวเมื่อตกกระทบกับวัตถุจะทำให้แสงที่สะท้อนกลับมาเกิดสีที่แตกต่างไป เช่น แสงจากหลอด incandescent จะเพิ่มแสงสีส้ม ในขณะที่ fluorescent จะให้แสงขาวเย็น

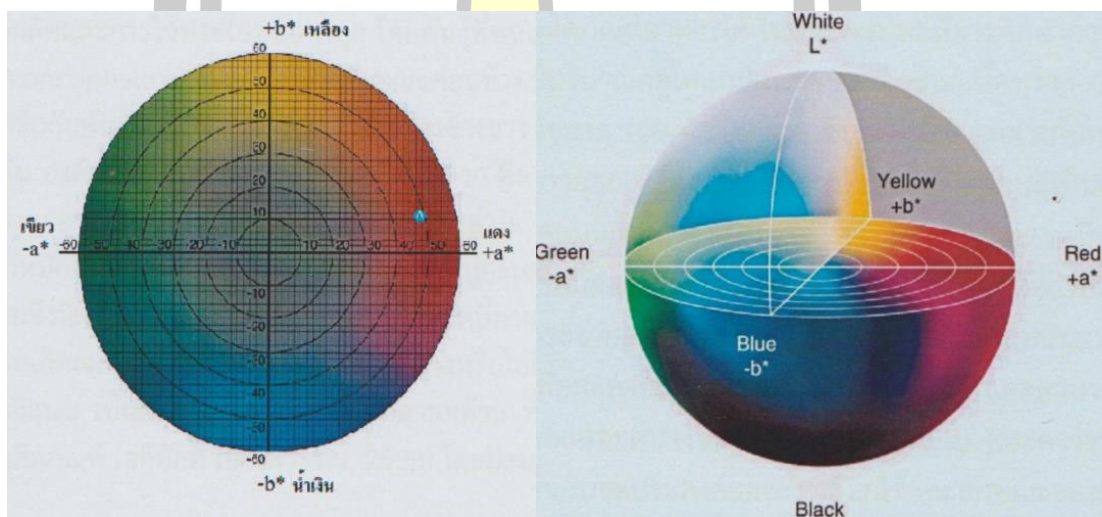
2.9.2 วัตถุที่มอง (specimen)

วัตถุที่ทึบแสง (opaque) จะให้การสะท้อนแสงเพื่อเกิดสีแตกต่างจากวัตถุที่โปร่งแสง (translucent) และโปร่งใส (transparent) ลักษณะของการตกกระทบของแสงบนวัตถุ

2.9.3 ผู้สังเกตการณ์ (observer)

ผู้สังเกตการณ์นั้นมีผลอย่างยิ่งต่อการบรรยายสีที่มองเห็น ผู้สังเกตการณ์ต่างคนจะบรรยายลักษณะสีต่างกันขึ้นอยู่กับสรีระทางกายภาพของตาแต่ละคน ในร่างกายคนจะมีเซลล์อยู่ 2 ชนิดที่เกี่ยวข้องกับการวัดสี คือเซลล์รูปแท่ง และเซลล์รูปโคน เซลล์รูปแท่งจะตอบสนองได้ดีกับการมองเห็นในที่เกี่ยวข้องกับความมืดสว่าง ส่วนเซลล์รูปโคนจะตอบสนองต่อสีที่มองเห็น การรายงานสีมีการรายงานด้วยกันอยู่หลายระบบในการวิจัยนี้ใช้ระบบ CIE L^* a^* และ b^*

ในระบบสี L^* a^* และ b^* นี้ ค่า L^* จะหมายถึงความสว่าง ส่วน a^* และ b^* จะเป็นค่าสัมประสิทธิ์ สีค่า a^* และ b^* จะบอกทิศทางของสี เช่น $+a^*$ หมายถึงอยู่ในทิศทางสีแดง $-a^*$ หมายถึงอยู่ในทิศทางสีเขียว, $+b^*$ หมายถึงอยู่ในทิศทางสีเหลือง และ $-b^*$ หมายถึงอยู่ในทิศทางสีน้ำเงิน เมื่อค่า a^* และ b^* เพิ่มขึ้นและจุดดังกล่าวเคลื่อนที่ออกจากจุดศูนย์กลางความมืดของสีก็จะเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพประกอบ 2.11 ซึ่งแสดงให้เห็นค่าสีต่างๆ ของปริภูมิสี L^* a^* และ b^* อย่างชัดเจน



ที่มา: (จารุพงศ์ วาฤทธิ, 2547)

ภาพประกอบ 0.11 ค่าสีในระบบ CIE L^* a^* b^*

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาการอบแห้งผักผลไม้ด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อนได้มีการออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้ง เพื่อใช้อบแห้งและศึกษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอบแห้งจำเป็นต้องศึกษาข้อมูล ที่ใช้ในการออกแบบและทดสอบ ซึ่งแบบหัวข้อในการศึกษาดังต่อไปนี้

2.10.1 งานวิจัยที่เกี่ยวกับเครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน

การศึกษาในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องอบแห้งไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน ได้มีการศึกษาถึงการออกแบบเครื่องอบแห้งและประยุกต์ใช้งานอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร ได้แก่

(Pereira, Marsaioli, & Ahrné, 2007) ได้ศึกษาอบแห้งกล้วยด้วยไมโครเวฟ โดยการทดลองได้แบ่งเป็น 3 ช่วงช่วงการอบแห้งที่ 1 อบแห้งกล้วยด้วยกำลังไมโครเวฟ 760 วัตต์ อุณหภูมิอากาศ 50 องศาเซลเซียส และความเร็วอากาศ 3.3 เมตรต่อวินาที จนกระทั่งความชื้นเท่ากับ 2 กิโลกรัมความชื้นต่อกิโลกรัมมวลแห้ง ช่วงการอบแห้งที่ 2 อบแห้งกล้วยด้วยกำลังไมโครเวฟ 380 วัตต์ อุณหภูมิอากาศ 70 องศาเซลเซียส และความเร็วอากาศ 3.3 เมตรต่อวินาที จนกระทั่งความชื้นเท่ากับ 0.67 กิโลกรัมความชื้นต่อกิโลกรัมมวลแห้ง และช่วงการอบแห้งที่ 3 อบแห้งกล้วยด้วยกำลังไมโครเวฟ 0, 76, 150 และ 230 วัตต์ อุณหภูมิอากาศ 70 องศาเซลเซียส และความเร็วอากาศ 5.7 เมตรต่อวินาที จนกระทั่งถึงความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 0.17 กิโลกรัมจากผลการทดลอง การเพิ่มกำลังไมโครเวฟจะทำให้ระยะเวลาในอบแห้งลดลง และช่วยใช้ผลิตภัณฑ์ ที่อบแห้งมีคุณภาพการเปลี่ยนแปลงสีดีขึ้น

(Varith, Dijkanarukkul, Achariyaviriya, & Achariyaviriya, 2007) ได้ศึกษาพัฒนาและประเมินกระบวนการอบแห้งลำไยที่ปอกเปลือกแล้วโดยใช้พลังงานไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน ใช้ลำไยพันธุ์อีดอ โดยให้ได้ความชื้นสุดท้ายร้อยละ 18 ฐานแห้ง ทำการอบแห้งอุณหภูมิของอากาศร้อน 3 ระดับ คือ 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส ร่วมกับกำลังไมโครเวฟ 4 ระดับ คือ 100, 180, 300 และ 450 วัตต์ ผลการทดลองพบว่า อัตราการอบแห้งคงที่จะเปลี่ยนเป็นการอบแห้งลำไยแบบลดลงที่เวลาการอบแห้ง 1.7 ชั่วโมง ที่การอบแห้งอุณหภูมิอากาศร้อน 40 องศาเซลเซียส ร่วมกับกำลังไมโครเวฟ 450 วัตต์ และ 3.3 ชั่วโมงที่อุณหภูมิอบแห้ง 60 องศาเซลเซียส ร่วมกับกำลังไมโครเวฟ 300 วัตต์ ซึ่งให้ประสิทธิภาพการอบแห้งสูงสุด เมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เพียงอย่างเดียวการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อนสามารถลดเวลาในการอบแห้งลง 64.3 เปอร์เซ็นต์ และการใช้พลังงานจำเพาะ 48.2 เปอร์เซ็นต์

(Motevali, Minaee, & Hadi Khoshtagaza, 2011) ศึกษาการใช้พลังงานในการอบแห้งด้วยวิธีการอบแห้งด้วยอากาศร้อนเพียงอย่างเดียว การอบแห้งไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน การอบแห้งด้วยไมโครเวฟ การอบแห้งสุญญากาศ และการอบแห้งด้วยอิมฟราเรด โดยทำอุณหภูมิอากาศร้อน 6 ระดับ คือ 45, 50, 55, 60, 65 และ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 3 ระดับ คือ 0.5, 1.0 และ 1.5 เมตรต่อวินาที กำลังไมโครเวฟ 3 ระดับ คือ 100, 200 และ 3 วัตต์ การทดลองสุญญากาศ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดัน 250 กิโลนิตันต่อตาราง การอบแห้งด้วยอินฟราเรดที่ความเร็วลม 4 ระดับ คือ 0.3, 0.5, 0.7 และ 1 เมตรต่อวินาที และความสว่างของหลอดอินฟราเรด 3 ระดับ คือ 0.22, 0.31 และ 0.94 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ผลการทดลองพบว่า การใช้พลังงานต่ำสุดและสูงสุดในการอบแห้งทับทิม การใช้ไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อนในการ

อบแห้งทับทิมสามารถลดเวลาการอบแห้งและการใช้พลังงาน เมื่อเทียบกับการอบแห้งด้วยอากาศร้อนเพียงอย่างเดียว และการอบแห้งด้วยอินฟราเรดเวลาอบแห้งจะเพิ่มขึ้นตามความเร็วลม ซึ่งมีผลให้การใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้นด้วย

(Tilahun, Vijaya, & Garipey, 2011) ศึกษาการอบแห้งมะเขือเทศแผ่นด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน โดยนำสมการทางคณิตศาสตร์แบบชั้นบางวิเคราะห์จลนพลศาสตร์การอบแห้งมะเขือเทศแผ่น สมการทางคณิตศาสตร์แบบชั้นบางที่ใช้วิเคราะห์จลนพลศาสตร์การอบแห้งมะเขือเทศแผ่น ได้แก่ Lewis, Page และ Henderson and Pabis โดยมะเขือเทศจะแห้งได้เร็วขึ้นเมื่อนำไปอบด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน และค่าสัมประสิทธิ์การอบแห้งทั้ง 3 สมการ พบว่าการอบแห้งด้วยไมโครเวฟที่ความหนาแน่นระดับ 1.13 วัตต์ต่อกรัม มีค่าสูงสุดและการอบแห้งด้วยไมโครเวฟที่ความหนาแน่น 2.08 วัตต์ต่อกรัม มีค่าที่ดีที่สุด

(กฤษณ์ อภิญญาวิศิษฐ์, อติศักดิ์ นาถกรณกุล, & สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, 2560) ได้จำลองการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิของโพลด์จำลอง เพื่อออกแบบขนาดของห้องอบแห้งของเครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อนแบบสายพานลำเลียงต้นแบบโดยใช้โปรแกรม COMSOL MULTIPHYSICS ขอบเขตการออกแบบขนาดของเครื่องอบแห้งแบบทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ในช่วงความกว้าง ความยาว และความสูง 0.3 - 0.5 เมตร ต่อแมกนีตรอนขนาด 800 วัตต์ พบว่า การเปลี่ยนแปลงขนาดของเครื่องอบแห้งทั้งความกว้างความยาว และความสูงมีผลต่อลักษณะการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิของโพลด์ ในกรณีของการออกแบบสำหรับแมกนีตรอน 1 ตัว เงื่อนไขที่ความกว้าง 0.30 เมตร ความยาว 0.30 เมตร และความสูง 0.50 เมตร มีการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอจากนี้ในกรณีการขยายขนาดของเครื่องอบแห้ง เงื่อนไขที่ความกว้าง 0.30 เมตร ความยาว 0.68 เมตร ความสูง 0.50 เมตรและระดับความสูงของสายพานจากระดับฐานห้องอบแห้ง 0.09 เมตร จะทำให้โพลด์มีการกระจายอุณหภูมิที่สม่ำเสมอ และในการทดสอบเครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อนต้นแบบที่ออกแบบและสร้างขึ้นพบว่า มีการกระจายของคลื่นไมโครเวฟที่สม่ำเสมอ และมีการรั่วไหลของคลื่นไมโครเวฟอยู่ในมาตรฐานความปลอดภัยของตู้อบไมโครเวฟของ The US Department of Health and Human Services (DHHS) ซึ่งผลการศึกษาสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบเครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟแบบสายพานสำหรับอุตสาหกรรม

(ธรรารุช บุญน้อม, สาวิตรี ประภาการ, ญัฐพงษ์ ประภาการ, พรธชา ลิบลับ, & วีรชัย อัจหาญ, 2561) ได้ทำการศึกษาทดลองอบแห้งพริกด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน ศึกษาจลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง คุณภาพสีของพริก ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ และต้นทุนของพลังงาน เครื่องอบแห้งประกอบด้วย แมกนีตรอนขนาด 1200 วัตต์ จำนวน 6 ตัว ห้องอบมีขนาด 210 ลิตร และชุดผลิตลมร้อนแบบหมุนวนขนาด 5,000 วัตต์ อุณหภูมิสูงสุด 180 องศาเซลเซียส ผล

การศึกษาที่สภาวะการเปิดแมกนีตรอน 90 วินาที อุณหภูมิอากาศร้อน 60 องศาเซลเซียส ค่าความชื้นของพริกลดลงจากร้อยละ 28.46 ถึง 29.6 ฐานเปียก ระยะเวลาอบแห้ง 240 นาที ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ เท่ากับ 18.79 กิโลจูลต่อกิโลกรัม มีอัตราการผลิตพริกแห้ง 7.2 กิโลกรัมแห้งต่อวัน ต้นทุนพลังงานการผลิตพริกแห้ง 38 บาทต่อกิโลกรัมพริกแห้ง และพริกแห้งที่อบด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อนมีลักษณะผิวเป็นสีแดงใสขี้เขียว และไม่แตก โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Logistic มีความเหมาะสมที่สุดในการทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งพริกด้วยเตาอบไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อนได้ดีที่สุด โดยให้ค่า R^2 (0.9990) มากที่สุด และ RMSE (0.0174) น้อยที่สุด ซึ่งจากผลการศึกษาแสดงให้เห็นถึงความเป็นได้โน้มนำไปพัฒนาใช้ต่อไปในระดับเชิงพาณิชย์ เพราะเป็นเทคโนโลยีที่สะอาด ใช้เวลาอบแห้งสั้น และผลผลิตมีคุณภาพสูง

2.10.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับดักแด้ใหม่อีรี

ดักแด้ใหม่ได้ถูกนำมาศึกษาเพื่อหาความเหมาะสมในการเก็บรักษา โดยได้ศึกษาอบแห้งด้วยวิธีการต่างๆ โดยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งดักแด้ใหม่ ได้แก่

(Usub et al., 2008) ได้ทำการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งอุโมงค์แสงอาทิตย์แบบหมุนเวียนแบบผสมผสาน ซึ่งใช้อบแห้งดักแด้ใหม่ในสภาพอากาศของมหาสารคามประเทศไทย เครื่องอบแห้งประกอบไปด้วยกระจกใสที่เป็นอุโมงค์เชื่อมต่อเครื่องเป่าลม โดยขนาดของเครื่องมีความยาว 6.2 เมตร กว้าง 1.8 เมตร อบแห้งดักแด้ใหม่ 30 กิโลกรัม จากการทดลองพบว่า ระยะเวลาในการอบแห้งขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของอากาศแห้งและอุณหภูมิ โดยปริมาณความชื้นของดักแด้ใหม่ลดลงจาก 3.70 กิโลกรัมน้ำต่อกิโลกรัม มวลใน 570 นาที ที่อัตราการไหลของอากาศ 0.30 กิโลกรัมต่อวินาที และใช้เวลาในการอบแห้ง 945 นาที ซึ่งเวลาในการอบแห้งลดลงประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ และการประเมินคุณภาพปริมาณไขมันของดักแด้ใหม่ไม่ได้รับผลกระทบจากเครื่องอบแห้ง ประสิทธิภาพการอบแห้งสูงสุดเท่ากับ 30.14 เปอร์เซ็นต์ และประสิทธิภาพโดยรวมเท่ากับ 19.68 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหลของอากาศ 0.30 กิโลกรัมต่อวินาที

(Usub et al., 2010) ทดลองอบแห้งดักแด้ใหม่ด้วยเครื่องอบอุโมงค์แสงอาทิตย์ที่มหาสารคามประเทศไทย โดยทดลองอบแห้งดักแด้ใหม่จนถึงความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 0.15 กิโลกรัมน้ำต่อกิโลกรัมมวลแห้ง จากความชื้นเริ่มต้น 4.37 กิโลกรัมน้ำต่อกิโลกรัมมวลแห้ง อบแห้งเวลานาน 373 นาที ที่อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 0.32 กิโลกรัมต่อวินาที ผลการทดลองที่ได้มาประมวลผลด้วยสมการทางคณิตศาสตร์การอบแห้งสมการแบบชั้นบาง 10 สมการ พบว่าสมการที่สามารถทำนายผลได้ดีที่สุด คือ Midilli-Kucuk โดย มีค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด R^2 เท่ากับ 0.9982 อัตราการอบแห้งสูงสุดเท่ากับ 0.6723 กิโลกรัมน้ำต่อกิโลกรัมแห้ง และความชื้นสัมพัทธ์มีค่าเท่ากับ 2.7696×10^{-10} ตารางเมตรต่อวินาที ที่อัตราการไหลของอากาศแห้ง 0.32 กิโลกรัมต่อวินาที การประเมินคุณภาพแสดงให้เห็นว่าเครื่องอบอุโมงค์แสงอาทิตย์ไม่มีผลกระทบต่อปริมาณไขมันของดักแด้ใหม่

(ชวธีร์ ศรีแก้ว & สิริชัย ส่งเสริมพงษ์, 2555) ได้ศึกษาการอบแห้งดักแด้ไหมอีรี่ ที่ อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง มีค่าความชื้น 3.81 เปอร์เซ็นต์ และค่าวอเตอร์แอกติวิตีเท่ากับ 0.41 จะให้ค่าความกรอบที่เหมาะสมและไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญด้านค่าสีของผลิตภัณฑ์ดักแด้ไหมทอดและอบกรอบบรรจุกระป๋อง พบว่าการทอดด้วยน้ำมันท่วมที่อุณหภูมิ 170 และ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที ต้องผ่านการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนจึงทำให้ค่าวอเตอร์แอกติวิตี มีค่าต่ำกว่า 0.6 การทดสอบทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ดักแด้ไหมอบแห้งที่ปรุงรสด้วยเกลือ และผลิตภัณฑ์ดักแด้ทอดกรอบที่ปรุงด้วยรสไก่เผ็ดได้รับคะแนนความชอบโดยรวมมากที่สุด อุณหภูมิฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับผลิตภัณฑ์ดักแด้ไหมในน้ำเกลือบรรจุกระป๋อง คือ 116 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25 นาที โดยมีค่า F0 เท่ากับ 8.6 นาที สามารถเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องได้นานกว่า 6 เดือน

2.10.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจำลองผลการทำนายการอบแห้ง

สมการชั้นบางได้ถูกนำมาทำนายผลการอบแห้งอย่างแพร่หลายเปรียบเทียบกับผลการทดลองเพื่ออธิบายการอบแห้งในด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ โดยการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจำลองผลของการอบแห้งผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้แก่

(Hii, Law, & Cloke, 2009) ได้ศึกษาพัฒนาสมการเอมไพริคัลใหม่สำหรับจำลองการอบแห้งด้วยเมล็ดโกโก้ด้วยการอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิร้อน 3 ระดับ คือ 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส ด้วยการรวมสมการ Page และ Two term เข้าด้วยกัน ผลการวิเคราะห์ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์การรวมสมการ Page และ Two term มีสัมประสิทธิ์การกระจายตัวที่ระหว่าง 7.46×10^{-11} และ 1.87×10^{-10} ตารางเมตรต่อวินาที ค่าคงที่ Arrhenius เท่ากับ 8.43×10^{-4} ตารางเมตรต่อวินาที และ พลังงานกระตุ้นเท่ากับ 44.92 กิโลจูลต่อโมล

(ปองพล สุริยะกันธร & ฤทธิชัย อัครราชันย์, 2555) ได้ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งแบบชั้นบางสำหรับทำนายการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของใบกะเพราอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟระดับห้องปฏิบัติการที่ระดับพลังงานของคลื่นไมโครเวฟระหว่าง 164 - 752 วัตต์ ความชื้นเริ่มต้น 5.19 กรัม/น้ำต่อกรัม แห้งจนเหลือความชื้น 0.06 กรัม/น้ำต่อกรัมมวลแห้งใช้เวลาในการอบแห้งระหว่าง 18.50 - 2.75 นาที โดยใช้แบบจำลองการอบแห้งทางคณิตศาสตร์แบบชั้นบาง 5 สมการ ประกอบด้วย Lewis, Henderson and Pabis, Page, Wang and Singh และ Logarithmic เพื่อทำนายอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของใบกะเพราในระหว่างการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ระดับพลังงานและเวลาอบแห้งต่างๆ พบว่าแบบจำลองการอบแห้งแบบชั้นบางของ Page สามารถทำนายคุณลักษณะการอบแห้งของใบกะเพราได้เหมาะสมที่สุด เนื่องจากให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R² สูงที่สุดในขณะที่ให้ค่าโคสแควร์, RMSE และค่า MBE ต่ำที่สุด ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของใบกะเพราที่ระดับพลังงานของคลื่นไมโครเวฟ 164 - 752 วัตต์ มีค่า

ระหว่าง 0.3214×10^{-10} - 2.0703×10^{-10} ตารางเมตรต่อวินาที และค่าพลังงานกระตุ้นซึ่งคำนวณจากความสัมพันธ์ในรูปแบบของสมการอาร์เรเนียส มีค่าเท่ากับ 19.85 วัตต์ต่อกรัม

(Nwakuba, Kelechi Ejesu, & Chijioke Okafor, 2017) ได้ศึกษาพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายอัตราการอบแห้งของเมล็ดโกโก้ด้วยเครื่องอบอากาศร้อนแบบหมุนเวียน โดยใช้การวิเคราะห์เชิงมิติตามทฤษฎีบทของบัคกิงแฮม พบว่าเมื่อระดับความชื้นภายในเมล็ดโกโก้ลดลงความต้านทานการเคลื่อนที่ของน้ำภายในเมล็ดโกโก้จะมีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราการอบแห้งลดลง สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ได้เท่ากับ 94.7, 99.8 และ 99.5 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส ตามลำดับ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบชิ้นบางระหว่างอัตราการอบแห้งกับค่าทำนายการอบแห้งเมล็ดโกโก้ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

2.10.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของการอบแห้ง

การศึกษาในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของความชื้นของการการอบแห้งวัสดุต่างๆ เปรียบเทียบกับการทดลอง ได้แก่

(Silva, Silva, & Mariani, 2009) ได้ศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นการอบแห้งเห็ดด้วยอากาศร้อน โดยใช้อุณหภูมิอากาศร้อน 4 ระดับ คือ 45 60 75 และ 80 องศาเซลเซียส และความเร็วลม 4 ระดับ คือ 1.0 1.2 1.75 2.3 และ 2.5 เมตรต่อวินาที เพื่อหาแนวทางในการวิเคราะห์สมการการถ่ายโอนมวลสำหรับการอบแห้งโดยใช้เทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพสองแบบคือ Levenberg-Marquardt และ Differential Evolution ในการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของเห็ดจะมีค่าสูงเมื่ออุณหภูมิและความเร็วลมสูงขึ้น

(อีลีหียะ สนิโซ, ฟามิรา สะอูดี, & รัชดาภรณ์ ฮานาฟ, 2555) ได้ศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ และอัตราการระเหยน้ำจำเพาะของการอบแห้งผลหมากผ่าซีกด้วยอากาศร้อน ไมโครเวฟ และอากาศร้อนร่วมกับไมโครเวฟ ที่ความเร็วลมเท่ากับ 1 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิอากาศร้อนในช่วง 60-80 องศาเซลเซียส และกำลังคลื่นไมโครเวฟในช่วง 180 - 600 วัตต์ จากการทดลองพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นมีค่าอยู่ในช่วง 6.05×10^{-4} - 91.80×10^{-3} ตารางเซนติเมตรต่อวินาที อัตราการระเหยน้ำจำเพาะมีค่าอยู่ในช่วง 0.0295 - 1.2978 กิโลกรัมต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีค่าอยู่ในช่วง 0.0063 - 1.1071 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม

(มะลิ นาชัยสินธ์ & ศักดิ์ชัย ดรดี, 2557) ศึกษาอิทธิพลของความชื้นของการแผ่รังสีอินฟราเรดแบบคลื่นยาวต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นของไหลอบแห้ง ด้วยการอบแห้งด้วยป้มความร้อนร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นยาวตัวแปรการอบแห้งคือ ความชื้นของรังสีอินฟราเรดคลื่นยาวที่ 1-4 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร อุณหภูมิของอากาศอบแห้งที่ 40 - 60 องศาเซลเซียส และ

ความเร็วของอากาศอบแห้งที่ 0.5 เมตรต่อวินาที ความชื้นเริ่มต้นของไพล 420 - 500 เปอร์เซ็นต์ฐานแห้ง ลดลงเหลือ 6 เปอร์เซ็นต์ฐานแห้ง สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของไพลในช่วงแรกของการอบแห้งและหลังจากนั้นจะคงที่เมื่อเวลาอบแห้งเพิ่มขึ้น สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของไพลจะอยู่ในช่วง 27 - 1200, 60 - 300 และ 30 - 280 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร ที่อุณหภูมิของการอบแห้ง 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ การแพร่ความชื้นประสิทธิผลอยู่ในช่วง $0.11 \times 10^{-10} - 0.84 \times 10^{-10}$ ตารางเมตรต่อวินาที

จากการสำรวจเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องของเครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน พบว่า มีการศึกษาหลายๆ ประเด็น เช่น การอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน โดยเปลี่ยนแปลงขนาดกำลังไมโครเวฟ อุณหภูมิอากาศร้อน อัตราการไหลของอากาศ และการอบแห้งด้วยกำลังไมโครเวฟโดยแบ่งช่วงการอบแห้งเป็นช่วงๆ แต่ระช่วงการอบแห้งจะใช้กำลังไมโครเวฟและอุณหภูมิอากาศร้อนแตกต่างกัน เป็นต้น ซึ่งพบว่าการอบแห้งการอบแห้งมีประสิทธิภาพแตกต่างกันตามปัจจัยต่างๆ ตามปัจจัยของกำลังไมโครเวฟและอุณหภูมิอากาศร้อน ดังนั้นในการศึกษาเครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน จึงพัฒนาเครื่องอบแห้งโดยควบคุมกำลังไมโครเวฟในระหว่างการอบแห้งให้คงที่ตลอดระยะเวลาการอบแห้งเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งให้สูงขึ้น



บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 การเตรียมดักแด้ไหมอีรี่

ดักแด้ไหมอีรี่ได้มาจาก อำเภอนาคู จังหวัดกาฬสินธุ์ โดยเมื่อไหมโตเต็มวัยจะพ่นเส้นไหมออกมาหุ้มตัวเรียกว่ารังไหมและตัวไหมจะรอกคราบเป็นดักแด้ไหม จากนั้นรังไหมจะถูกนำมาตัดรังไหมเพื่อเอาดักแด้ไหมออก ดักแด้ไหมอีรี่ที่ได้จะถูกนำมาต้มสุกและนำมาเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 - 5 องศาเซลเซียส ก่อนทำการทดลองนำดักแด้ไหมอีรี่มาฝังไว้ที่อุณหภูมิห้องจนอุณหภูมิของดักแด้ไหมเท่ากับอุณหภูมิห้อง

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 เครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน สร้างและทดลองที่คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยมหาสารคาม มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- 1) ห้องอบแห้งผลิตภัณฑ์ มีขนาด ยาว 30 เซนติเมตร กว้าง 21 เซนติเมตร และสูง 24 เซนติเมตร ผนังสแตนเลสผิวเรียบ ประกอบด้วยถาดหมุนด้านล่างห้องอบ มีแมกนีตรอนติดตั้งที่ผนังด้านขวาห้องอบ มีทางเข้าของอากาศด้านบนและทางออกของอากาศทางด้านซ้ายของห้องอบแห้ง
- 2) ห้องอากาศร้อน ประกอบด้วยตัวทำความร้อนแบบแห้งขนาด 1 กิโลวัตต์ จำนวน 2 ตัว ติดตั้งภายในห้องแลกเปลี่ยนความร้อน
- 3) พัดลมดูดอากาศ ชนิดเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal fan) แบบหน้าตัดโค้ง ขนาด 8 นิ้ว ขับด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส 380 โวลต์ ขนาด 0.5 แรงม้า

3.2.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองและเก็บรวบรวมข้อมูล

- 1) เครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลองและเก็บรวบรวมข้อมูลในการอบแห้ง
 - (1) เครื่องคอมพิวเตอร์ 1 ชุด
 - (2) เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัล Shimadzu TX3002 L ความละเอียด 0.01 กรัม
 - (3) สามยเทอร์โมคัปเปิล ชนิด Type T
 - (4) เครื่องวัดกระแสไฟฟ้า Auto clamp mutimeter (UNI-T UT200D)
 - (5) เครื่องปรับความเร็วรอบมอเตอร์ Toshiba VE-SX transistor inverter

2) เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองหาความชื้นของดักแด้ใหม่อีรี

(1) ตู้อบลมร้อน

(2) กระจบองสแตนเลส ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร สูง 40 มิลลิเมตร

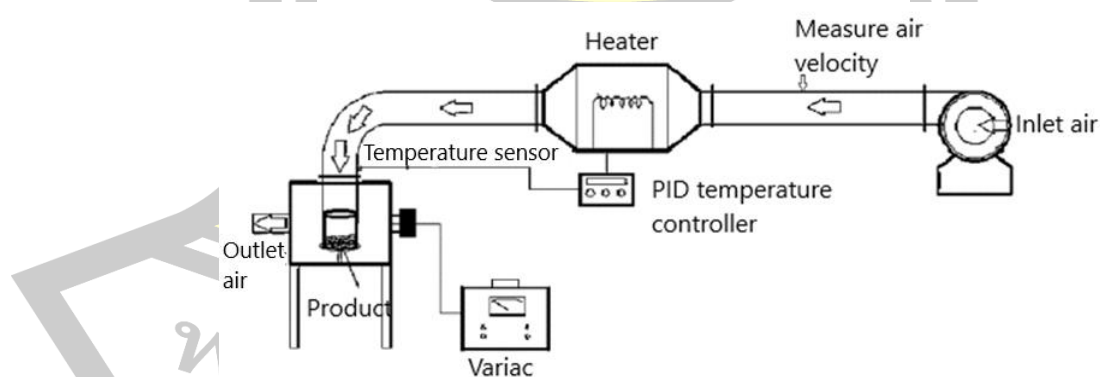
(3) เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล WT 32002 CF ความละเอียด 0.01 กรัม

3) เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองหาคุณภาพของผลิตภัณฑ์

เครื่องวัดสี Color Flex EZ CFEZ0939

3.3 การทำงานของเครื่องอบแห้งไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน

จากภาพประกอบ 3.1 แสดงอุปกรณ์ส่วนประกอบของเครื่องอบแห้งไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน ซึ่งมีหลักการทำงานดังนี้ คือ อากาศภายนอกเครื่องอบแห้งถูกพัดลมดูดอากาศ ดูดอากาศส่งผ่านท่อลมไปยังห้องทำความร้อน มีจุดวัดความเร็วลมก่อนทางเข้าห้องทำอากาศร้อน 4 เท่า ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ อากาศร้อนจะแลกเปลี่ยนความร้อนกับตัวทำความร้อนตามอุณหภูมิ อากาศร้อนที่กำหนดในการอบแห้ง โดยอุณหภูมิอากาศจะวัดอุณหภูมิที่ทางเข้าของห้องอบแห้งส่งสัญญาณมายัง PID temperature control เพื่อทำการตัดต่อการทำงานของตัวทำความร้อน พร้อมกันนี้แมกนีตรอนก็จะถูกจ่ายกระแสไฟฟ้าด้วยเช่นกัน เพื่อสร้างคลื่นไมโครเวฟส่งเข้าไปในห้องอบแห้งทำงานพร้อมกับอากาศร้อนเพื่ออบแห้งผลิตภัณฑ์



ภาพประกอบ 0.1 เครื่องอบแห้งไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน

3.4 การทดสอบหาค่ากำลังไมโครเวฟของเครื่องอบแห้งไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน

การทดลองเครื่องอบแห้งเพื่อทดสอบค่ากำลังไมโครเวฟดูดซับ ได้ทำการทดลองตามวิธีของ Kashaninejad et al. (2007) โดยใช้ น้ำเป็นตัวดูดซับกำลังไมโครเวฟ โดยได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกำลังไมโครเวฟ สามารถคำนวณดังสมการที่ 3.1

$$P_o = \frac{mC_p\Delta T}{t} \quad (3.1)$$

เมื่อ P_o คือ พลังงานไมโครเวฟที่น้ำดูดซับ (วัตต์)
 m คือ มวลของน้ำ (ลูกบาศก์เซนติเมตร)
 C_p คือ ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ (4.18 J/g/K)
 ΔT คือ ค่าความแตกต่างอุณหภูมิก่อนและหลังให้ความร้อน

3.5 การดำเนินการทดลองเครื่องอบแห้งไมโครเวฟ

3.5.1 ศึกษาปัจจัยแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่มีผลต่อกำลังของไมโครเวฟ

ปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

ปริมาณน้ำ 150 ลูกบาศก์เซนติเมตร ใส่ปีกเกอร์ขนาด 250 ลูกบาศก์เซนติเมตร
 แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ทดลองจ่ายให้กับแมกนีตรอน 13 ระดับ คือ 240, 235, 230, 225, 220, 215, 210, 205, 200, 195, 180, 175 และ 150 โวลต์

ขั้นตอนการทดลอง

- 1) ตวงน้ำ 150 ลูกบาศก์เซนติเมตร ใส่ปีกเกอร์ขนาด 250 ลูกบาศก์เซนติเมตร
- 2) นำน้ำเข้าเครื่องไมโครเวฟให้ความร้อนนาน 1 นาที
- 3) ทำการวัดค่าอุณหภูมิน้ำก่อนและหลังการให้ความร้อน นำค่าที่วัดได้ไปคำนวณหาค่ากำลังไมโครเวฟที่น้ำดูดซับด้วยสมการ 3.1

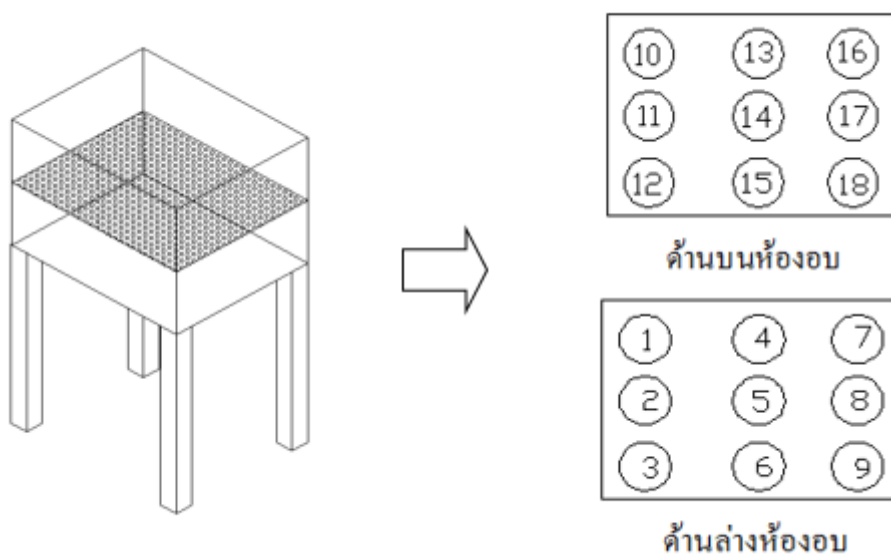
3.5.2 ศึกษาการกระจายตัวของคลื่นภายในห้องอบแห้งไมโครเวฟ

ปัจจัยที่ใช้ในการศึกษา

ปริมาณน้ำทดลอง 150 ลูกบาศก์เซนติเมตร และเวลาให้ความร้อน 1 นาที
 ตำแหน่งการวัดค่ากำลังไมโครเวฟภายในห้องอบแห้ง 18 ตำแหน่ง

ขั้นตอนการทดลอง

- 1) ตวงน้ำ 150 ลูกบาศก์เซนติเมตร ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 ลูกบาศก์เซนติเมตร
- 2) นำน้ำเข้าเครื่องไมโครเวฟให้ความร้อนนาน 1 นาที
- 3) ทำการวัดค่าอุณหภูมิของน้ำก่อนและหลังเข้าห้องไมโครเวฟ จากนั้นนำไปคำนวณหาค่ากำลังไมโครเวฟที่น้ำดูดซับด้วยสมการ 3.1



ภาพประกอบ 0.2 ตำแหน่งการวัดค่ากำลังไมโครเวฟภายในห้องอบแห้งไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน

3.5.3 ศึกษาความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำกับเวลาการให้ความร้อน ปัจจัยที่ใช้ศึกษา

ปริมาณน้ำ 2 ระดับ คือ 150 และ 250 ลูกบาศก์เซนติเมตร
กำลังไมโครเวฟ 2 ระดับ คือ 300 และ 400 วัตต์

เวลาการให้ความร้อน 3 ระดับ คือ 1, 2 และ 3 นาที
มีขั้นตอนการศึกษาดังนี้

- 1) ตวงน้ำปริมาณ 150 ลูกบาศก์เซนติเมตร ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 ลูกบาศก์เซนติเมตร
- 2) นำตัวอย่างเข้าเครื่องไมโครเวฟให้ความร้อนนาน 1 นาที
- 3) วัดค่าอุณหภูมิของน้ำก่อนและหลังการให้ความร้อน จากนั้นนำไปคำนวณหาค่ากำลังไมโครเวฟที่น้ำดูดซับด้วยสมการ 3.1

3.6 การดำเนินการทดลองอบแห้งดักแด้ไหมอีรี่

3.6.1 การเตรียมดักแด้ไหมอีรี่

ดักแด้ไหมอีรี่ที่ใช้ในการทดลองจากอำเภอนาคู จังหวัดมหาสารคาม โดยดักแด้ไหมอีรี่ที่ถูกนำออกมาจากรังไหมจะถูกนำไปลวกจนสุก จากนั้นจึงนำไปเก็บไว้ในห้องเย็นที่อุณหภูมิ 4 - 5 องศาเซลเซียส ก่อนทำการทดลองนำมาวางไว้ในอุณหภูมิห้อง สุ่มตัวอย่าง 15 กรัม หาความชื้นเริ่มต้นด้วยตู้อบอากาศร้อน ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง

3.6.2 การวางแผนการทดลอง

แบ่งการทดลองออกเป็น 3 การทดลอง

การทดลองที่ 1 การศึกษาการอบแห้งดักแด้ไหมอีรี่ด้วยอากาศร้อนเพียงอย่างเดียว

เป็นการทดลองแบบแฟคทอเรียล 3x2 ในแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ปัจจัยที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิอากาศร้อน และความเร็วลม

- 1) อุณหภูมิอากาศร้อน 3 ระดับ คือ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส
- 2) ความเร็วลม 2 ระดับ คือ 0.5 และ 1 เมตรต่อวินาที

การทดลองที่ 2 การศึกษาปัจจัยที่มีผลในการอบแห้งดักแด้ไหมอีรี่ด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน

เป็นการทดลองแบบแฟคทอเรียล 3x3x2 ในแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ปัจจัยที่ใช้ ได้แก่ ความหนาแน่นของไมโครเวฟ อุณหภูมิอากาศร้อน และความเร็วลม

- 1) อุณหภูมิอากาศร้อน 3 ระดับ คือ 50, 60 และ 70 เมตรต่อวินาที
- 2) ความเร็วลม 2 ระดับ คือ 1.0 และ 2.0 เมตรต่อวินาที
- 3) ความหนาแน่นไมโครเวฟ 3 ค่า คือ 0.67, 1.33 และ 2.00 วัตต์/กรัม

สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของกำลังไมโครเวฟกับน้ำหนักของดักแด้ไหม ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.2 (Yongsawatdigul & Gunasekaran, 1996)

$$MW_d = \frac{P_o}{W_s}$$

(3.2)

เมื่อ MW_d คือ ความหนาแน่นไมโครเวฟ (วัตต์ต่อกรัม)

P_o คือ พลังงานไมโครเวฟที่นำดูดซับ (วัตต์)

W_s คือ น้ำหนักเปียกดักแด้ไหมอีรี่ (กรัม)

การทดลองที่ 3 การหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งผักแต่ใหม่อีรีด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน

จากการทดลองที่ 1 และ 2 ทำให้ทราบปัจจัยที่มีผลและสามารถกำหนดช่วงสภาวะที่เหมาะสมได้จึงกำหนดปัจจัยที่ใช้ในการศึกษา เป็นการทดลองแบบแฟคทอเรียล 3x3 ในแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ ได้แก่ ความหนาแน่นของไมโครเวฟ และอุณหภูมิอากาศร้อน

- 1) อุณหภูมิอากาศร้อน 3 ระดับ คือ 50, 60 และ 70 เมตรต่อวินาที
- 2) ความหนาแน่นไมโครเวฟ 3 ระดับ คือ 0.67, 1.00 และ 1.33 วัตต์ต่อกรัม

3.7 ขั้นตอนการศึกษาการอบแห้งผักแต่ใหม่อีรี

การทดลองที่ 1 ศึกษาอบแห้งผักแต่ใหม่อีรีด้วยอากาศร้อนเพียงอย่างเดียว

- 1) ทำการตั้งค่าอุณหภูมิอากาศร้อนของเครื่องอบแห้งเท่ากับ 50 องศาเซลเซียส และความเร็วม 0.5 เมตรต่อวินาที จากนั้นเปิดเครื่องอบแห้งทิ้งไว้ 15 นาทีเพื่ออุ่นเครื่องอบแห้งให้มีอุณหภูมิคงที่พร้อมทดลอง

- 2) นำผักแต่ใหม่ 150 กรัม ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 72 ฐานเปียก เข้าอบในห้องอบแห้งทุกๆ 15 นาที จะนำตัวอย่างออกมาชั่งน้ำหนัก จนกระทั่ง 1 ชั่วโมง จึงนำตัวอย่างออกมาชั่งทุก 30 นาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และชั่งน้ำหนักทุก 1 ชั่วโมง จนกระทั่งได้ค่าความชื้นสุดท้ายร้อยละ 10 ฐานเปียกซึ่งเป็นค่าความชื้นของผักแต่ที่จำหน่ายตามท้องตลาด นำตัวอย่างไปวัดค่าสีและถ่ายรูป

- 3) พล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลา

หมายเหตุ ทำการทดลองอบแห้งผักแต่ใหม่อีรีโดยทำการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการทดลองปรับค่าอุณหภูมิอากาศร้อนเป็น 60 และ 70 องศาเซลเซียส และปรับค่าความเร็วมเป็น 1.0 เมตรต่อวินาที จนครบทุกเงื่อนไขทำการทดลอง 2 ซ้ำ

การทดลองที่ 2 การศึกษาปัจจัยที่มีผลในการอบแห้งผักแต่ใหม่อีรีด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน

- 1) ตั้งค่ากำลังไมโครเวฟ 100 วัตต์โดยใช้น้ำ 150 กรัม ให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ นาน 1 นาที ทำการวัดค่าอุณหภูมิน้ำก่อนและหลัง นำค่าที่วัดได้คำนวณค่ากำลังไมโครเวฟที่น้ำดูดซับได้ด้วยสมการ ที่ 3.1 โดยไม่คิดพลังงานที่เกิดจากการระเหยของน้ำเพราะมีค่าน้อยมาก ต่อน้ำหนักของผักแต่ใหม่อีรีที่ใช้อบแห้ง 150 กรัม ซึ่งสามารถคำนวณความหนาแน่นไมโครเวฟเท่ากับ 0.67 วัตต์ต่อกรัม ทำงานร่วมกับอุณหภูมิอากาศร้อน 50 องศาเซลเซียส และความเร็วม 1.0 เมตรต่อวินาที จากนั้นเปิดเครื่องอบแห้งทิ้งไว้ 15 นาที เพื่ออุ่นเครื่องอบแห้งให้มีอุณหภูมิคงที่พร้อมทดลอง

2) นำดักแต่้ใหม่ 150 กรัม ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 72 ฐานเปียกเข้าอบในห้องอบแห้ง นาน 4 นาที เมื่อครบกำหนดจะนำดักแต่้ใหม่อี้ออกจากห้องอบแล้วเก็บใส่ในถุงเก็บเพื่อป้องกัน ความชื้นกลับเข้าดักแต่้ใหม่อี้อ จากนั้นนำดักแต่้ใหม่อี้อที่อบแห้งแล้วไปหาความชื้นด้วยวิธีตู้อบอากาศ ร้อน ทำการอบแห้งโดยเพิ่มเวลาขึ้นครั้งละ 4 นาที จนกว่าดักแต่้ใหม่อี้อจะมีความชื้นร้อยละ 10 ฐาน เปียก และนำตัวอย่างไปวัดค่าสี และถ่ายรูป

3) พล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลา

หมายเหตุ ทำการทดลองอบแห้งดักแต่้ใหม่อี้อทำการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการ ทดลอง ปรับค่ากำลังไมโครเวฟเป็น 200 และ 300 วัตต์ อุณหภูมิอากาศร้อนเป็น 60 และ 70 องศา เซลเซียส และความเร็วลมเป็น 2.0 เมตรต่อวินาที จนครบทุกเงื่อนไข ทำการทดลอง 2 ซ้ำ

การทดลองที่ 3 การหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งดักแต่้ใหม่อี้อด้วยไมโครเวฟร่วมกับ อากาศร้อน

1) ตั้งค่ากำลังไมโครเวฟ 100 วัตต์ โดยใช้ น้ำ 150 กรัม ให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟนาน 1 นาที ทำการวัดค่าอุณหภูมิน้ำก่อนและหลัง นำค่าที่วัดได้คำนวณค่ากำลังไมโครเวฟที่น้ำดูดซับได้ ด้วยสมการ ที่ 3.1 โดยไม่คิดพลังงานที่เกิดจากการระเหยของน้ำเพราะมีค่าน้อยมากต่อดักแต่้ใหม่ที่ใช้ อบแห้ง150 กรัม สามารถคำนวณความหนาแน่นไมโครเวฟ 0.67 วัตต์ต่อกรัม อุณหภูมิลมร้อน 50 องศาเซลเซียส และความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที จากนั้นทำการเปิดเครื่องอบแห้งทิ้งไว้ 15 นาที เพื่ออุ่นเครื่องอบแห้งให้มีอุณหภูมิคงที่พร้อมทดลอง

2) นำดักแต่้ใหม่อี้อ 150 กรัม น้ำหนักเริ่มต้นร้อยละ72 ฐานเปียกเข้าอบในห้องอบแห้ง นาน 4 นาที เมื่อครบกำหนดจะนำดักแต่้ใหม่อี้อออกจากห้องอบแล้วเก็บใส่ในถุงเก็บเพื่อป้องกัน ความชื้นกลับเข้าดักแต่้ใหม่ จากนั้นนำไปหาความชื้นด้วยตู้อบอากาศร้อน ทำการอบแห้งโดยเพิ่มเวลา ขึ้นครั้งละ 4 นาที จนกว่าดักแต่้ใหม่อี้อจะมีความชื้นร้อยละ 10 ฐานเปียก ซึ่งในขณะอบแห้งทำการวัด ค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่อุปกรณ์ 3 ตัว แมกนีตรอน ฮีตเตอร์ และพัดลมเป่าอากาศ จากนั้นนำ ตัวอย่างไปวัดค่าสี

3) พล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลา

4) วิเคราะห์ความสัมพันธ์พลังงานจำเพาะอบแห้งดักแต่้ใหม่

5) การจำลองการอบแห้งแบบชั้นบางสำหรับทำนายการอบแห้งดักแต่้ใหม่อี้อ

6) เปรียบเทียบผลอัตราการอบแห้งจากการทำนายกับผลอัตราการอบแห้งจากผลการ ทดลอง

7) วิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นการอบแห้งดักแต่้ใหม่อี้อ

หมายเหตุ ทำการทดลองอบแห้งผักแต่ใหม่อีรีโดยทำการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการทดลองปรับค่ากำลังไมโครเวฟเป็น 150 และ 200 วัตต์ อุณหภูมิอากาศร้อนเป็น 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส

3.8 จลนศาสตร์การอบแห้งผักแต่ใหม่อีรีด้วยการอบแห้งตัดแต่ใหม่อีรีร่วมกับอากาศร้อน

3.8.1 วิเคราะห์จลนศาสตร์ของการอบแห้ง ดังต่อไปนี้

ร้อยละความชื้นฐานแห้ง (m_{db}) โดยร้อยละฐานแห้งสามารถหาได้จากสมการ 3.3

$$M_{db} = \frac{m_w - m_d}{m_d} \quad (3.3)$$

เมื่อ M_{db} คือ ร้อยละความชื้นฐานแห้ง
 m_w คือ มวลของน้ำในอาหาร(กรัม)
 m_d คือ มวลแห้งของอาหาร (กรัม)

3.8.2 อัตราส่วนความชื้น (moisture ratio)

อัตราส่วนความชื้น คือ ค่าที่บ่งบอกถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงมวลน้ำในผลิตภัณฑ์เทียบกับความชื้นเริ่มต้นเมื่อเวลาอบแห้งดำเนินไปเป็นเวลาใดๆ เขียนได้ดังสมการ 3.4 (Dadali, Apar, & Özbek, 2007)

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_o - M_{eq}} \quad (3.4)$$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น
 M_t คือ ความชื้นที่เวลาอบแห้งใดๆ (เปอร์เซ็นต์ฐานแห้ง)
 M_o คือ ความชื้นเริ่มต้น (เปอร์เซ็นต์ฐานแห้ง)
 M_{eq} คือ ความชื้นสมดุล (เปอร์เซ็นต์ฐานแห้ง)

เมื่อค่าความชื้นสมดุลมีค่าน้อยมากเทียบกับความชื้นเริ่มต้น และความชื้นที่เวลาใดๆ สามารถลดรูปสมการ 3.4 และสามารถเขียนสมการใหม่ได้ ดังนี้ (Dadali et al., 2007)

$$MR = \frac{M_t}{M_o} \quad (3.5)$$

3.8.3 ศึกษาความสัมพันธ์การแพร่ของดักแด่ใหม่อีรี

จากสมการที่ 2.6 ถ้าพิจารณาเฉพาะกรณี $m = 0$ และ $n = 1$ จะสามารถลดรูปได้ ดังสมการที่ 3.6

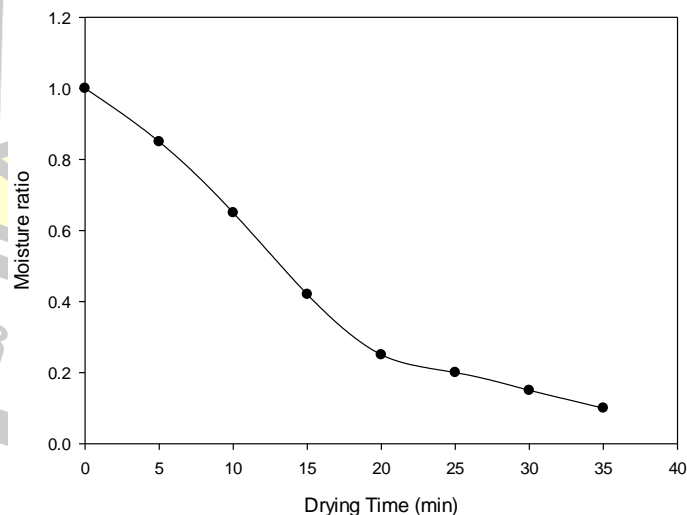
$$MR = 0.049 \exp^{-5.78N_{Fi} - 1.5N_{Fo}} \quad (3.6)$$

เมื่อ N_{Fi} คือ $\frac{D_{eff} t}{r_o}$ N_{Fo} คือ $\frac{D_{eff} t}{l^2}$ จากงานวิจัยของ (Roberts, Kidd, & Padilla-

Zakour, 2008) และ (Saykova, Cwicklinski, & Castelle, 2009) มีการพิจารณาว่าเทอมที่มีค่าสูงสุดของสมการ 3.6 เพื่อพิจารณาผลของลอการิทึมธรรมชาติของสมการที่ 3.6 สามารถเขียนได้ ดังสมการที่ 3.7

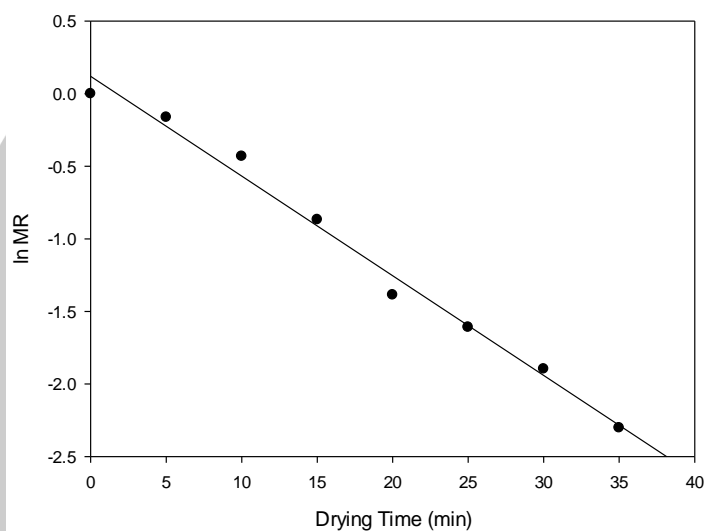
$$\ln MR = \ln(0.049) - \left(\frac{5.78}{r_o} + \frac{1.58}{l^2} \right) D_{eff} t \quad (3.7)$$

จากการทดลองอบแห้งสามารถพิจารณาอัตราส่วนอบแห้งดังสมการ 3.5 เทียบกับเวลาอบแห้ง พล็อตกราฟความสัมพันธ์ได้ดังภาพประกอบ 3.3



ภาพประกอบ 0.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาอบแห้ง

จากภาพประกอบ 3.3 นำค่าอัตราส่วนความชื้นมาหาค่าลอการิทึมธรรมชาติ และพล็อตกราฟเทียบกับเวลา เพื่อหาค่าความชันของการอบแห้ง



ภาพประกอบ 0.4 ความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมธรรมชาติของอัตราส่วนความชื้นกับเวลาการอบแห้ง

สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ได้จากสมการ 3.8

$$Deff = \frac{-slope}{\frac{r_0^2}{6} + l^2}$$

(3.8)

3.9 ศึกษาความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

การประเมินความสิ้นเปลืองการใช้ไฟฟ้าเครื่องอบแห้งไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน ได้ทำการวัดค่าการใช้ไฟฟ้าของอุปกรณ์ในเครื่องอบแห้ง ซึ่งได้แก่ ไมโครเวฟ ตัวทำความร้อน และพัดลมเป่าอากาศ ด้วยเครื่องวัดกระแสไฟฟ้าแอมป์มิเตอร์ ที่การทดลองกำลังไมโครเวฟ 3 ระดับ คือ 100, 150 และ 200 วัตต์ ตัวทำความร้อน 3 ระดับ คือ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส และพัดลมที่ความเร็วลม 1 เมตรต่อวินาที พร้อมทั้งเวลาทำงานของอุปกรณ์ทั้งหมด ซึ่งสามารถคำนวณหาปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าแต่ละอุปกรณ์ได้จากสมการ 3.9

กำลังไฟฟ้าสามารถหาได้จากผลคูณแรงดันไฟฟ้าคูณด้วยกระแสไฟฟ้า สามารถเขียนได้ดังสมการ 3.9

$$P = E \times I \quad (3.9)$$

เมื่อ P คือ กำลังไฟฟ้า (วัตต์)
 E คือ แรงดันไฟฟ้า (โวลต์)
 I คือ กระแสไฟฟ้า (แอมป์)

กำลังไฟฟ้า คือ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในอุปกรณ์ไฟฟ้า 1 วินาที กำลังไฟฟ้าในการอบแห้งผักผลไม้ อีรีด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน สามารถหาได้จากพลังงานไฟฟ้าที่เครื่องใช้ไฟฟ้าใช้ไปในเวลา 1 วินาทีที่สามารถคำนวณได้ดังสมการ 3.10 (Paengkanya et al., 2015)

$$SEC = \frac{T_{Energy} \times t \times 3600}{W_{loss}} \quad (3.10)$$

เมื่อ SEC คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (กิโลจูลต่อกิโลกรัมน้ำ)
 T_{Energy} คือ พลังงานทั้งหมดที่เข้าไปในระบบ (กิโลวัตต์)
 w_{loss} คือ น้ำหนักที่หายไประหว่างลดความชื้น (กิโลกรัม)
 t คือ เวลาในการอบแห้ง (ชั่วโมง)

3.10 การวิเคราะห์คุณภาพสี

3.10.1 เปิดเครื่องแล้วทำการปรับค่าสีด้วยเครื่องวัดสี โดยใช้แผ่นมาตรฐาน สีดำ สีขาวและสีเขียว ในการปรับตั้งค่าตามมาตรฐาน

3.10.2 เตรียมตัวอย่างผักผลไม้ ใส่ผักผลไม้ในแก้วใสประมาณ 2/3 ของแก้ว จากนั้นนำตัวอย่างไปวางบนแผ่นของเครื่องวัดสีตั้งแสดงบทที่ 2 ทำการวัดค่าตัวอย่างละ 5 ซ้ำ



ภาพประกอบ 0.5 เครื่องวัดสี รุ่น Color Flex EZ CFEZ0939



บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปราย

เครื่องอบแห้งผักผลไม้ด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน ได้ทำการออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งผักผลไม้ โดยแบ่งหัวข้อการศึกษาเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ

4.1 ผลการทดสอบของเครื่องอบแห้งไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน

- 4.1.1 ผลการทดลองปัจจัยแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่มีผลต่อกำลังของไมโครเวฟ
- 4.1.2 ผลการทดลองการกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟภายในห้องอบแห้ง
- 4.1.3 ผลการทดลองความสัมพันธ์ของการดูดซับกำลังไมโครเวฟที่ปริมาณน้ำต่างๆ

4.2 ผลการศึกษาอบแห้งผักผลไม้ด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน

- 4.2.1 ผลการศึกษารอบแห้งผักผลไม้ด้วยอากาศร้อนเพียงอย่างเดียว
- 4.2.2 ผลการศึกษปัจจัยที่มีผลในการอบแห้งผักผลไม้ด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน
- 4.2.3 ผลการหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งผักผลไม้ด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน

4.1 ผลการทดสอบของเครื่องอบแห้งไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน

4.1.1 ผลการทดลองปัจจัยแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่มีผลต่อกำลังของไมโครเวฟ

การควบคุมการจ่ายแรงเคลื่อนไฟฟ้าให้แมกนีตรอน สามารถคำนวณค่ากำลังไมโครเวฟที่จ่ายแรงเคลื่อนไฟฟ้าค่าต่างๆ ด้วยสมการที่ 3.1 แสดงดังตาราง 4.1

พูน ปณ ทิโต ชีเว

ตาราง 0.1 ผลการทดสอบค่ากำลังไมโครเวฟที่ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่างๆ

แรงดันไฟฟ้า (โวลต์)	อุณหภูมิน้ำ (องศาเซลเซียส)		น้ำหนัก (กรัม)		กำลังไมโครเวฟ (วัตต์)			รวม (วัตต์)
	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	น้ำดูดซับ	แก้วดูดซับ	น้ำที่ระเหย	
240	30.90	63.20	504.82	503.99	450.05	84.41	31.26	566
230	29.80	61.10	490.08	489.50	436.11	81.80	21.85	541
225	29.80	60.00	505.88	505.40	420.79	78.92	18.08	518
220	29.80	60.60	481.45	481.02	429.15	80.49	16.20	526
215	29.70	58.00	498.32	492.86	394.31	73.96	205.66	674
210	30.10	60.80	496.86	496.25	427.75	80.23	22.98	531
205	30.30	58.70	499.10	499.00	395.71	74.22	3.77	474
200	30.50	55.10	499.14	498.68	342.76	64.29	17.33	424
195	30.50	55.10	489.21	488.89	342.76	64.29	12.05	419
190	30.80	61.10	482.68	482.36	422.18	79.18	12.05	513
175	30.40	55.00	513.12	512.49	342.76	64.29	23.73	431
150	N/A							

N/A ไม่สามารถวัดค่ากำลังไมโครเวฟได้

ตาราง 4.1 พบว่าเมื่อจ่ายแรงเคลื่อนไฟฟ้าให้แมกนีตรอนมีค่าสูง โดยเริ่มต้นทดลองจ่ายแรงเคลื่อนไฟฟ้า 240 โวลต์ เนื่องจากแมกนีตรอนมีหลักการทำงานด้วยความต่างศักย์ทางไฟฟ้า ทำให้พบว่า การจ่ายแรงเคลื่อนไฟฟ้า 240 โวลต์ จะมีค่ากำลังไมโครเวฟที่สูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับกำลังไมโครเวฟ ที่ปรับลดค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายให้แมกนีตรอนน้อยลงและเมื่อจ่ายแรงเคลื่อนไฟฟ้า 150 โวลต์ เป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกินไปทำให้แมกนีตรอนไม่สามารถสร้างคลื่นไมโครเวฟได้ค่ากำลังไมโครเวฟจึงหาค่าไม่ได้ซึ่งจากการทดลองพบว่าการกำหนดแรงเคลื่อนที่จ่ายให้แมกนีตรอนไม่สามารถกำหนดค่ากำลังไมโครเวฟที่แน่นอนได้ ดังนั้นการตั้งค่ากำลังไมโครเวฟในการทดลองจึงทำการตั้งค่ากำลังไมโครเวฟด้วยการวัดค่ากำลังไมโครเวฟที่น้ำดูดซับโดยไม่คำนึงค่าของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแมกนีตรอน

ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแมกนีตรอน

4.1.2 ผลการศึกษาการกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟภายในห้องอบแห้ง

ศึกษาการกระจายกำลังไมโครเวฟมีผลต่อการอบแห้งของผักแต่้ไหมอีรี ด้วยการทดลองกำลังไมโครเวฟภายในห้องอบแห้ง 18 ตำแหน่ง สามารถคำนวณค่ากำลังไมโครเวฟได้ดังแสดงดังตาราง 4.2

ตาราง 0.2 กำลังไมโครเวฟดูดซับที่ตำแหน่งต่างๆ ในห้องอบไมโครเวฟ

กำลัง ไมโครเวฟ (วัตต์)	ตำแหน่ง	อุณหภูมิ อากาศร้อน (องศาเซลเซียส)		กำลัง ไมโครเวฟ (วัตต์)	กำลัง ไมโครเวฟ (วัตต์)	ตำแหน่ง	อุณหภูมิ อากาศร้อน (องศาเซลเซียส)		กำลัง ไมโครเวฟ(วัตต์)
		ก่อน	หลัง				ก่อน	หลัง	
	1	28.5	47.5	132		1	28.7	55.1	184
	2	29.5	46.2	116		2	28.7	60.1	219
	3	29.7	46.1	114		3	28.4	56.5	196
	4	29.2	45.0	110		4	28.5	54.1	178
	5	28.9	49.2	141		5	28.4	56.0	192
	6	28.9	47.2	128		6	28.2	57.2	202
	7	28.9	39.8	76		7	28.0	45.0	118
	8	28.8	45.5	116		8	28.3	59.6	218
	9	28.6	44.2	109		9	28.0	53.7	179
300	10	28.6	44.3	109	450	10	28.1	54.7	185
	11	28.5	47.9	135		11	28.1	58.1	209
	12	28.4	43.3	104		12	28.1	53.9	180
	13	28.5	43.2	102		13	28.8	53.9	175
	14	28.6	44.3	109		14	28.3	53.7	177
	15	28.5	43.9	107		15	28.4	58.1	207
	16	28.4	43.6	106		16	28.5	54.7	183
	17	28.8	48.4	137		17	28.5	55.9	191
	18	28.1	44.0	111		18	28.6	55.2	186

ตาราง 4.3 ผลการทดลองค่าของกำลังไมโครเวฟเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงมวลน้ำที่ดูดซับ (ต่อ)

แรงดันไฟฟ้า (โวลต์)	ปริมาณน้ำ (ลูกบาศก์ เซนติเมตร)	เวลา (นาทิจ)	อุณหภูมิน้ำ (องศาเซลเซียส)		น้ำหนักของน้ำ (กรัม)		กำลังไมโครเวฟ (วัตต์)			รวม (วัตต์)
			ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	น้ำดูดซับ	น้ำระเหย	บีกเกอร์	
250	150	1	27	92	120	118	239	76	51	366
		2	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
		3	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	250	1	29	53	336	336	405	21	29	455
		2	28	83	338	337	451	37	32	519
		3	27	96	337	329	381	102	27	510

N/A คือ ไม่สามารถวัดค่ากำลังไมโครเวฟได้

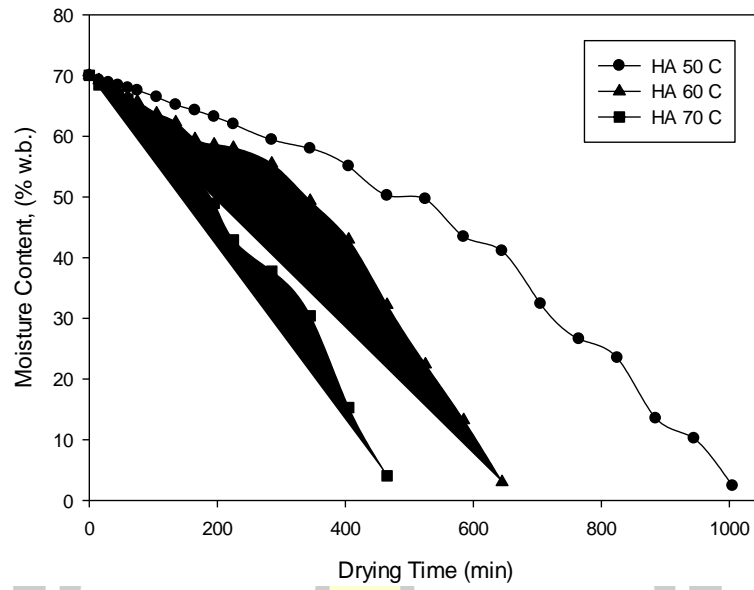
ตาราง 4.3 พบว่ากำลังไมโครเวฟจะเปลี่ยนแปลงไปตามแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายให้แมกนีตรอน โดยการจ่ายแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่สูงแมกนีตรอนจะสามารถสร้างคลื่นไมโครเวฟได้มากทำให้ค่ากำลังไมโครเวฟสูง เพราะไมโครเวฟมีหลักการทำงานด้วยความต่างศักย์ของไฟฟ้า ส่วนปริมาณน้ำในการดูดซับพลังงานไมโครเวฟที่ภายใต้กำลังไมโครเวฟเท่ากัน ปริมาณน้ำที่มากกว่าจะสามารถดูดซับกำลังไมโครเวฟได้มากกว่าปริมาณน้ำที่น้อย เนื่องจากไมโครเวฟสร้างความร้อนจากโมเลกุลของน้ำและเวลาให้ความร้อน พบว่าการให้ความร้อนที่นานจะทำให้ น้ำสามารถดูดซับพลังงานได้มาก แต่ที่ กำลังไมโครเวฟที่สูงจะทำให้ น้ำดูดซับได้มากทำให้ น้ำเดือด และระเหยอย่างรวดเร็ว

ตาราง 4.3 ได้เลือกการทดลองหาค่ากำลังไมโครเวฟโดยใช้น้ำ 150 ลูกบาศก์เซนติเมตร ให้ความร้อนนาน 1 นาที เป็นค่าที่เหมาะสมในการหาค่ากำลังไมโครเวฟเพราะใช้เวลาที่น้อย

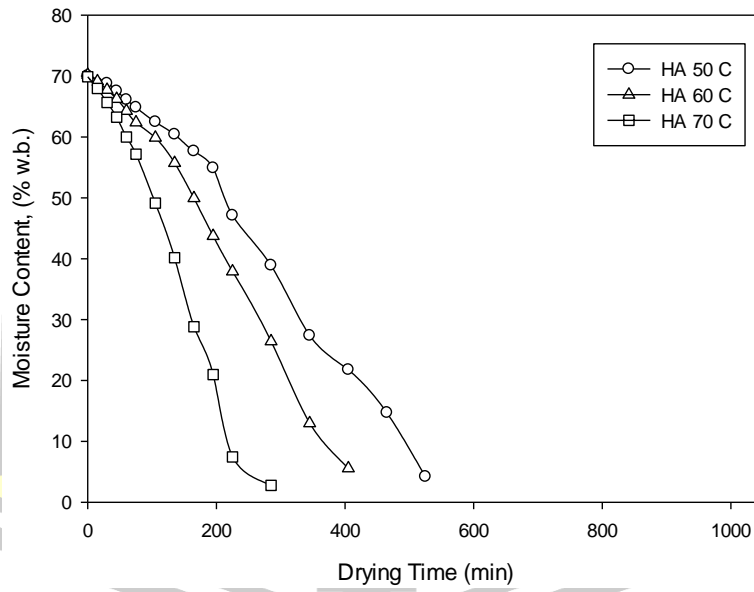
4.2 ผลการศึกษาอบแห้งผักต้มไหมอีรีด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน

4.2.1 ผลการศึกษากการทดลองที่ 1 อบแห้งผักต้มไหมอีรีด้วยอากาศร้อนเพียงอย่างเดียว

ผลการทดลองอบแห้งผักต้มไหมอีรี เพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิอากาศร้อนและความเร็วลมที่ใช้ในการอบแห้งผักต้มไหมอีรี การลดลงของความชื้น ดังแสดงในภาพประกอบ 4.1 และการลดลงของอัตราส่วนความชื้น ดังแสดงในภาพประกอบ 4.2

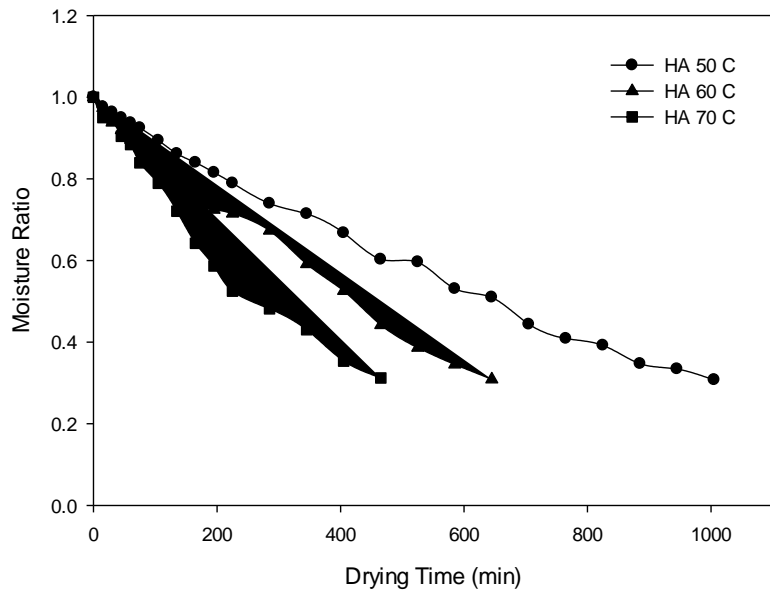


(ก) ความเร็วลม 0.5 เมตรต่อวินาที

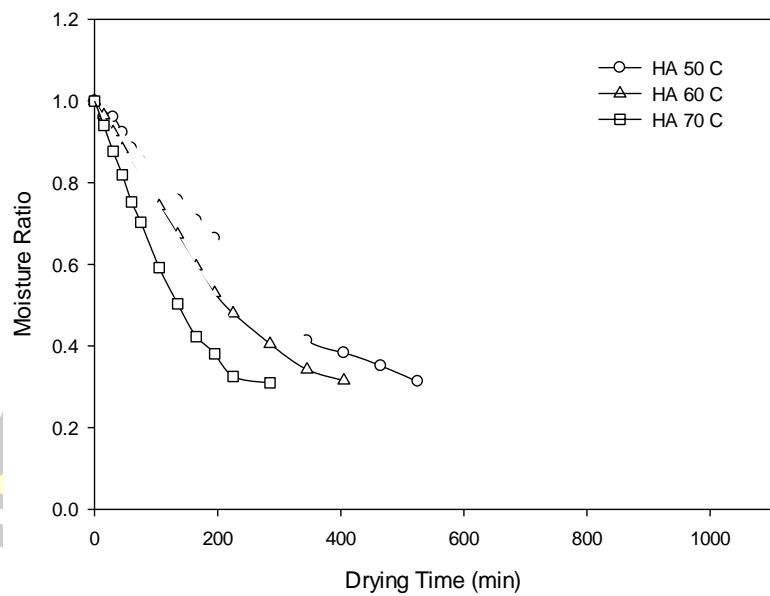


(ข) ความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที

ภาพประกอบ 0.1 ปริมาณความชื้นดั้งเดิมอีรีในระหว่างการอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่ อุณหภูมิต่าง ๆ



(ก) ความเร็วลม 0.5 เมตรต่อวินาที



(ข) ความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที

ภาพประกอบ 0.2 ปริมาณอัตราส่วนความชื้นตักแต่ใหม่อีรีในระหว่างการอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่ อุณหภูมิต่าง ๆ

ภาพประกอบ 4.1 และ ภาพประกอบ 4.2 พบว่า การเปลี่ยนแปลงความชื้นและอัตราส่วนความชื้นของดักแด่ไหมอีรี่กับระยะเวลาการอบแห้งที่อุณหภูมิอากาศร้อน 3 ระดับ คือ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส และความเร็วลม 2 ระดับ 0.5 และ 1.0 เมตรต่อวินาที ที่ทำการอบแห้งดักแด่ไหมอีรี่ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 72 ฐานเปียก อบจนกระทั่งความชื้นสุดท้ายดักแด่ไหมอีรี่ประมาณร้อยละ 10 ฐานเปียก อัตราการระเหยของน้ำเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิอากาศร้อนและความเร็วของอากาศสูงขึ้น โดยปริมาณอากาศและอุณหภูมิอากาศเพิ่มขึ้นทำให้ความสามารถในการดูดซับไอน้ำของอากาศเพิ่มขึ้น (Putra and Ajiwiguna, 2017) ความชื้นและอัตราส่วนความชื้นดักแด่ไหมอีรี่จะลดลงอย่างต่อเนื่องในระหว่างการอบแห้ง และเวลาการอบแห้งจะลดลงเมื่ออุณหภูมิอบแห้งเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากผลต่างของอุณหภูมิอากาศร้อนสูงกว่าจะทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนจากอากาศร้อนไปยังดักแด่ไหมอีรี่สูงกว่าเพื่อใช้ในการระเหยน้ำภายในดักแด่ไหมอีรี่ได้มากกว่า ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการอบแห้งดักแด่ไหมอีรี่ช่วงการอบแห้งแบบลดลงผิวภายนอกของดักแด่ไหมอีรี่จะไม่อึดตัว อัตราการอบแห้งจะถูกควบคุมการแพร่ด้วยการส่งถ่ายมวลความชื้นภายในตัวดักแด่ไหมอีรี่ การลดลงของเวลาในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ด้วยการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอากาศร้อนได้รับการรายงานจากนักวิจัยสำหรับการอบแห้งด้วยอากาศร้อน เช่น มันฝรั่งแผ่น (Amjad, Crichton, Munir, Hensel, & Sturm, 2018; Doymaz, 2007) พักทองแผ่น (Doymaz, 2007)

อย่างไรก็ตาม ผลค่าสีดักแด่ไหมอีรี่อบแห้งด้วยอากาศร้อนเพียงอย่างเดียว ไม่สามารถแยกความต่างของดักแด่ไหมอีรี่ที่ผ่านการอบแห้งด้วยการเปรียบเทียบกับสายตา ดังแสดงภาพประกอบ 4.2 ดังนั้นค่าสีดักแด่ไหมอีรี่อบแห้ง เราสามารถบอกความแตกต่างได้จากการวัดค่าสี





(ก) อุณหภูมิอากาศร้อน 50 องศาเซลเซียส
ความเร็วลม 0.5 เมตรต่อวินาที



(ข) อุณหภูมิอากาศร้อน 50 องศาเซลเซียส
ความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที



(ค) อุณหภูมิอากาศร้อน 60 องศาเซลเซียส
ความเร็วลม 0.5 เมตรต่อวินาที



(ง) อุณหภูมิอากาศร้อน 60 องศาเซลเซียส
ความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที



(จ) อุณหภูมิอากาศร้อน 70 องศาเซลเซียส
ความเร็วลม 0.5 เมตรต่อวินาที



(ฉ) อุณหภูมิอากาศร้อน 70 องศาเซลเซียส
ความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที

ภาพประกอบ 0.3 ภาพตัดต่อใหม่อีกรอบหนึ่งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิและความเร็วลมต่างๆ

คุณภาพสีดักแด่ใหม่อีรีหลังการอบแห้งด้วยอากาศร้อนเพียงอย่างเดียว วัดด้วยเครื่องวัดสีในระบบ CIE โดยค่า L^* , a^* และ b^* ข้อมูลที่วัดได้ถูกนำไปคำนวณทางสถิติโดยใช้โปรแกรม spss วิเคราะห์ความแปรปรวน (Anova) และเปรียบเทียบความต่างด้วย Duncan's test โดยพิจารณาความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญไม่เกิน 5 % ผลการวัดสีแสดงดังตาราง 4.4

ตาราง 0.4 ค่าสีดักแด่ใหม่อีรีอบแห้งด้วยอากาศร้อนเพียงอย่างเดียว

ความเร็วลม (เมตรต่อวินาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	L^{*ns}	a^*	b^*
0.5	50	17.51±0.99	6.20±0.62a	5.96±0.93b
	60	17.51±0.79	5.96±0.27ab	5.56±0.54ab
	70	17.27±0.72	5.29±0.67b	5.20±0.80ab
1	50	17.34±0.58	5.79±0.53ab	5.57±0.55ab
	60	17.24±1.25	5.05±0.88a	5.36±1.51ab
	70	17.12±0.86	5.01±0.65ab	5.34±0.95a

ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วย a,b ในแถวเดียวกันที่ต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $p < 0.05$ ns คือ ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

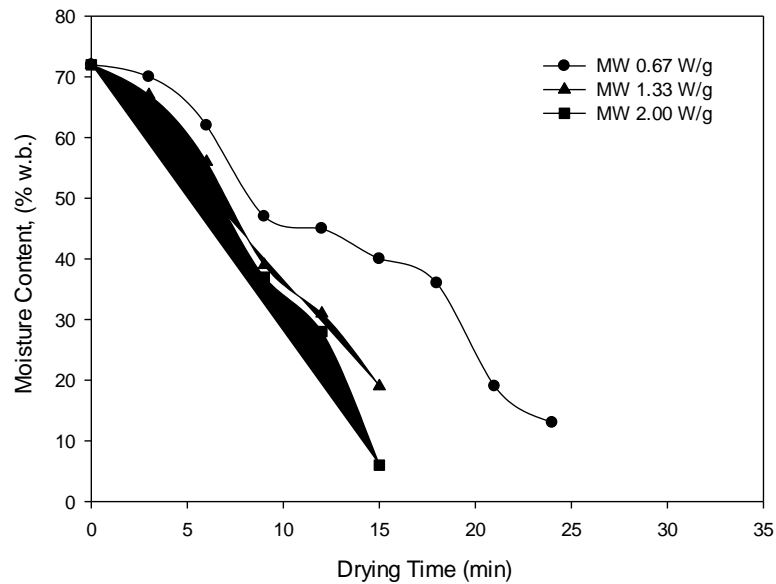
ตาราง 4.4 พบว่า การอบแห้งที่ดักแด่ใหม่อีรีที่อุณหภูมิอากาศร้อน 3 ระดับ คือ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส และความเร็วลม 2 ระดับ คือ 0.5 และ 1.0 เมตรต่อวินาที ภายหลังจากอบแห้งดักแด่ใหม่อีรีค่า L^* ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ แต่มีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิอากาศร้อนอบแห้งมีค่าเพิ่มขึ้น ค่า a^* และค่า b^* มีความแตกต่างกันทางสถิติ โดยค่า a^* มีแนวโน้มลดลงเมื่อความเร็วลมและอุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากดักแด่ใหม่อีรีได้รับอุณหภูมิอากาศร้อนสูงใช้เวลาการอบแห้งสั้นลง ส่งผลทำให้สีของดักแด่ใหม่อีรีเข้มขึ้นหรือไหม้คล้ำ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยอบแห้งที่ได้รายงานผลการเปลี่ยนแปลงของสี เช่น ใบดำแย (Alibas, 2007)

4.2.2 ผลการทดลองที่ 2 ปัจจัยที่มีผลในการอบแห้งดักแด่ใหม่อีรีด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน

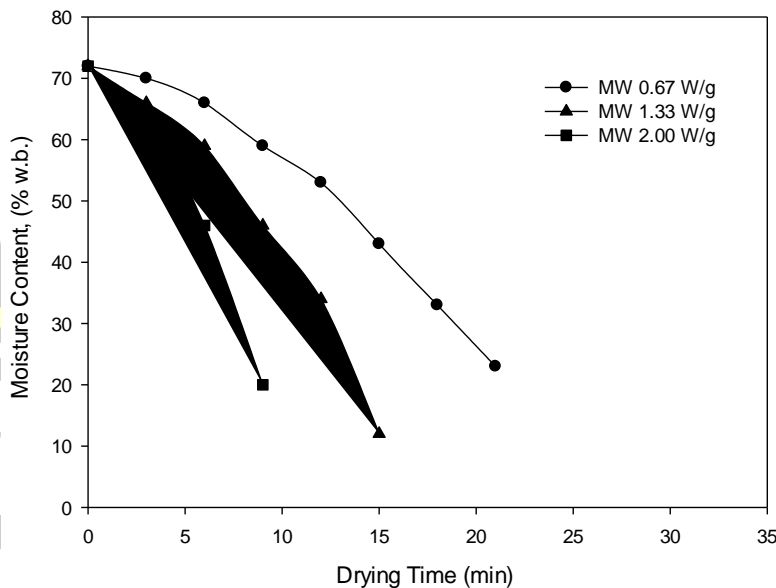
1) การศึกษาอิทธิพลความหนาแน่นไมโครเวฟที่มีผลต่อการอบแห้งดักแด่ใหม่อีรีด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน

ผลการอบแห้งดักแด่ใหม่อีรีด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน เพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยความเร็วลม ความหนาแน่นของไมโครเวฟ โดยอบแห้งดักแด่ใหม่ที่ความชื้นเริ่มต้น ร้อยละ 72 ฐานเปียก

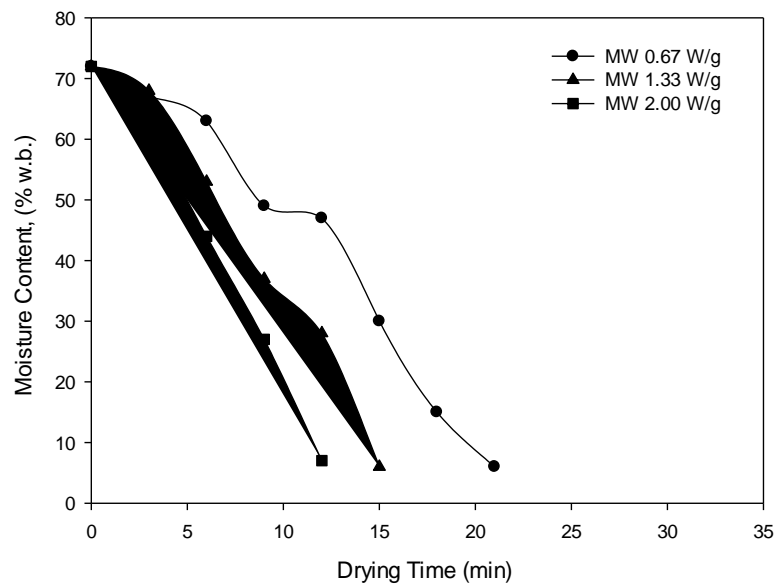
จนกระทั่งความชื้นสุดท้ายเท่ากับร้อยละ 10 ฐานเปียก แสดงการลดลงของปริมาณความชื้น ดังภาพประกอบ 4.4 และภาพประกอบ 4.6 และการลดลงของอัตราส่วนความชื้น ดังภาพประกอบ 4.5 และภาพประกอบ 4.7



(ก) อุณหภูมิอากาศร้อน 50 องศาเซลเซียส

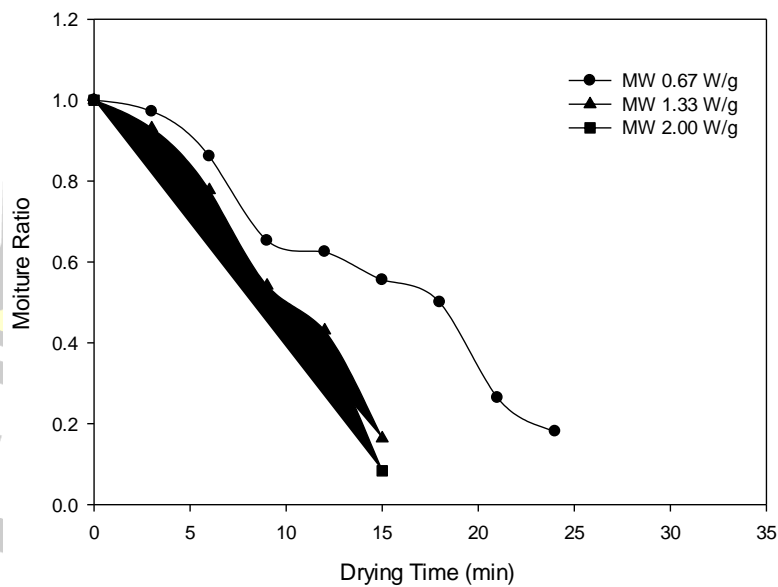


(ข) อุณหภูมิอากาศร้อน 60 องศาเซลเซียส

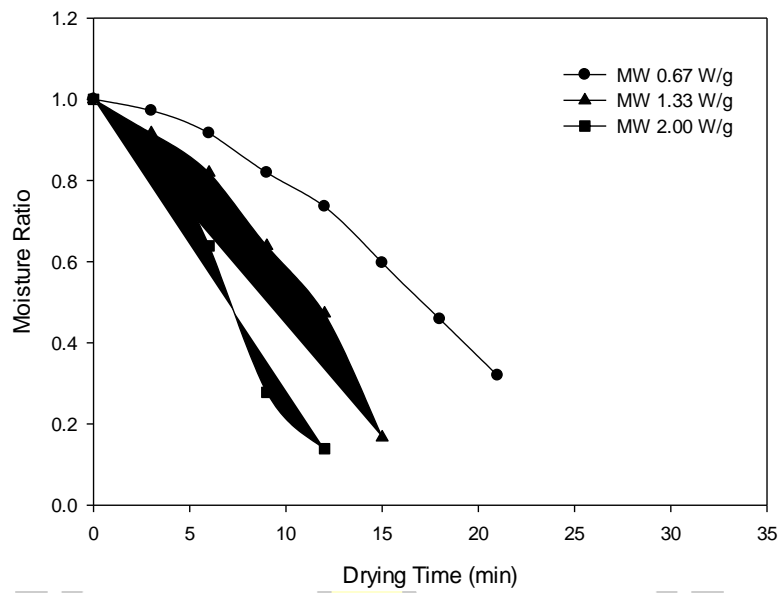


(ค) อุณหภูมิอากาศร้อน 70 องศาเซลเซียส

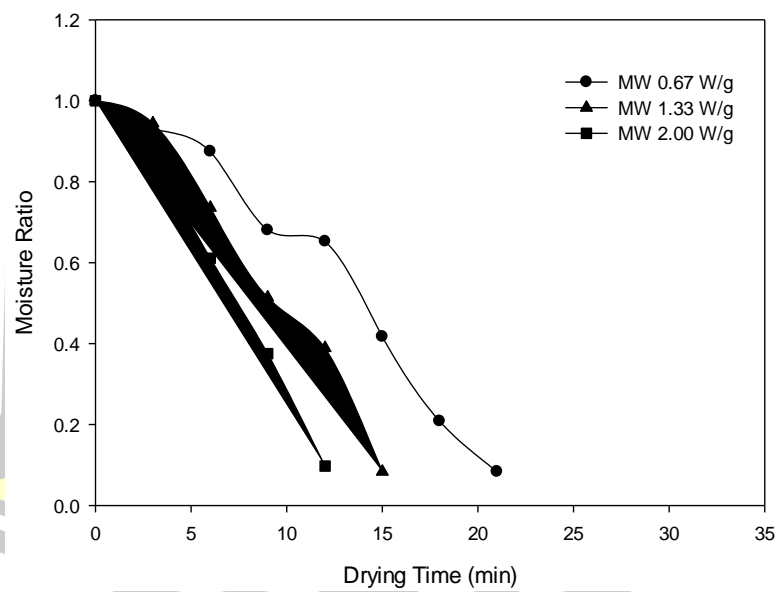
ภาพประกอบ 0.4 ปริมาณความชื้นผักแต่ใหม่อีรีในระหว่างการอบแห้งด้วยไมโครเวฟความหนาแน่นต่างกับร่วมกับอากาศร้อนอุณหภูมิต่างๆ ที่ความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที



(ก) อุณหภูมิอากาศร้อน 50 องศาเซลเซียส

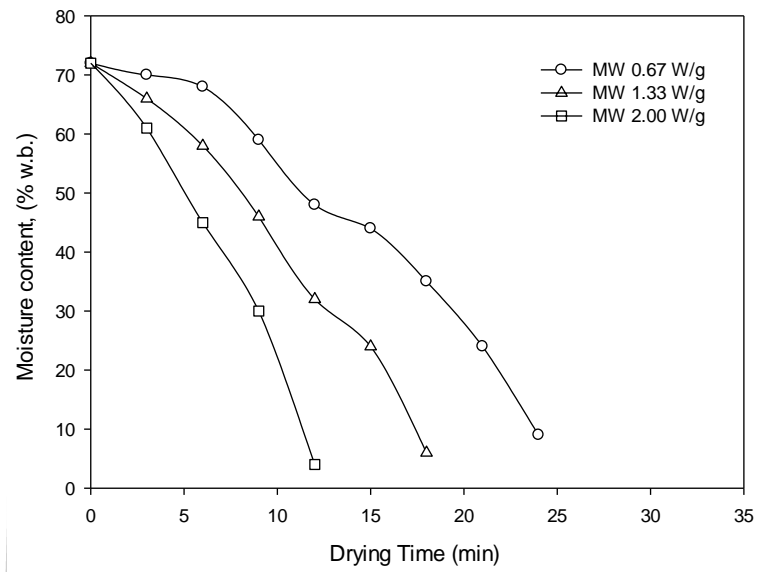


(ข) อุณหภูมิอากาศร้อน 60 องศาเซลเซียส

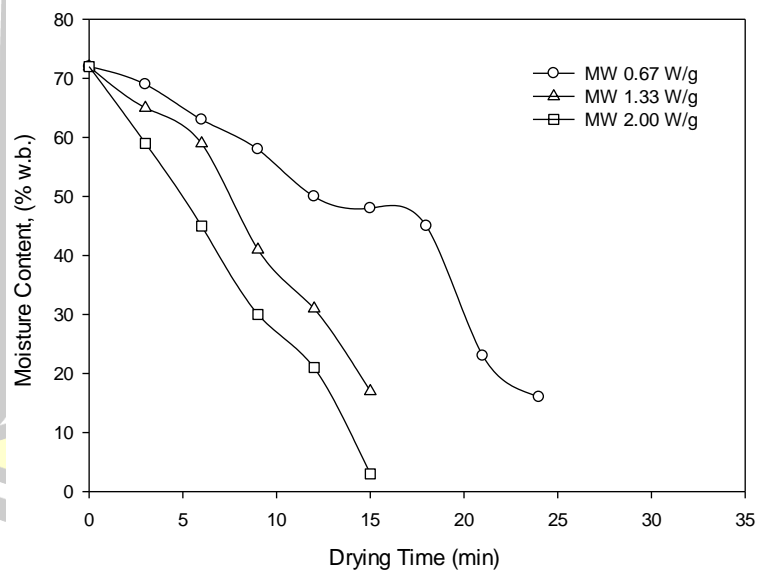


(ค) อุณหภูมิอากาศร้อน 70 องศาเซลเซียส

ภาพประกอบ 0.5 ปริมาณอัตราส่วนความชื้นตักแต่ใหม่อีรีในระหว่างการอบแห้งด้วยไมโครเวฟความหนาแน่นต่างกันร่วมกับอากาศร้อนอุณหภูมิต่างๆ ที่ความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที

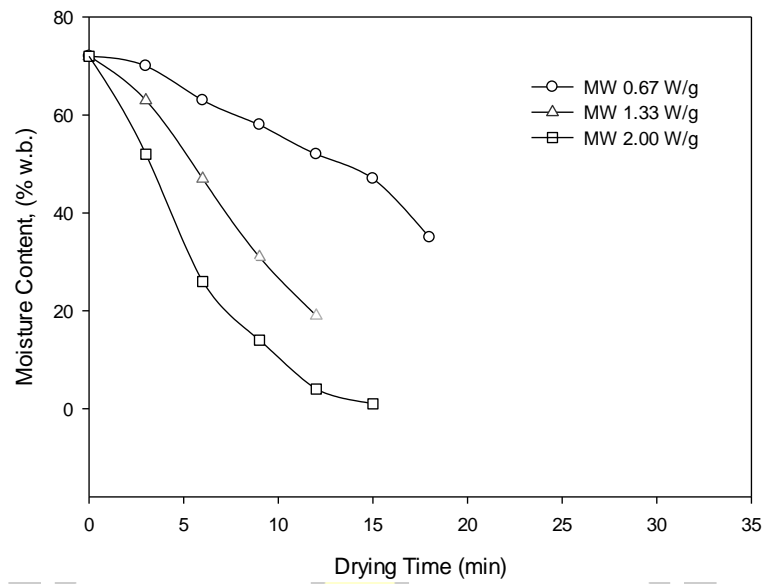


(ก) อุณหภูมิอากาศร้อน 50 องศาเซลเซียส



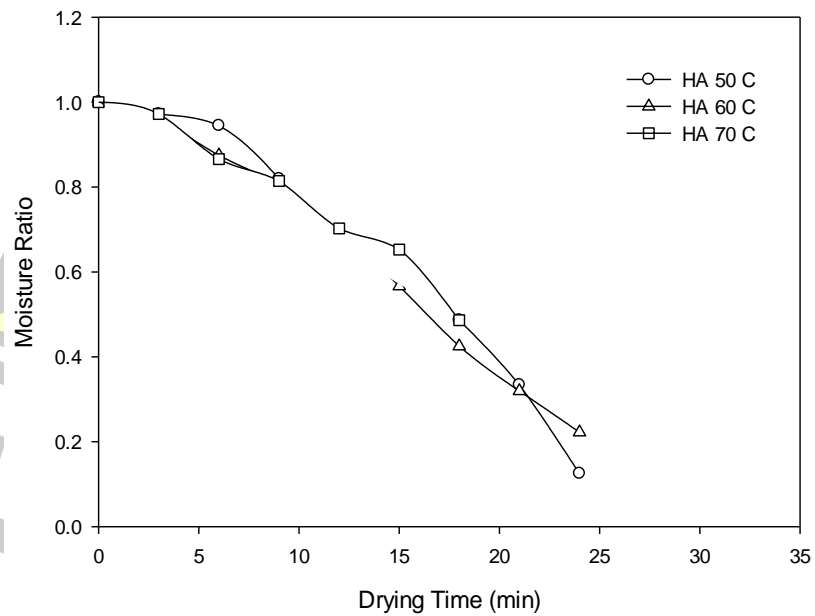
(ข) อุณหภูมิอากาศร้อน 60 องศาเซลเซียส

พหุบัณฑิตวิทยา

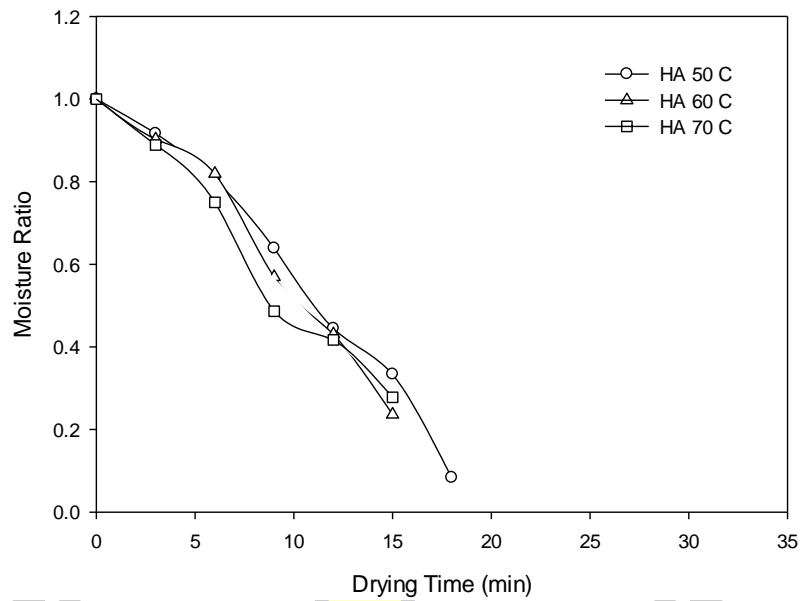


(ค) อุณหภูมิอากาศร้อน 70 องศาเซลเซียส

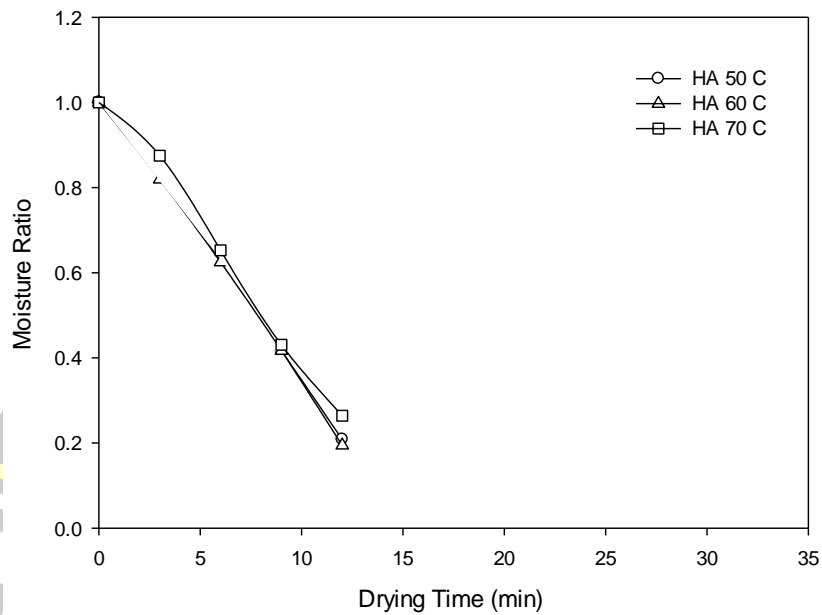
ภาพประกอบ 0.6 ปริมาณความชื้นตกแต่ใหม่อีรีในระหว่างการอบแห้งด้วยไมโครเวฟความหนาแน่นแตกต่างกัน ร่วมกับอากาศร้อนอุณหภูมิต่างๆ ที่ความเร็วลม 2.0 เมตรต่อวินาที



(ก) อุณหภูมิอากาศร้อน 50 องศาเซลเซียส



(ข) อุณหภูมิอากาศร้อน 60 องศาเซลเซียส



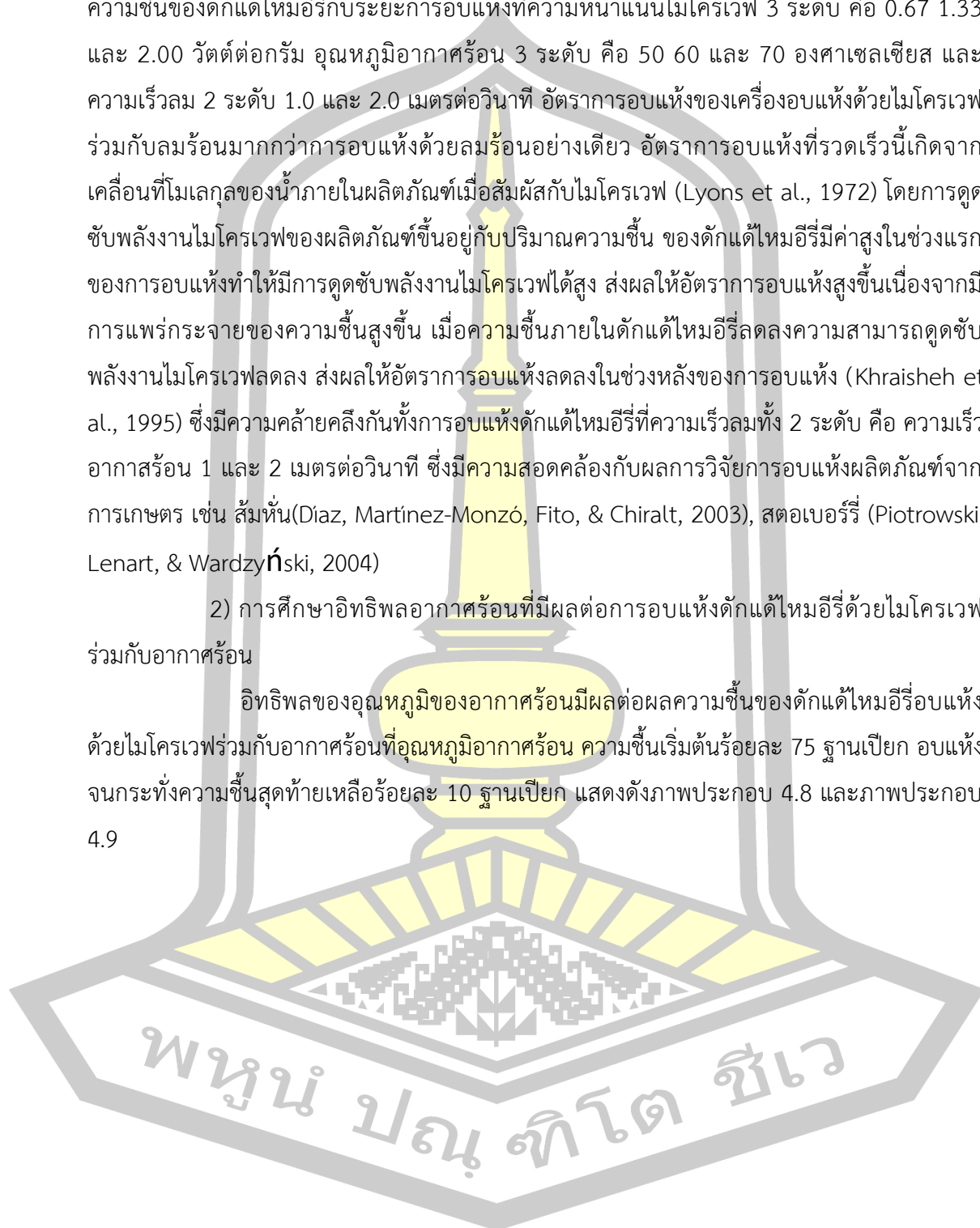
(ค) อุณหภูมิอากาศร้อน 70 องศาเซลเซียส

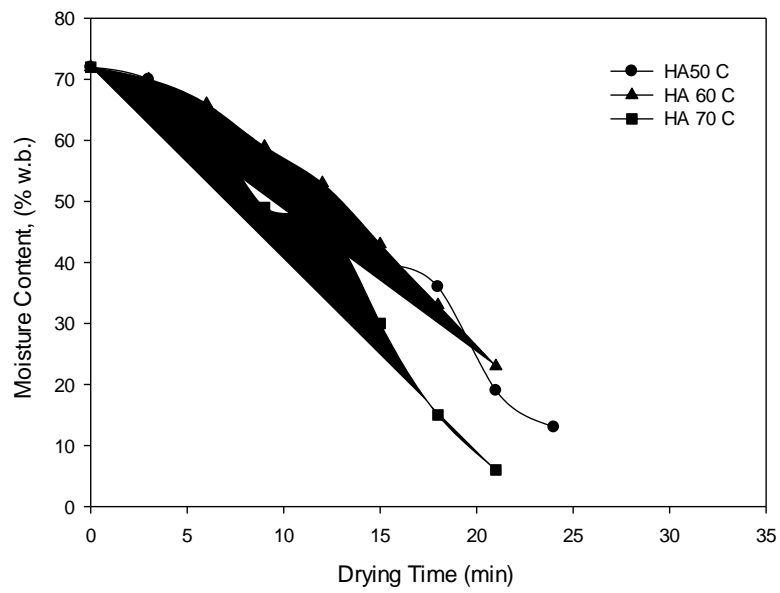
ภาพประกอบ 0.7 ปริมาณอัตราส่วนความชื้นตกแต่ใหม่อีรีในระหว่างการอบแห้งด้วยไมโครเวฟ ความหนาแน่นแตกต่างกัน ร่วมกับอากาศร้อนอุณหภูมิต่างๆ ที่ความเร็วลม 2.0 เมตรต่อวินาที

จากภาพประกอบ 4.4 ถึง 4.7 พบว่าการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอัตราส่วนความชื้นของผักแต่ใหม่อิตาลีกับระยะเวลาอบแห้งที่ความหนาแน่นไมโครเวฟ 3 ระดับ คือ 0.67 1.33 และ 2.00 วัตต์ต่อกรัม อุณหภูมิอากาศร้อน 3 ระดับ คือ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส และความเร็วลม 2 ระดับ 1.0 และ 2.0 เมตรต่อวินาที อัตราการอบแห้งของเครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนมากกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนอย่างเดียว อัตราการอบแห้งที่รวดเร็วนี้เกิดจากเคลื่อนที่โมเลกุลของน้ำภายในผลิตภัณฑ์เมื่อสัมผัสกับไมโครเวฟ (Lyons et al., 1972) โดยการดูดซับพลังงานไมโครเวฟของผลิตภัณฑ์ขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้น ของผักแต่ใหม่อิตาลีมีค่าสูงในช่วงแรกของการอบแห้งทำให้มีการดูดซับพลังงานไมโครเวฟได้สูง ส่งผลให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้นเนื่องจากการแพร่กระจายของความชื้นสูงขึ้น เมื่อความชื้นภายในผักแต่ใหม่อิตาลีลดลงความสามารถดูดซับพลังงานไมโครเวฟลดลง ส่งผลให้อัตราการอบแห้งลดลงในช่วงหลังของการอบแห้ง (Khrasheh et al., 1995) ซึ่งมีความคล้ายคลึงกันทั้งการอบแห้งผักแต่ใหม่ที่ความเร็วลมทั้ง 2 ระดับ คือ ความเร็วอากาศร้อน 1 และ 2 เมตรต่อวินาที ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการวิจัยการอบแห้งผลิตภัณฑ์จากการเกษตร เช่น ส้มหั่น (Diaz, Martínez-Monzó, Fito, & Chiralt, 2003), สตอเบอร์รี่ (Piotrowski, Lenart, & Wardzyński, 2004)

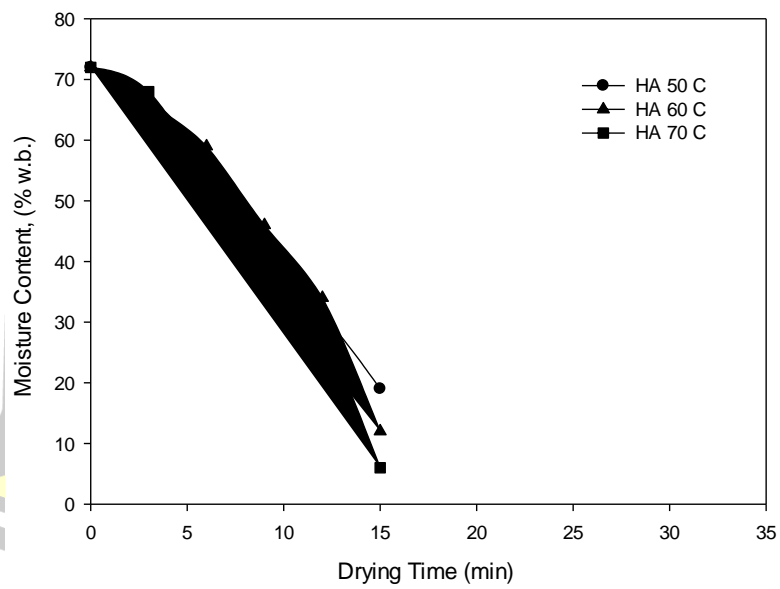
2) การศึกษาอิทธิพลของอากาศร้อนที่มีผลต่อการอบแห้งผักแต่ใหม่อิตาลีด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน

อิทธิพลของอุณหภูมิของอากาศร้อนมีผลต่อผลความชื้นของผักแต่ใหม่อิตาลีอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อนที่อุณหภูมิอากาศร้อน ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 75 ฐานเปียก อบแห้งจนกระทั่งความชื้นสุดท้ายเหลือร้อยละ 10 ฐานเปียก แสดงดังภาพประกอบ 4.8 และภาพประกอบ 4.9



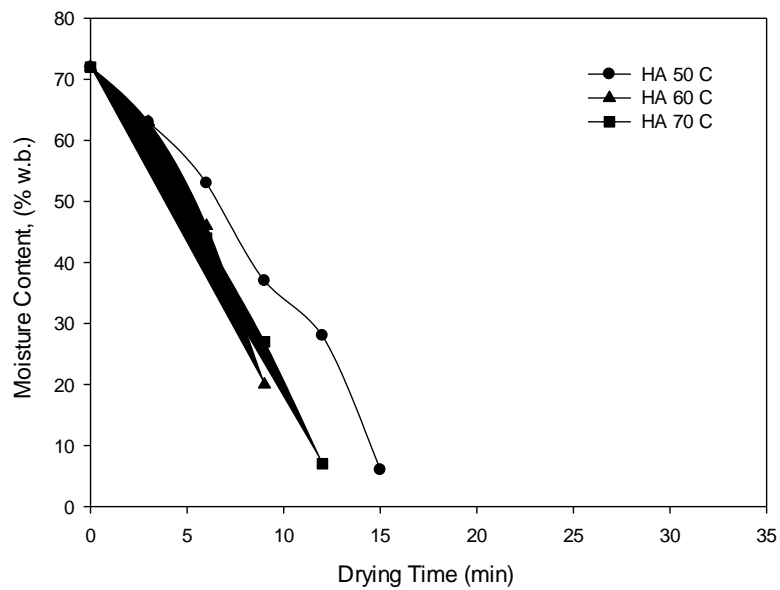


(ก) ความหนาแน่นไมโครเวฟ 0.67 วัตต์ต่อกรัม



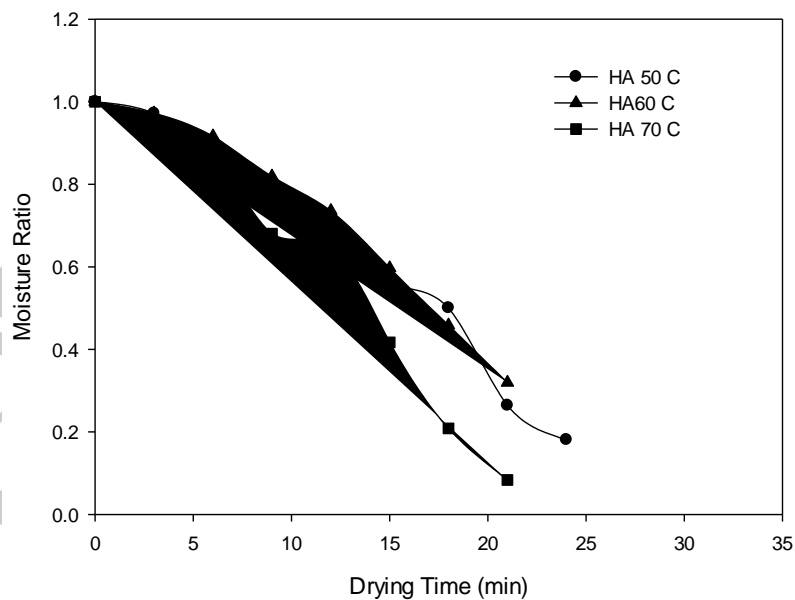
(ข) ความหนาแน่นไมโครเวฟ 1.33 วัตต์ต่อกรัม

พหุ ประสิทธิภาพ

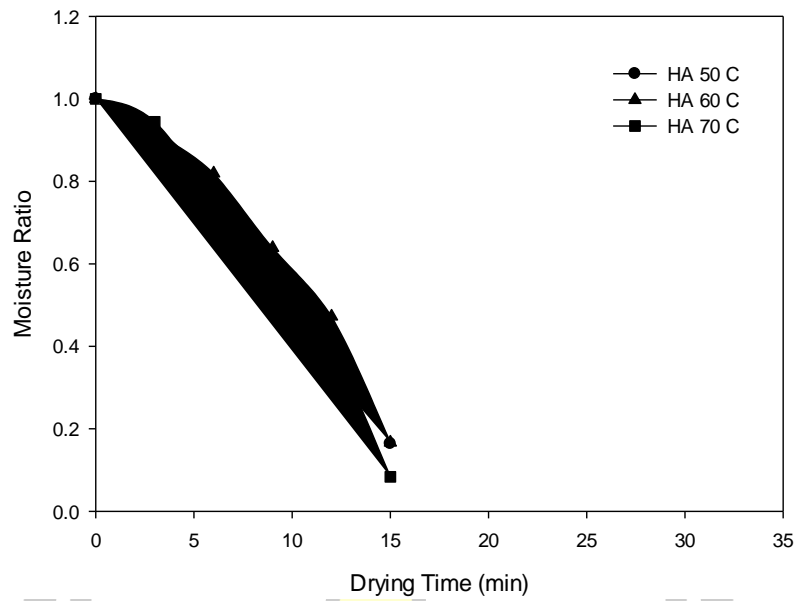


(ค) ความหนาแน่นไมโครเวฟ 2.00 วัตต์ต่อกรัม

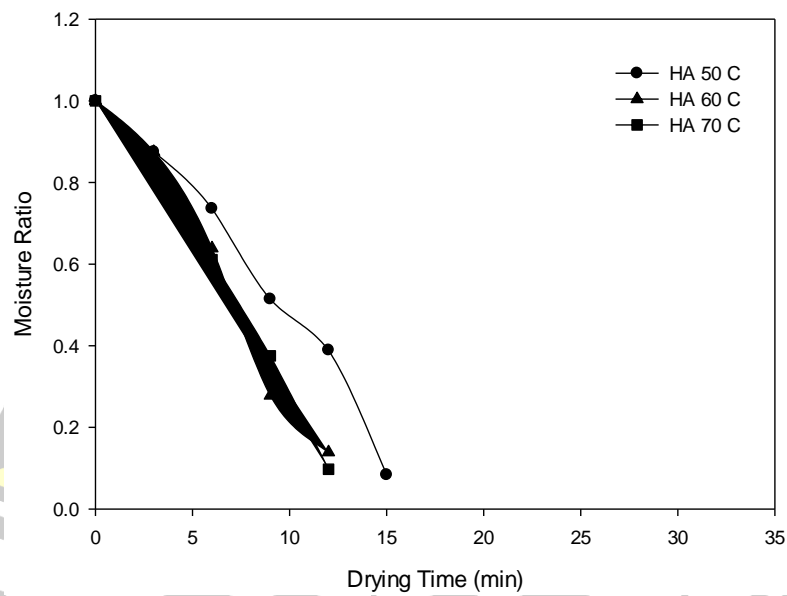
ภาพประกอบ 0.8 ปริมาณความชื้นตกแต่ใหม่อีรีในระหว่างการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อนอุณหภูมิต่างๆ ที่ความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที



(ก) ความหนาแน่นไมโครเวฟ 0.67 วัตต์ต่อกรัม



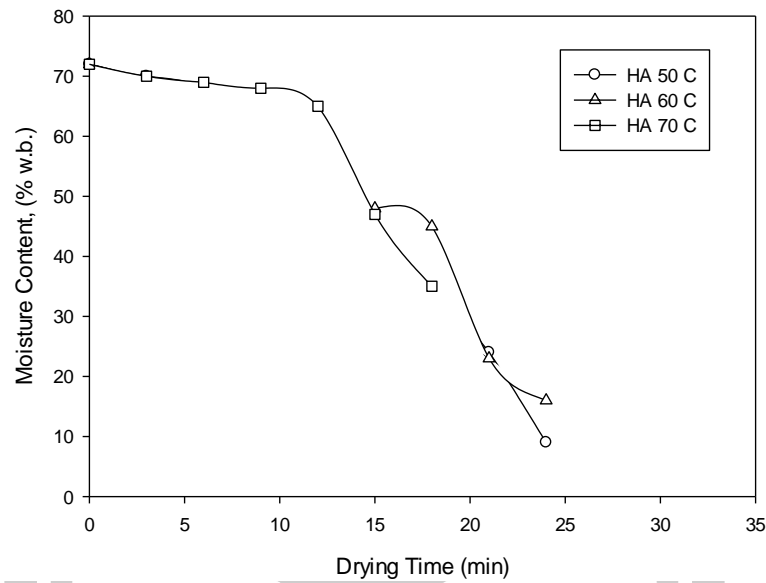
(ข) ความหนาแน่นไมโครเวฟ 1.33 วัตต์ต่อกรัม



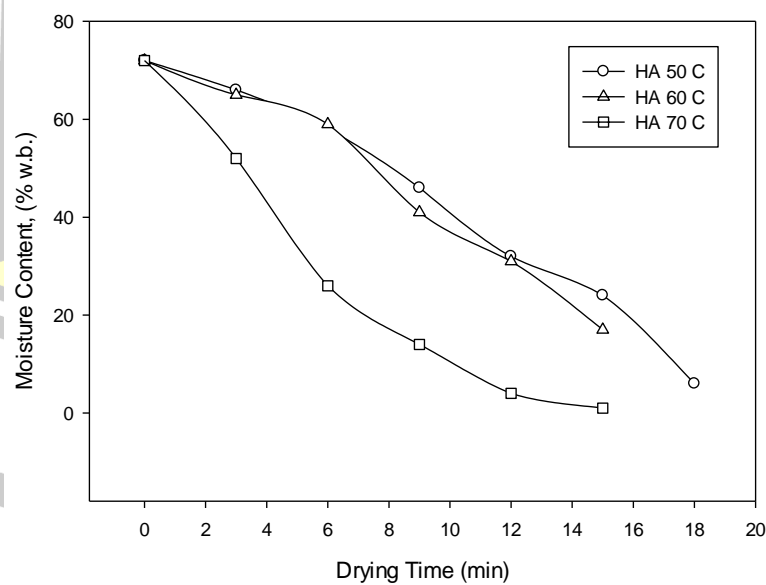
(ค) ความหนาแน่นไมโครเวฟ 2.00 วัตต์ต่อกรัม

ภาพประกอบ 0.9 ปริมาณอัตราส่วนความชื้นตกแต่ใหม่อีรีในระหว่างการอบแห้งด้วยไมโครเวฟ
ร่วมกับอากาศร้อนอุณหภูมิต่างๆ ที่ความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที

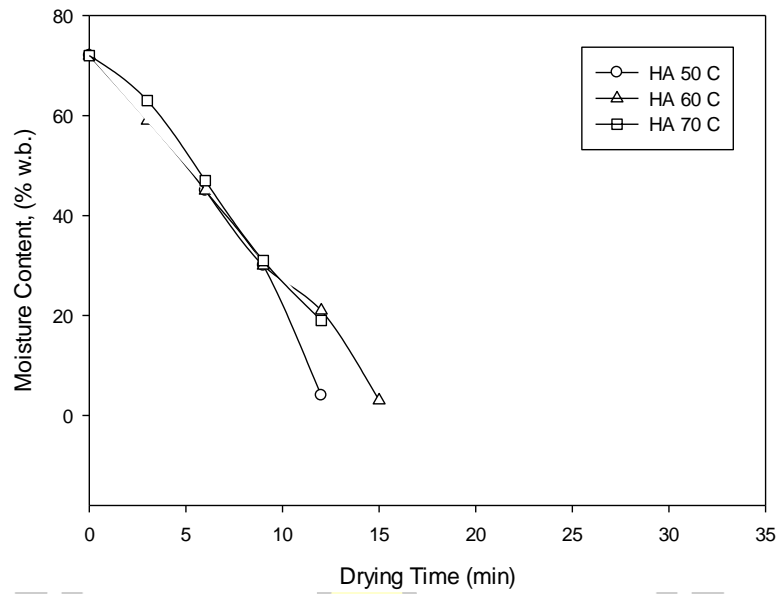
อิทธิพลของอุณหภูมิของอากาศร้อนมีผลต่อผลความชื้นของผักแต่ใหม่อีร็อบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อนที่ความเร็วเริ่มต้น 2.0 เมตรต่อวินาที ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 75 ฐานเปียก อบแห้งจนกระทั่งความชื้นสุดท้ายเหลือร้อยละ 10 ฐานเปียก แสดงดังภาพประกอบ 4.10 และภาพประกอบ 4.11



(ก) ความหนาแน่นไมโครเวฟ 0.67 วัตต์ต่อกรัม

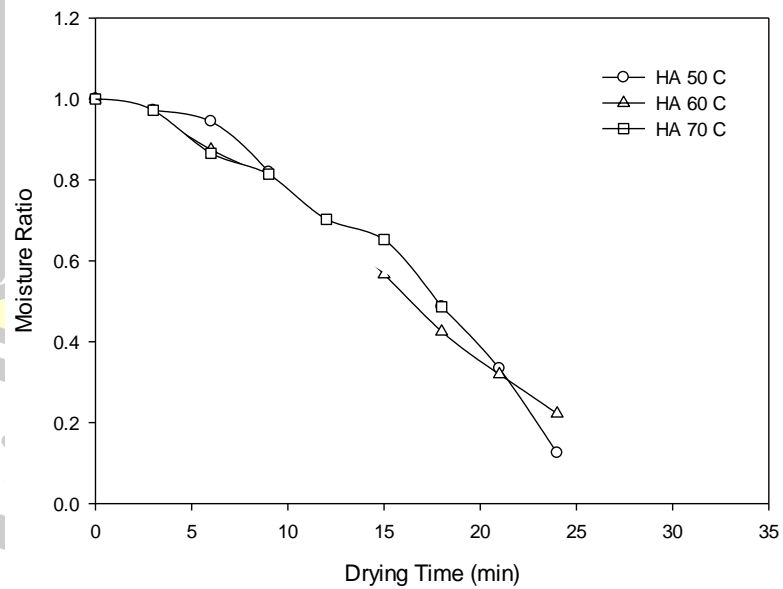


(ข) ความหนาแน่นไมโครเวฟ 1.33 วัตต์ต่อกรัม

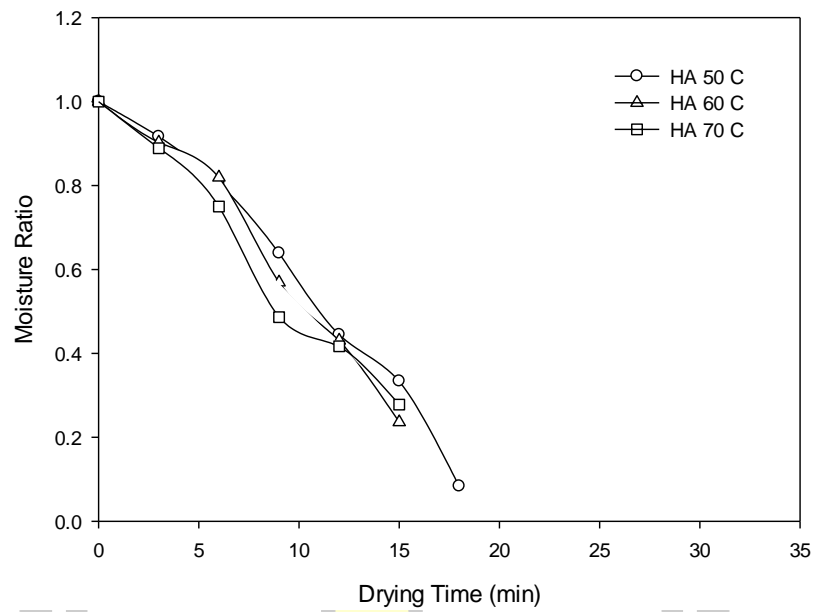


(ค) ความหนาแน่นไมโครเวฟ 2.00 วัตต์ต่อกรัม

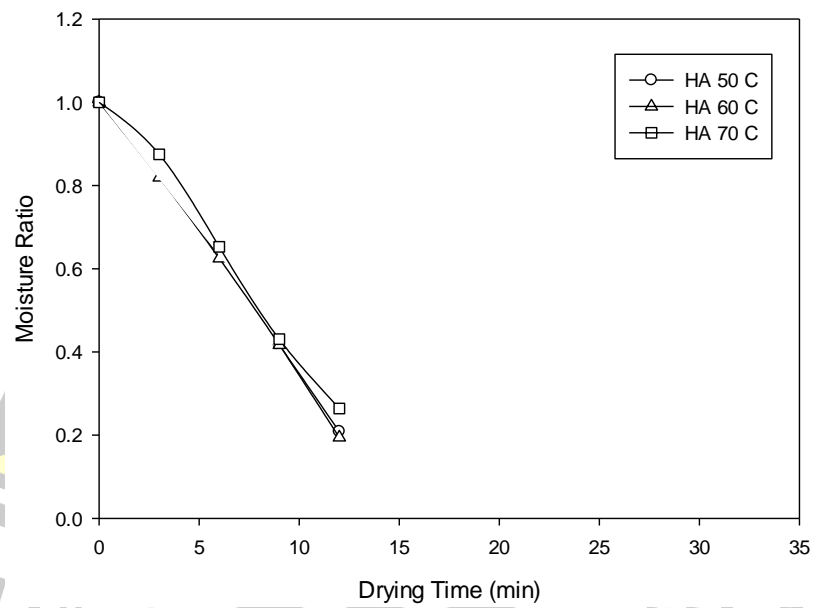
ภาพประกอบ 0.10 ปริมาณความชื้นตกแต่ไหมอีรีในระหว่างการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อนอุณหภูมิต่างๆ ที่ความเร็วลม 2.0 เมตรต่อวินาที



(ก) ความหนาแน่นไมโครเวฟ 0.67 วัตต์ต่อกรัม



(ข) ความหนาแน่นไมโครเวฟ 1.33 วัตต์ต่อกรัม



(ค) ความหนาแน่นไมโครเวฟ 2.00 วัตต์ต่อกรัม

ภาพประกอบ 0.11 ปริมาณอัตราส่วนความชื้นผักไผ่ใหม่อีรีในระหว่างการอบแห้งด้วยไมโครเวฟ ร่วมกับอากาศร้อนอุณหภูมิต่างๆ ที่ความเร็วลม 2.0 เมตรต่อวินาที

จากภาพประกอบ 4.10 และภาพประกอบ 4.11 พบว่า การเปลี่ยนแปลงความชื้นและอัตราส่วนความชื้นของตัวอย่างดักแด้ไหมอีรี่กับเวลาการอบแห้งที่ภายใต้สภาวะการอบแห้งที่ดักแด้ไหมอีรี่ด้วยความหนาแน่นไมโครเวฟ 3 ระดับ คือ 0.67 1.33 และ 2.00 วัตต์ต่อกรัม ร่วมกับอากาศร้อน 3 ระดับ คือ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 2 ระดับ คือ 1.0 และ 2.0 เมตรต่อวินาที ดังแสดงในภาพประกอบ 4.5 และ 4.6 พบว่า การอบแห้งด้วยไมโครเวฟจะส่งถ่ายไออนความชื้นจากภายในไปยังผิวหน้าด้านนอกของผลิตภัณฑ์เช่นเดียวกับการอบแห้งด้วยการพาอากาศร้อน (Maskan, 2001) เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการอบแห้งด้วยไมโครเวฟกับการอบแห้งด้วยการพาอากาศร้อน การอบแห้งด้วยไมโครเวฟสามารถช่วยลดระยะเวลาในการอบแห้ง (Ali et al., 2016) ซึ่งจะเห็นได้ว่าไมโครเวฟมีอิทธิพลต่อการอบแห้งดักแด้ไหมอีรี่มากกว่าอุณหภูมิของอากาศร้อน

จากการอบแห้งดักแด้ไหมอีรี่ความหนาแน่นไมโครเวฟ 2.00 วัตต์ต่อกรัม พบว่าดักแด้ไหมอีรี่ภายหลังการอบแห้ง สังเกตด้วยสายตาดักแด้ไหมอีรี่จะมีสีดำคล้ำ ดังแสดงในภาพที่ 4.7 เนื่องจากที่ความหนาแน่นไมโครเวฟสูงจะปลดปล่อยพลังงานออกมามาก ทำให้การอบแห้งดักแด้ไหมอีรี่มีอุณหภูมิที่สูงเกินไปส่งผลให้ดักแด้ไหมอีรี่มีสีเข้มและคล้ำไหม้



(ก) อุณหภูมิอากาศร้อน 50 องศาเซลเซียส



(ข) อุณหภูมิอากาศร้อน 60 องศาเซลเซียส



(ค) อุณหภูมิอากาศร้อน 70 องศาเซลเซียส

ภาพประกอบ 0.12 ดักด้ไหมอบแห้งด้วยความหนาแน่นไมโครเวฟ 2.00 วัตต์ต่อกรัม

ค่าสีดักด้ไหมอีรีภายหลังการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน

ค่าสีดักด้ไหมจากการอบแห้งดักด้ไหมด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน วัดด้วยเครื่องวัดสีแสดงค่า L^* a^* และ b^* ข้อมูลที่วัดได้ถูกนำไปคำนวณทางสถิติโดยใช้โปรแกรม spss วิเคราะห์ความแปรปรวน (Anova) และเปรียบเทียบความต่างด้วย Duncan's test โดยพิจารณาความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญไม่เกิน 5 % ผลการวัดสีแสดงดังตาราง 4.5

ตาราง 0.5 ค่าสีดักแด้ไหมอีรี่ภายหลังการอบแห้งดักแด้ไหมอีรี่ด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน

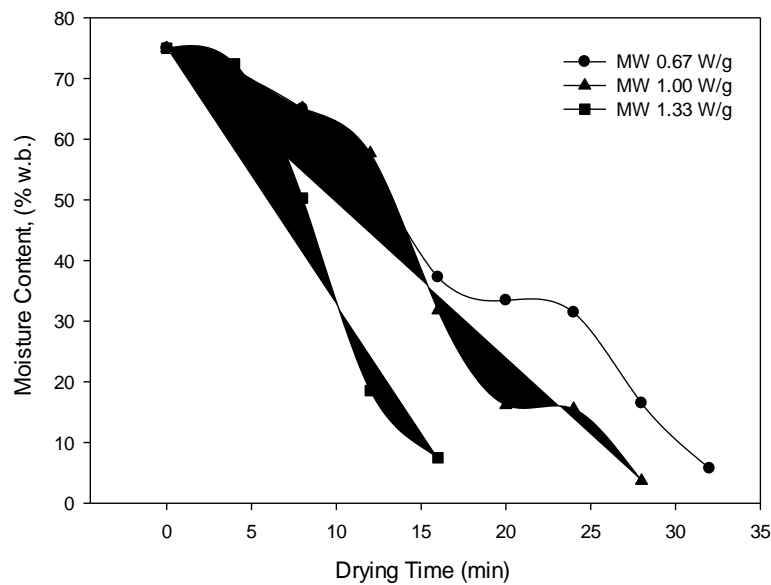
ความเร็วลม (เมตรต่อวินาที)	ความหนาแน่น (วัตต์ต่อกรัม)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	L^{*ns}	a^*	b^{*ns}	
1	0.67 (100 วัตต์)	50	21.59±1.70	10.44±0.61ab	13.53±2.24	
		60	21.28±3.36	11.02±1.03ab	13.13±3.07	
		70	20.59±1.20	10.17±0.80ab	12.48±12.48	
	1.33 (200 วัตต์)	50	21.83±1.78	10.70±0.74ab	13.98±2.64	
		60	22.20±0.65	10.20±0.35ab	13.18±2.11	
		70	20.01±0.71	10.19±0.43ab	12.14±0.70	
	2.00 (300 วัตต์)	50	20.38±1.98	11.77±0.54a	15.26±2.09	
		60	22.83±1.18	10.09±0.07ab	13.30±0.54	
		70	23.05±1.93	10.57±1.40ab	14.21±3.48	
	2	0.67 (100 วัตต์)	50	22.04±1.70	11.11±0.61ab	15.28±2.24
			60	18.24±3.37	11.31±1.30ab	10.54±3.07
			70	20.06±1.19	11.28±0.80ab	13.35±2.12
1.33 (200 วัตต์)		50	22.75±1.78	11.32±0.74ab	14.83±2.64	
		60	19.77±0.65	10.38±0.35ab	12.34±2.11	
		70	21.91±0.71	11.25±0.43ab	15.54±0.70	
2.00 (300 วัตต์)		50	20.42±1.98	11.86±0.53a	12.71±2.09	
		60	20.28±1.18	11.93±0.07b	13.04±0.54	
		70	22.01±1.93	11.80±1.40ab	11.60±3.48	

ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วย a,b ในแถวเดียวกันที่ต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $p < 0.05$ ns คือ ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

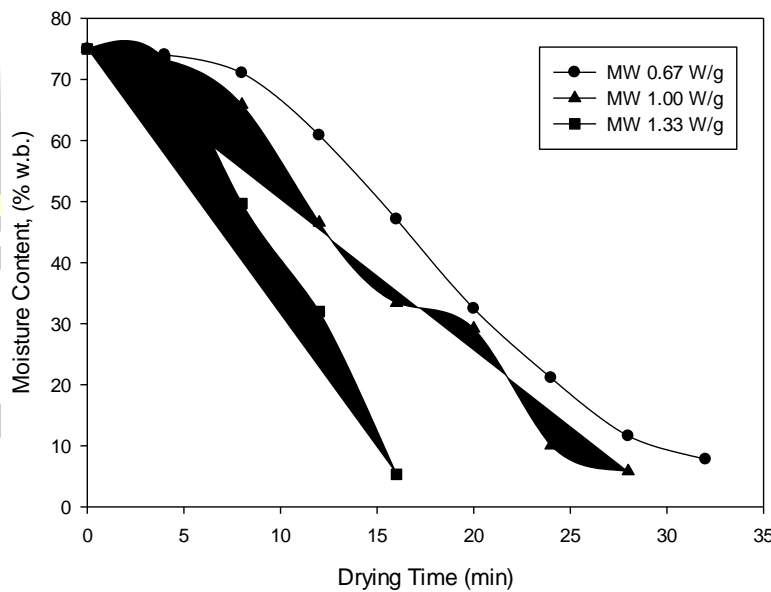
จากตาราง 4.5 พบว่าการอบแห้งดักแด้ไหมอีรี่ด้วยความหนาแน่นไมโครเวฟ 3 ระดับ คือ 0.67, 1.33 และ 2.00 วัตต์ต่อกรัม ร่วมกับอุณหภูมิอากาศ 3 ระดับ คือ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส และความเร็วลม 2 ระดับ คือ 1 และ 2.0 เมตรต่อวินาที ภายหลังการอบแห้งดักแด้ไหมอีรี่ค่า L^* และ b^* ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ แต่มีแนวโน้ม ค่า a^* มีค่าลดลงเมื่อความเร็วลมและความหนาแน่นไมโครเวฟสูง คือ ที่ความหนาแน่นไมโครเวฟ 2.00 วัตต์ต่อกรัม อุณหภูมิอากาศร้อน 70 องศาเซลเซียส และความเร็วลม 2.0 เมตรต่อวินาที เนื่องจากดักแด้ไหมอีรี่ได้รับพลังงานไมโครเวฟสูง อุณหภูมิอากาศร้อนสูง ทำให้น้ำภายในตัวดักแด้ไหมอีรี่เดือดอย่างรุนแรงมากขึ้นทำให้ใช้เวลาการอบแห้งสั้นลง ส่งผลทำให้สีของดักแด้ไหมอีรี่มีสีเข้มขึ้นหรือไหม้คล้ำ

4.2.3 ผลศึกษาการทดลองที่ 3 การหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งผักตัดใหม่อี่รี่ด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน

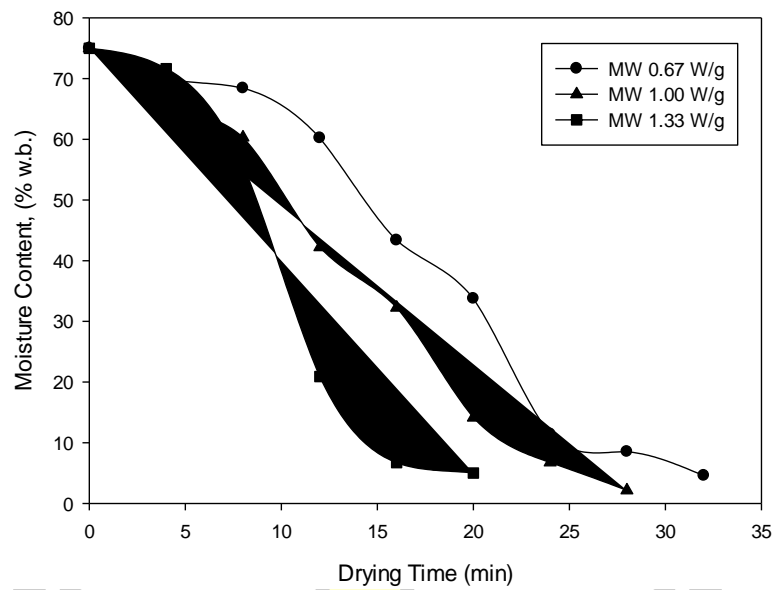
ผลความชื้นของผักตัดใหม่อี่รี่อบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน ที่ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 75 ฐานเปียก อบแห้งจนกระทั่งความชื้นสุดท้ายเหลือร้อยละ 10 ฐานเปียก แสดงดังภาพประกอบ 4.12 และภาพประกอบ 4.13



(ก) อุณหภูมิอากาศร้อน 50 องศาเซลเซียส

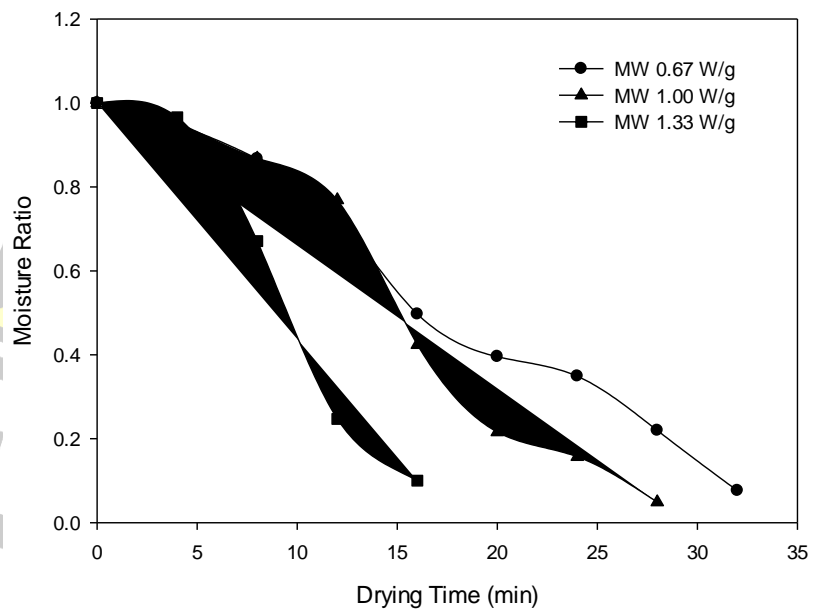


(ข) อุณหภูมิอากาศร้อน 60 องศาเซลเซียส

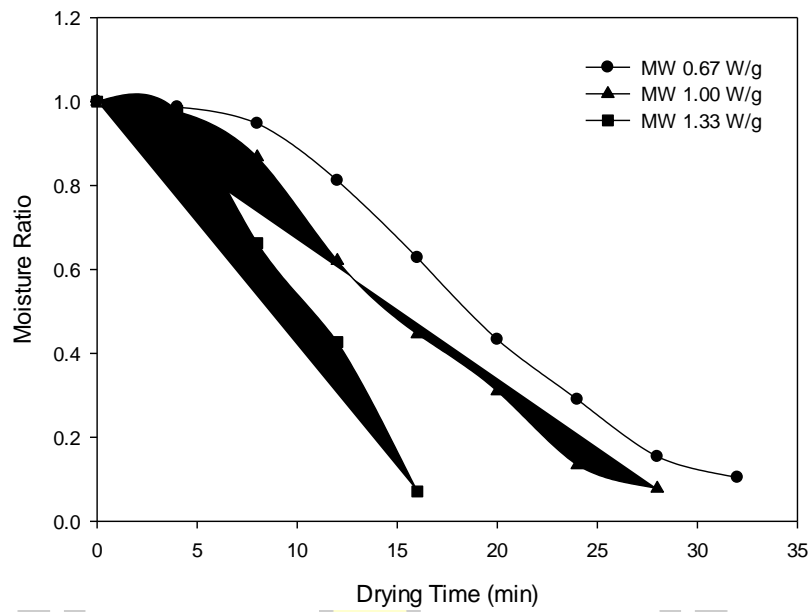


(ค) อุณหภูมิอากาศร้อน 70 องศาเซลเซียส

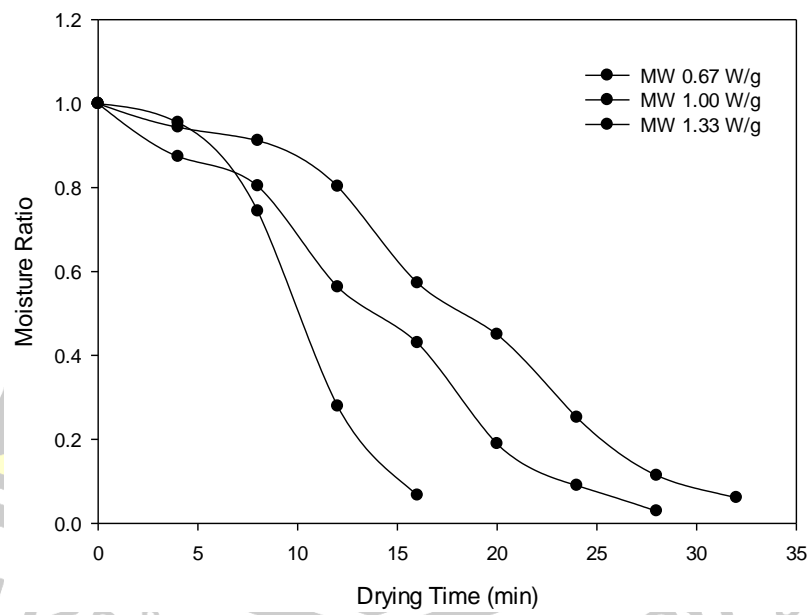
ภาพประกอบ 0.13 ปริมาณอัตราส่วนความชื้นผักตัดใหม่อีรีในระหว่างการอบแห้งด้วยไมโครเวฟ ที่ความหนาแน่นต่างๆ ร่วมกับอากาศร้อน ที่ความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที



(ก) อุณหภูมิอากาศร้อน 50 องศาเซลเซียส



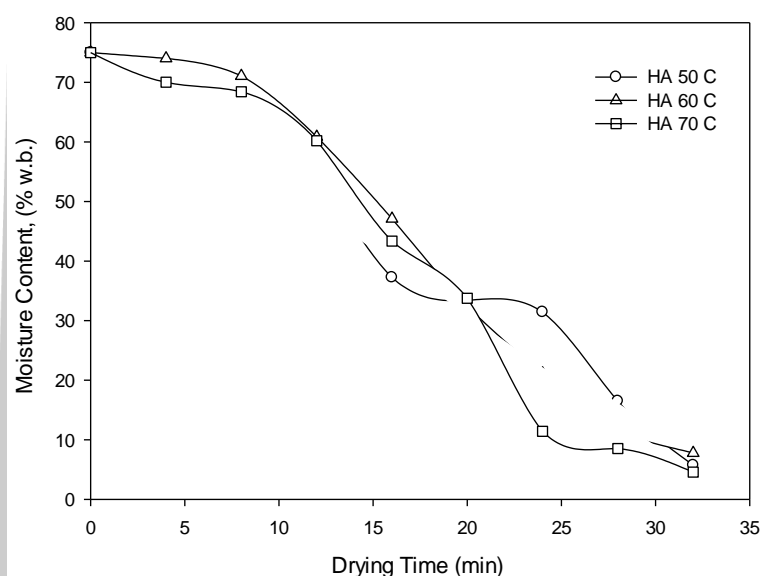
(ข) อุณหภูมิอากาศร้อน 60 องศาเซลเซียส



(ค) อุณหภูมิอากาศร้อน 70 องศาเซลเซียส

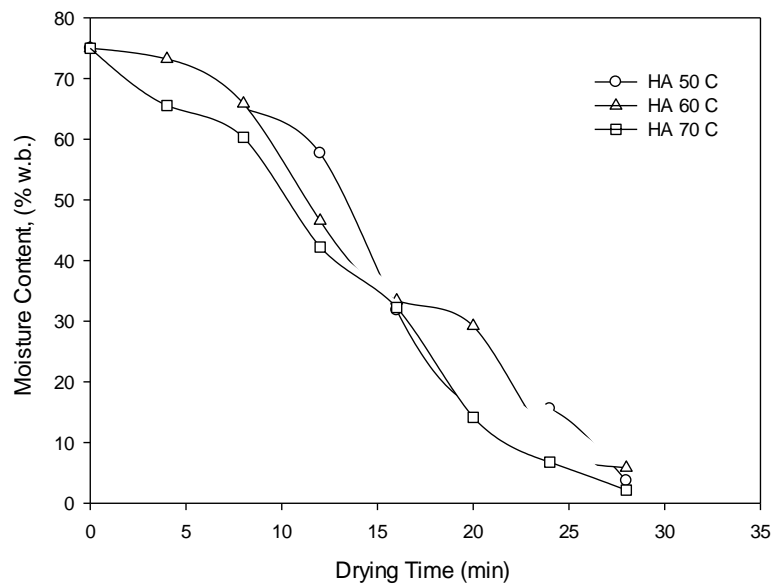
ภาพประกอบ 0.14 ปริมาณอัตราส่วนความชื้นผักแต่ใหม่อีรีในระหว่างการอบแห้งด้วยไมโครเวฟ ที่ความหนาแน่นต่างๆ ร่วมกับอากาศร้อน ที่ความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที

จากภาพประกอบ 4.12 ถึงภาพประกอบ 4.14 แสดงอิทธิพลของความหนาแน่นไมโครเวฟที่มีผลต่อการอบแห้งผักตัดใหม่อโรซีด้วยความหนาแน่นไมโครเวฟ 3 ระดับ คือ 0.67 1.00 และ 1.33 วัตต์ต่อกรัม ที่ความเร็วลม 1 เมตรต่อวินาที พบว่า การอบแห้งผักตัดใหม่อโรซีที่ภายใต้อุณหภูมิอากาศร้อนเดียวกัน ความหนาแน่นไมโครเวฟมีอิทธิพลต่อการอบแห้งผักตัดใหม่อโรซีมากกว่า โดยการอบแห้งผักตัดใหม่ที่ความหนาแน่นไมโครเวฟ 1.33 วัตต์ต่อกรัม ความชื้นลดลงมีค่าเท่ากับ 1.4 - 2 เท่า ของความหนาแน่นไมโครเวฟ 1.00 และ 0.67 วัตต์ต่อกรัม ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Soysal, Ayhan, Eştürk, & Arıkan, 2009) ซึ่งได้ทดลองการอบแห้งพริกแดงพบว่า ระยะเวลาของการอบแห้งลดลงเมื่อใช้ไมโครเวฟทำการอบแห้งร่วมกับอากาศร้อนช่วยให้อัตราการอบแห้งที่สูงขึ้น โดยสามารถแก้ไขข้อเสียการใช้เวลาอบแห้งนานจากการอบแห้งด้วยอากาศร้อนเพียงอย่างเดียวได้

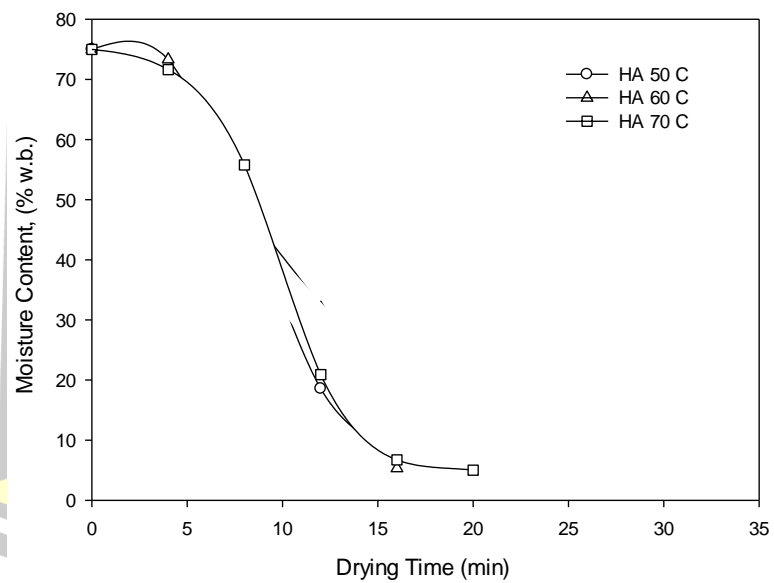


(ก) ความหนาแน่นไมโครเวฟ 0.67 วัตต์ต่อกรัม

พหุ ประถมศึกษา

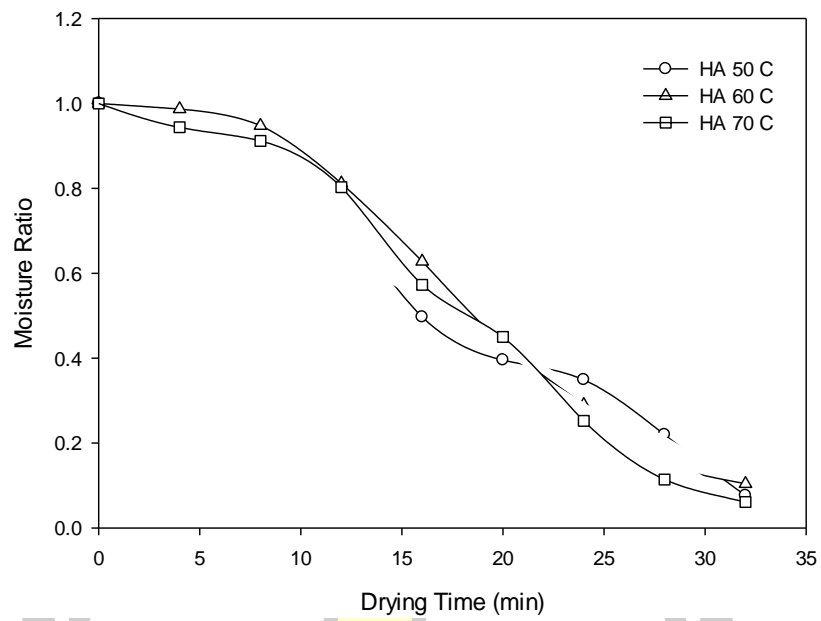


(ข) ความหนาแน่นไมโครเวฟ 1.00 วัตต์ต่อกรัม

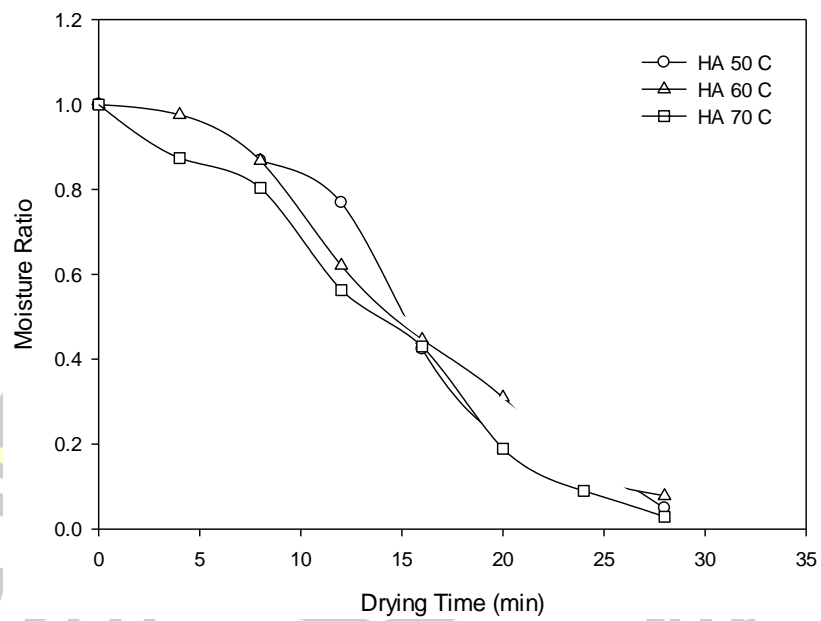


(ค) ความหนาแน่นไมโครเวฟ 1.33 วัตต์ต่อกรัม

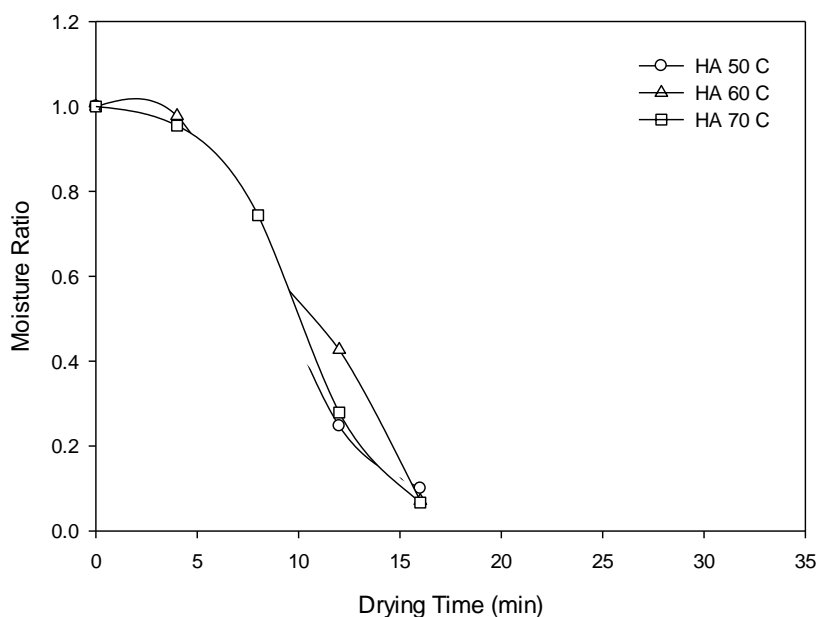
ภาพประกอบ 0.15 ปริมาณความชื้นดั้งเดิมอีรีในระหว่างการอบแห้งด้วยไมโครเวฟที่ความหนาแน่นต่างๆ ร่วมกับอากาศร้อน ที่ความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที



(ก) ความหนาแน่นไมโครเวฟ 0.67 วัตต์ต่อกรัม



(ข) ความหนาแน่นไมโครเวฟ 1.00 วัตต์ต่อกรัม



(ค) ความหนาแน่นไมโครเวฟ 1.33 วัตต์ต่อกรัม

ภาพประกอบ 0.16 ปริมาณอัตราส่วนความชื้นดักแต่ไหมอีรีในระหว่างการอบแห้งด้วยไมโครเวฟ ที่ความหนาแน่นต่างๆ ร่วมกับอากาศร้อน ที่ความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที

จากภาพประกอบ 4.9 แสดงการอบแห้งดักแต่ไหมอีรีด้วยความหนาแน่นไมโครเวฟ 3 ระดับ คือ 0.67, 1.00 และ 1.33 วัตต์ต่อกรัม ร่วมกับอากาศร้อน 3 ระดับ คือ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วลม 1 เมตรต่อวินาที พบว่าการอบแห้งดักแต่ไหมอีรีที่ภายใต้ความหนาแน่นไมโครเวฟเดียวกัน และอุณหภูมิอากาศร้อนอบแห้งที่ต่างกันให้ระยะเวลาอบแห้งดักแต่ไหมอีรีเท่ากัน โดยการอบแห้งที่ความหนาแน่น 0.67, 1.00 และ 1.33 วัตต์ต่อกรัม ใช้เวลาอบแห้งนานเท่ากับ 32, 26 และ 16 นาที ตามลำดับ

ค่าสีดักแต่ไหมอีรีภายหลังการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน

ค่าสีดักแต่ไหมอีรีจากการอบแห้งดักแต่ไหมอีรีด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน วัดด้วยเครื่องวัดสีแสดงค่า L^* , a^* และ b^* ข้อมูลที่วัดได้ถูกนำไปคำนวณทางสถิติโดยใช้โปรแกรม spss วิเคราะห์ความแปรปรวน (Anova) และเปรียบเทียบความต่างด้วย Duncan's test โดยพิจารณาความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญไม่เกิน 5 % ผลการวัดสีแสดงดังตาราง 4.6

ตาราง 0.6 ค่าสีของดักแด้หมอบแห้งการทดลองที่ 3

ความหนาแน่น ไมโครเวฟ (วัตต์ต่อกรัม)	อุณหภูมิอากาศร้อน (องศาเซลเซียส)	L*	a*	b* ^{ns}
0.67 (100 W)	50	18.40±1.20 d	10.44±0.76 a	12.35±2.14
	60	18.52±0.40 d	10.92±0.68 a	12.40±1.67
	70	19.05±1.75 cd	10.84±1.07 a	10.39±1.06
1.00 (150 W)	50	19.30±0.58 bcd	10.07±1.02 a	11.25±2.12
	60	20.09±0.58 bcd	10.61±0.60 a	12.53±1.07
	70	20.19±0.99bcd	10.23±0.14 a	11.96±0.69
1.33 (200 W)	50	21.03±0.68 ab	10.52±0.58 a	12.74±0.34
	60	22.17±0.63 a	10.90±0.81 a	12.64±0.76
	70	20.69±1.22 abc	8.89±0.74b	10.13±1.53

ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วย a, b, c, d ในแถวเดียวกันที่ต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

ns คือ ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

จากตาราง 4.6 พบว่า ค่าสีดักแด้หมอบแห้งการอบแห้งที่ดักแด้หมอบแห้งด้วยความหนาแน่นไมโครเวฟ 3 ระดับ คือ 0.67, 1.00 และ 1.33 วัตต์ต่อกรัม ร่วมกับอุณหภูมิอากาศ 3 ระดับ คือ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส และความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที ค่า L* และ a* มีค่าแตกต่างกันในทางสถิติและค่า b* ไม่มีความแตกต่างกันในทางสถิติ โดยมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน คือ ค่า L* จะมีค่าสูงเมื่อความหนาแน่นไมโครเวฟและอุณหภูมิอากาศร้อนเพิ่มสูงขึ้น ค่า a* ไม่มีความเปลี่ยนแปลงจนกระทั่งความหนาแน่นไมโครเวฟและอุณหภูมิอากาศร้อนเพิ่มสูงขึ้นค่าสีจะมีความเข้มและคล้ำทำให้ค่าสีที่วัดได้ต่ำลง

3) ผลการทดลองที่ 3 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะการอบแห้งดักแด้หมอบแห้งประกอบอุปกรณ์ไฟฟ้า ได้แก่ ไมโครเวฟ ตัวทำความร้อน และพัดลมเป่าอากาศ วัดกำลังไฟฟ้าที่ใช้ด้วยแอมป์มิเตอร์ โดยพลังงานทั้งหมดนำมาวิเคราะห์ปริมาณพลังงานที่ใช้ต่อหนึ่งหน่วยมวลของน้ำที่ระเหยออกจากดักแด้หมอบแห้ง แสดงดังตาราง 4.7

ตาราง 0.7 ค่าความสัมพันธ์พลังงานจำเพาะ

ความหนาแน่น ไมโครเวฟ วัตต์ต่อกรัม	อุณหภูมิ อากาศร้อน (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาทีก)	น้ำ ระเหย (กรัม)	กำลัง ไมโครเวฟ (กิโลจูล)	ฮีตเตอร์ (กิโลจูล)	พัลลัม (กิโลจูล)	SEC (กิโลจูลต่อ กิโลกรัม)
0	60	475	80	0	15200	130	192
0.67 (100 วัตต์)	50	32	74	715	52	10	17
	60	32	73	715	1100	10	25
	70	32	73	715	1340	10	28
1.00 (150 วัตต์)	50	28	76	920	440	8	18
	60	28	77	920	900	8	24
	70	28	79	920	1200	8	27
1.33 (200 วัตต์)	50	16	77	630	260	5	12
	60	16	80	630	520	5	14
	70	16	78	630	670	5	17

จากตาราง 4.7 พบว่าอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะการอบแห้งความหนาแน่นไมโครเวฟ 1.33 ร่วมกับอากาศร้อน 50 องศาเซลเซียส จะให้ค่าความสัมพันธ์พลังงานจำเพาะรวมน้อยที่สุด มีค่าอัตราการการใช้พลังงานจำเพาะน้อยกว่า 1.2 - 2.3 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับเงื่อนไขการทดลองอื่นๆ เนื่องจากที่ความหนาแน่นไมโครเวฟสูงใช้เวลาการอบแห้งสั้นที่สุด จึงทำให้การใช้ไฟฟ้าแต่ละอุปกรณ์น้อยตามไปด้วย ส่งผลให้ค่าความสัมพันธ์พลังงานน้อยที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับการวิจัยของ (มารีนา นุ้ยหมิม, สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, & บชยา บุณนาค, 2536) ศึกษาการอบแห้งสับปะรดแช่เย็น พบว่า ค่าความสัมพันธ์พลังงานจำเพาะของการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อนจะมีค่าต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอบแห้งด้วยไมโครเวฟ และอากาศร้อนเพียงอย่างเดียว

4) ผลการทดลองที่ 3 ศึกษาการทำนายผลสมการชั้นบางการอบแห้งดักแด้ไหมอีรี่ด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน

ผลการทำนายผลการอบแห้งดักแด้ไหมอีรี่ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์การอบแห้งแบบชั้นบาง ที่เงื่อนไขการอบแห้งด้วยกำลังของไมโครเวฟ 3 ระดับ คือ 0.67, 1.00 และ 1.33 วัตต์ต่อกรัม ร่วมกับอุณหภูมิอากาศร้อน 3 ระดับ คือ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส และความเร็วลม 1 เมตรต่อวินาที ด้วยสมการทำนายผลการอบแห้งทั้งหมด 6 สมการ ได้แก่ Page, Lewis, Modified page, Logarithmic, Verma et al. และ Wang and Singh ประมวลผลด้วยโปรแกรม Statistica เวอร์ชัน 5.5 จากการประมวลผลได้ค่าคงที่ R^2 และ χ^2 ดังแสดงในตาราง 4.8

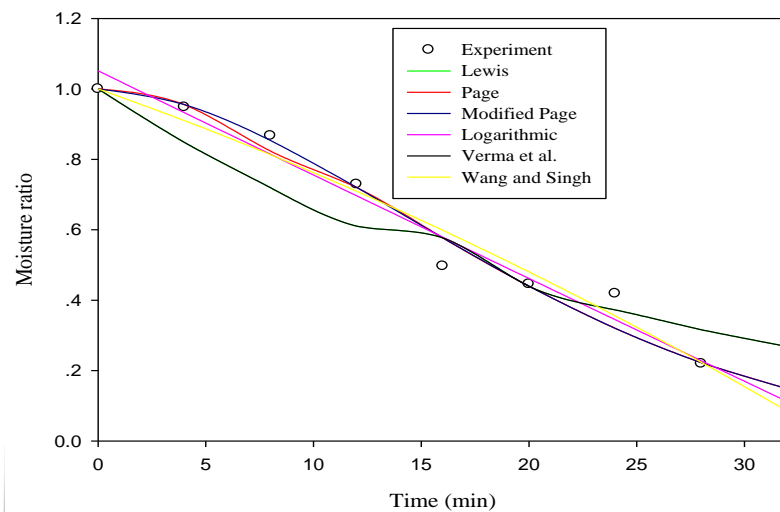
ตาราง 0.8 ค่าคงที่ของสมการคณิตศาสตร์การอบแห้งผักแต่ใหม่อีรีด้วยไมโครเวฟและอากาศร้อน

สมการ	ความหนาแน่น ไมโครเวฟ (วัตต์ต่อกรัม)	อุณหภูมิ อากาศร้อน (องศาเซลเซียส)	ค่าคงที่	R ²	χ^2
Lewis	0.67 (100 วัตต์)	50	k = 0.0411	0.899	0.0113
		60	k = 0.0404	0.821	0.0232
		70	k = 0.0454	0.817	0.028
	1.00 (150 วัตต์)	50	k = 0.0512	0.825	0.0221
		60	k = 0.0504	0.863	0.0179
		70	k = 0.618	0.889	0.0155
1.33 (200 วัตต์)	50	k = 0.0815	0.969	0.0474	
	60	k = 0.0720	0.796	0.0326	
	70	k = 0.123	0.823	0.0386	
Page	0.67 (100 วัตต์)	50	k = 0.00482, n = 1.721	0.974	0.00379
		60	k = 0.000431, n = 2.511	0.982	0.00032
		70	k = 0.000496, n = 2.495	0.958	0.00094
	1.00 (150 วัตต์)	50	k = 0.000735, n = 2.496	0.982	0.00285
		60	k = 0.00227, n = 2.0908	0.986	0.00213
		70	k = 0.00342, n = 2.0404	0.990	0.00159
	1.33 (200 วัตต์)	50	k = 0.0122, n = 2.827	0.999	0.0366
		60	k = 0.00123, n = 2.696	0.985	0.00295
		70	k = 0.000108, n = 4.505	0.986	0.00069
Modified Page	0.67 (100 วัตต์)	50	k = 0.208, n = 0.203	0.989	0.012
		60	k = 0.201, n = 0.201	0.821	0.0265
		70	k = 0.213, n = 0.213	0.817	0.032
	1.00 (150 วัตต์)	50	k = 0.226, n = 0.226	0.859	0.0253
		60	k = 0.225, n = 0.225	0.889	0.00215
		70	k = 0.249, n = 0.249	0.943	0.018
	1.33 (200 วัตต์)	50	k = 0.238, n = 0.238	0.857	0.0631
		60	k = 0.269, n = 0.269	0.801	0.0408
		70	k = 0.0878, n = 3.184	0.784	0.0515

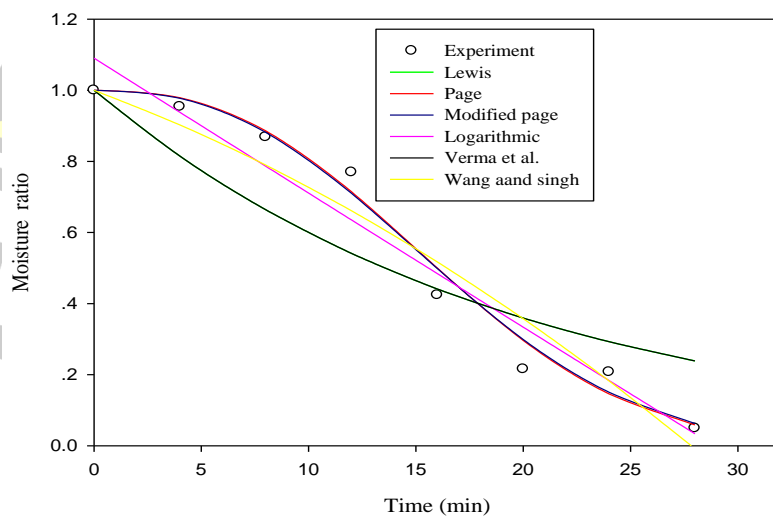
ตาราง 4.8 ค่าคงที่ของสมการคณิตศาสตร์การอบแห้งผักแต่ใหม่อิตาลีด้วยไมโครเวฟและอากาศร้อน (ต่อ)

สมการ	ความหนาแน่น ไมโครเวฟ (วัตต์ต่อกรัม)	อุณหภูมิ อากาศร้อน (องศาเซลเซียส)	ค่าคงที่	R ²	χ^2
Logarithmic	0.67 (100 วัตต์)	50	k = 0.000846, a = 35.173, c = -34.122	0.976	0.00299
		60	k = 0.000512, a = 64.281, c = -63.164	0.963	0.00639
		70	k = 0.000572, a = 59.459, c = -58.364	0.954	0.00596
	1.00 (150 วัตต์)	50	k = 0.00208, a = 18.676, c = -17.583	0.825	0.00865
		60	k = 0.000832, a = 44.513, c = -43.434	0.972	0.00487
		70	k = 0.00413, a = 9.686, c = -8.651	0.981	0.00364
	1.33 (200 วัตต์)	50	k = 0.117, a = 4.188, c = -3.135	0.898	0.0678
		60	k = 0.000366, a = 164.857, c = -163.748	0.947	0.0152
		70	k = 0.000361, a = 173.255, c = -172.142	0.931	0.0239
Verma et al.	0.67 (100 วัตต์)	50	k = 0.0411, a = 0.204, g = 0.0411	0.889	0.015
		60	k = 0.0405, a = 0.157, g = 0.0405	0.821	0.0282
		70	k = 0.130, a = -18.212, g = 0.120	0.954	0.00605
	1.00 (150 วัตต์)	50	k = 0.0512, a = 0.0534, g = 0.051	0.825	0.0295
		60	k = 0.0504, a = 0.854, g = 0.0504	0.859	0.0251
		70	k = -0.0166, a = -0.875, g = 0.0113	0.979	0.00409
	1.33 (200 วัตต์)	50	k = 0.0567, a = 0.147, g = 0.0567	0.926	0.0805
		60	k = 0.0728, a = 0.201, g = 0.0728	0.801	0.0611
		70	k = 0.0768, a = 0.0905, g = 0.0768	0.784	0.0771
Wang and Singh	0.67 (100 วัตต์)	50	a = -0.0216, b = -0.000219	0.976	0.00252
		60	a = -0.0144, b = -0.000516	0.965	0.0157
		70	a = -0.0184, b = -0.000438	0.957	0.00425
	1.00 (150 วัตต์)	50	a = -0.0224, b = -0.000485	0.948	0.00756
		60	a = -0.0239, b = -0.000392	0.968	0.00458
		70	a = -0.0354, b = -0.000048	0.98	0.00333
	1.33 (200 วัตต์)	50	a = -0.0383, b = -0.000207	0.888	0.0466
		60	a = -0.0126, b = -0.00289	0.986	0.00279
		70	a = -0.0159, b = -0.00278	0.961	0.00811

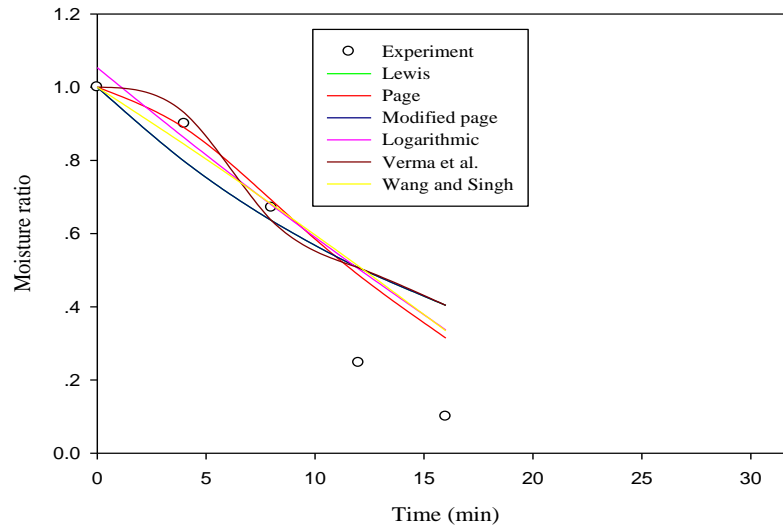
จากตาราง 4.8 แสดง ค่าคงที่ R^2 และ χ^2 และภาพประกอบ 4.17, 4.12 และ 4.19 แสดงการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงความชื้นการอบแห้งผักแต่ใหม่อโหรีจากสมการคณิตศาสตร์การอบแห้งแบบชั้นบางกับเวลาการอบแห้ง จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมกับการทำนายผลการอบแห้งผักแต่ใหม่อโหรีที่ให้ผลลัพธ์ค่า R^2 ใกล้เคียงกับที่หนึ่ง และ ค่า χ^2 ที่มีค่าต่ำ สมการ Page ทำนายผลการอบแห้งผักแต่ใหม่อโหรีด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อนได้ถูกต้องและเหมาะสมมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสมการอื่นๆ ซึ่งมีความสอดคล้องกับการวิจัยการทำนายผลการอบแห้งผลิตภัณฑ์เช่น พืชตาซีโอ (Zadeh and Shafeei, 2010)



(ก) ความหนาแน่นไมโครเวฟ 0.67 วัตต์ต่อกรัม

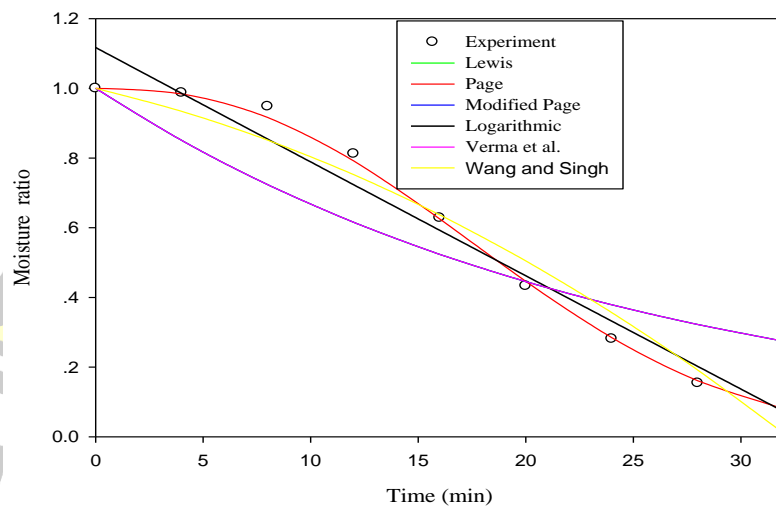


(ข) ความหนาแน่นไมโครเวฟ 1.0 วัตต์ต่อกรัม

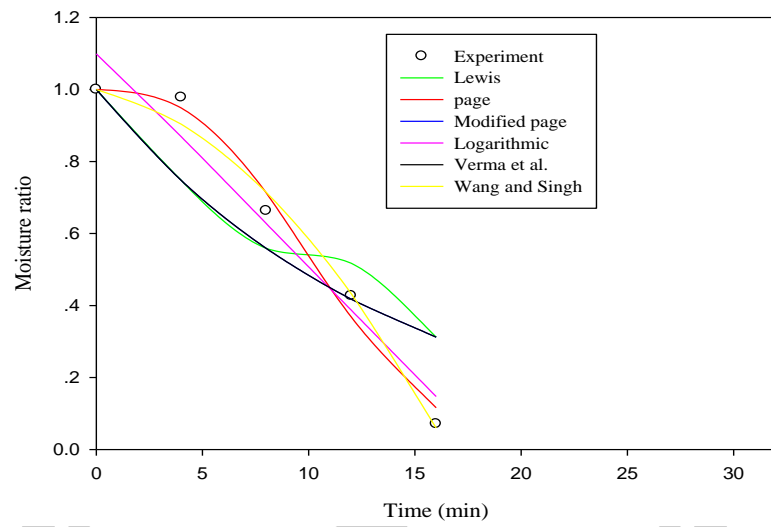


(ค) ความหนาแน่นกำลังไมโครเวฟ 1.33 วัตต์ต่อกรัม

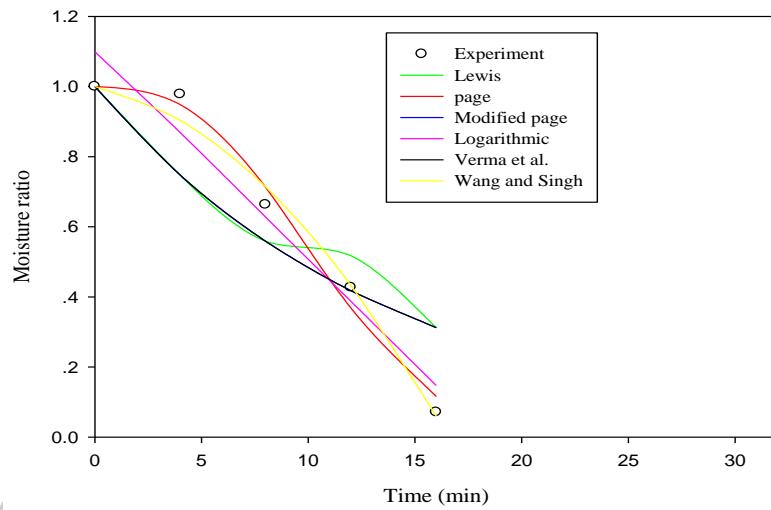
ภาพประกอบ 0.17 เปรียบเทียบผลการทำนายการอบแห้งผักแต่ใหม่ออร์ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ร่วมกับกำลังไมโครเวฟที่ความหนาแน่นต่างๆ



(ก) ความหนาแน่นไมโครเวฟ 0.67 วัตต์ต่อกรัม



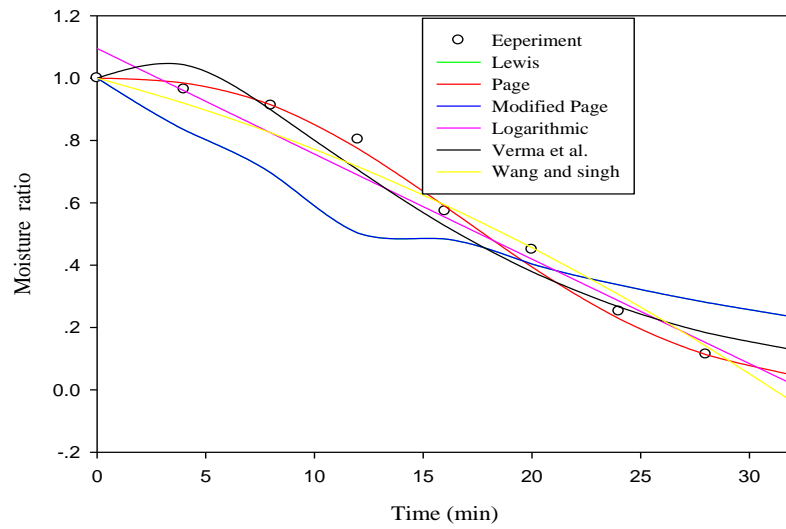
(ข) ความหนาแน่นไมโครเวฟ 1.00 วัตต์ต่อกรัม



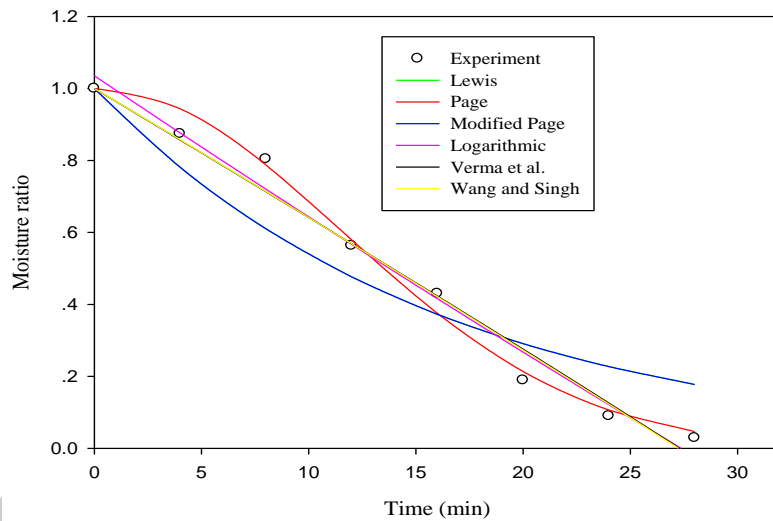
(ค) ความหนาแน่นไมโครเวฟ 1.33 วัตต์ต่อกรัม

ภาพประกอบ 0.18 กราฟเปรียบเทียบผลการทำนายการอบแห้งผักตัดใหม่ออร์ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 60 องศาเซลเซียสร่วมกับไมโครเวฟที่ความหนาแน่นต่างๆ

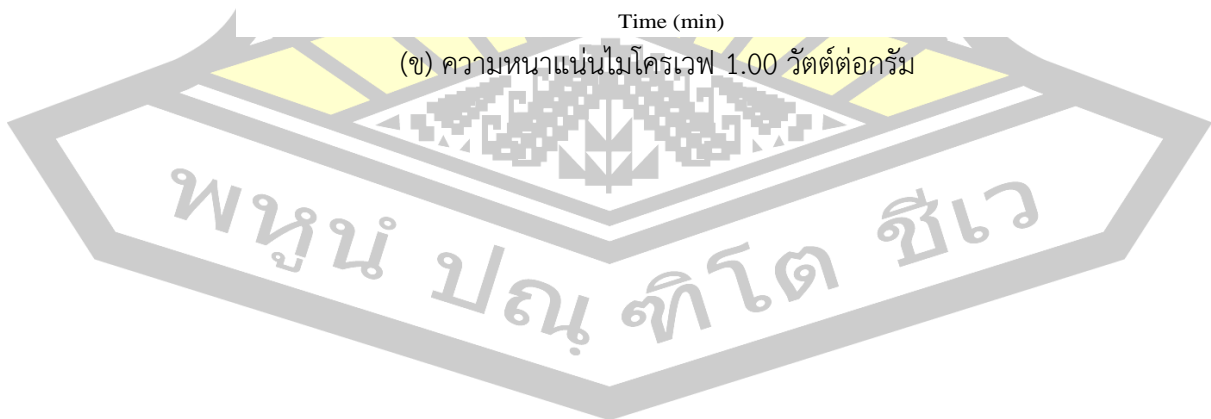
พหุ ประถมศึกษา

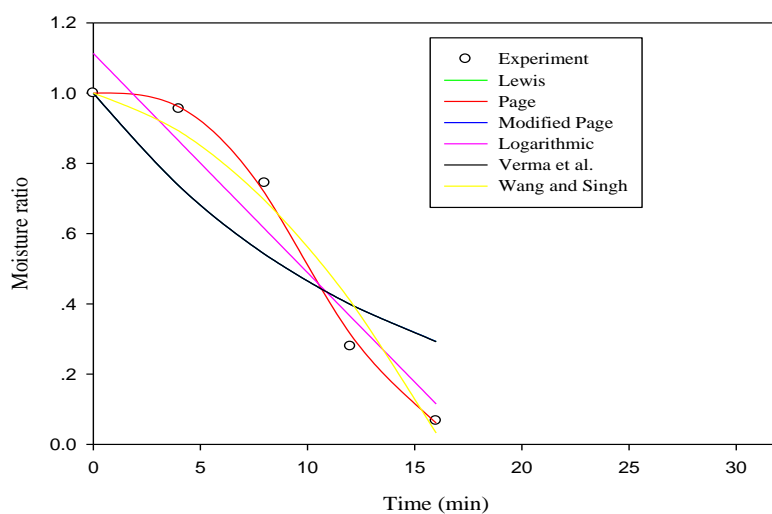


(ก) ความหนาแน่นไมโครเวฟ 0.67 วัตต์ต่อกรัม



(ข) ความหนาแน่นไมโครเวฟ 1.00 วัตต์ต่อกรัม



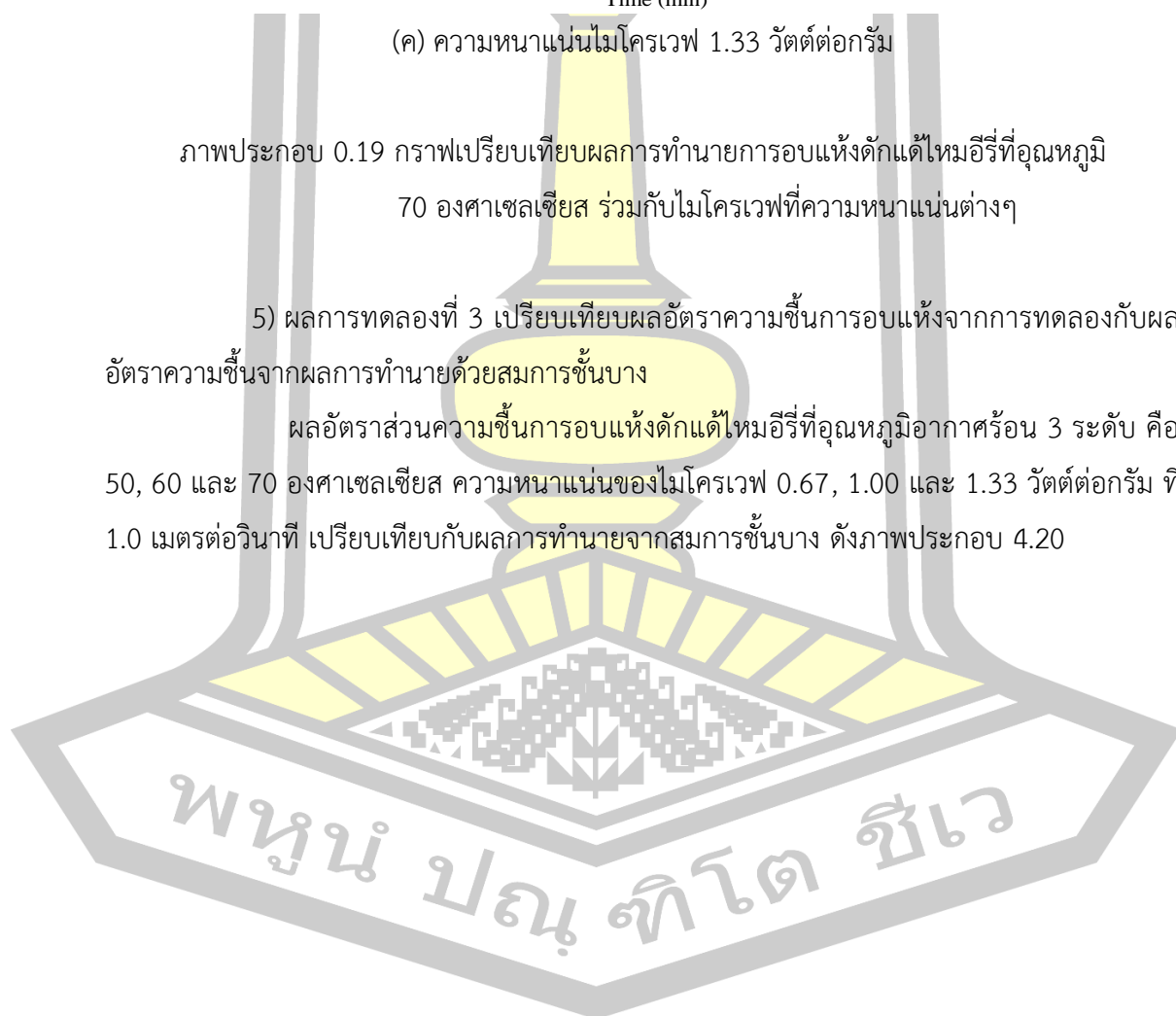


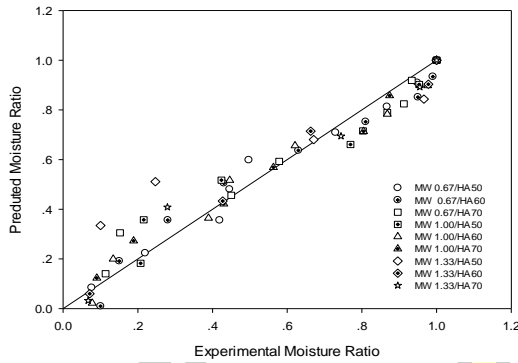
(ค) ความหนาแน่นไมโครเวฟ 1.33 วัตต์ต่อกรัม

ภาพประกอบ 0.19 กราฟเปรียบเทียบผลการทำนายการอบแห้งผักตัดใหม่อีรีที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ร่วมกับไมโครเวฟที่ความหนาแน่นต่างๆ

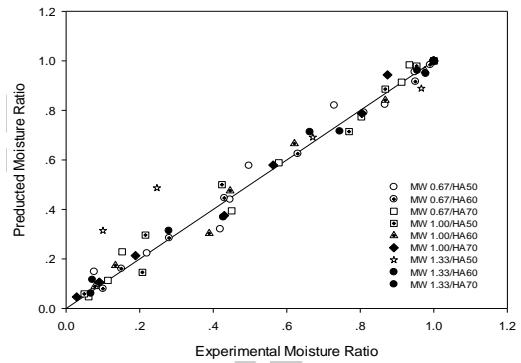
5) ผลการทดลองที่ 3 เปรียบเทียบผลอัตราความชื้นการอบแห้งจากการทดลองกับผลอัตราความชื้นจากการทำนายด้วยสมการชั้นบาง

ผลอัตราส่วนความชื้นการอบแห้งผักตัดใหม่อีรีที่อุณหภูมิอากาศร้อน 3 ระดับ คือ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส ความหนาแน่นของไมโครเวฟ 0.67, 1.00 และ 1.33 วัตต์ต่อกรัม ที่ 1.0 เมตรต่อวินาที เปรียบเทียบกับผลการทำนายจากสมการชั้นบาง ดังภาพประกอบ 4.20

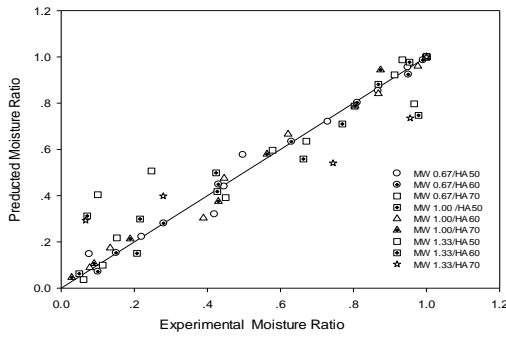




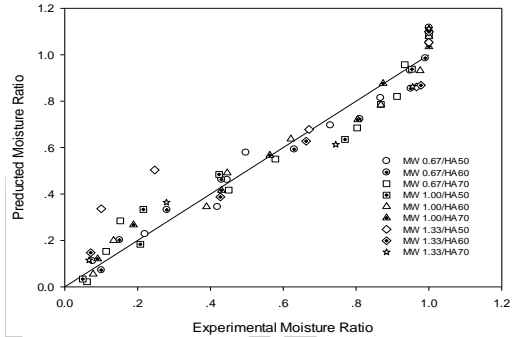
(ก) Lewis



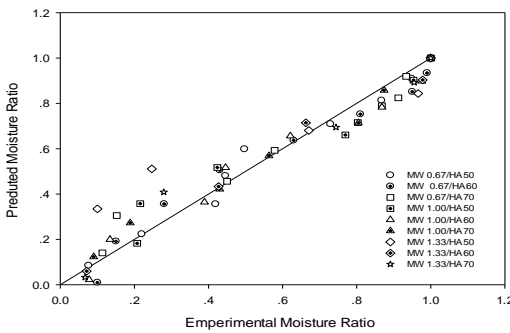
(ข) Page



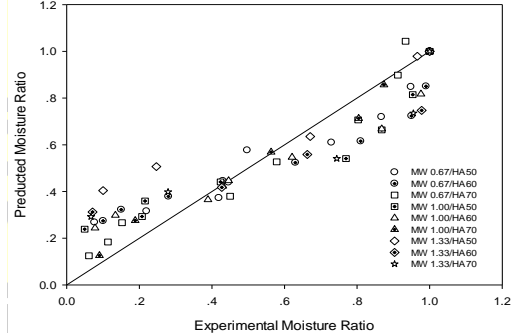
(ค) Modified Page



(ง) Logathmic



(จ) Verma et al.



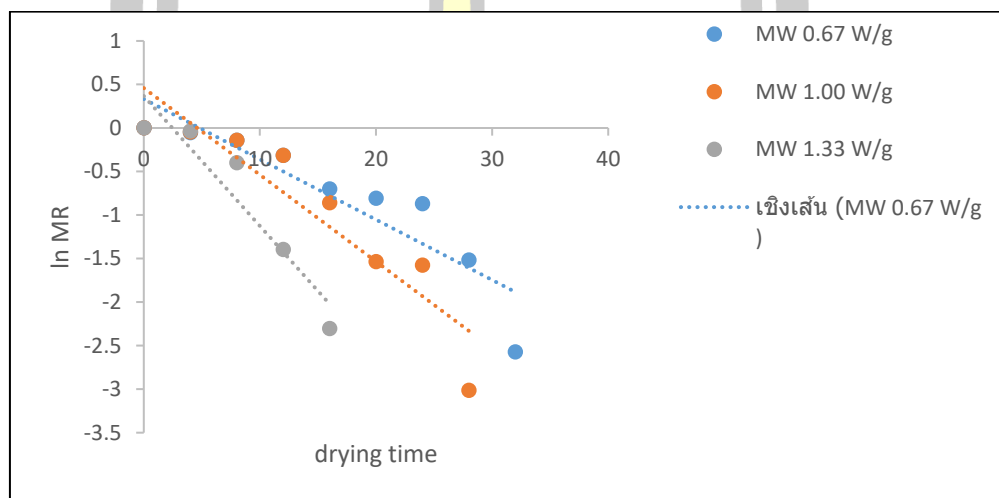
(ฉ) Wang and Singh

ภาพประกอบ 0.20 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นจากการทดลองกับการทำนายด้วยสมการชั้นบาง

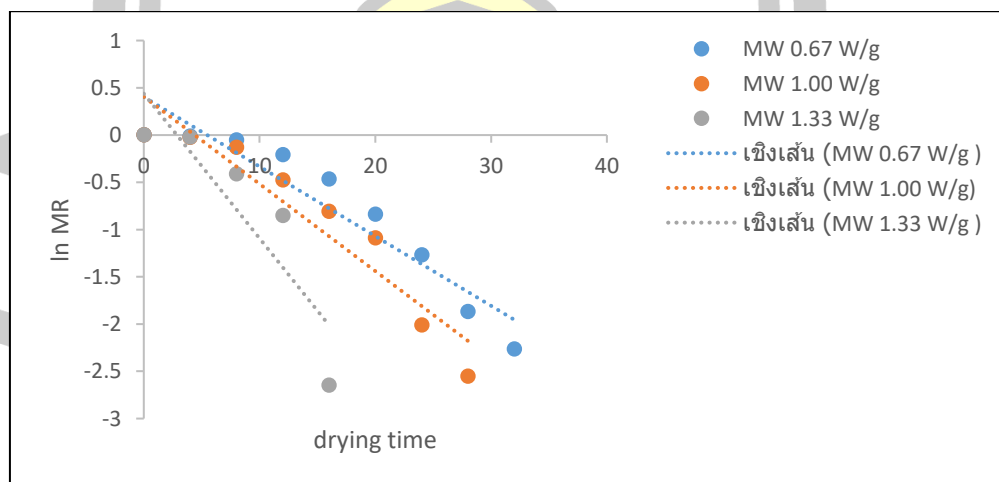
การทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองคณิตศาสตร์การอบแห้งผักผลไม้สดด้วยการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนความชื้นจากการทำนายผลอบแห้งผลการทดลอง ดังแสดงในภาพประกอบ 4.13 พบว่า แบบจำลองคณิตศาสตร์แบบชั้นบาง page สามารถอธิบายลักษณะการอบแห้งผักผลไม้สดได้ดีที่สุดภายใต้สภาวะการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน แสดงให้เห็น

ถึงรูปแบบที่ดีที่สุดที่สุดของแบบจำลองแบบชั้นบางสำหรับการทำนายผลการทำนายอบแห้งผักตัดใหม่อี่รี่ ดังนั้นแบบจำลอง จึงสามารถนำมาใช้ในการทำนายการอบแห้งผักตัดใหม่อี่รี่ด้วยไมโครเวฟร่วมกับ อากาศร้อนได้

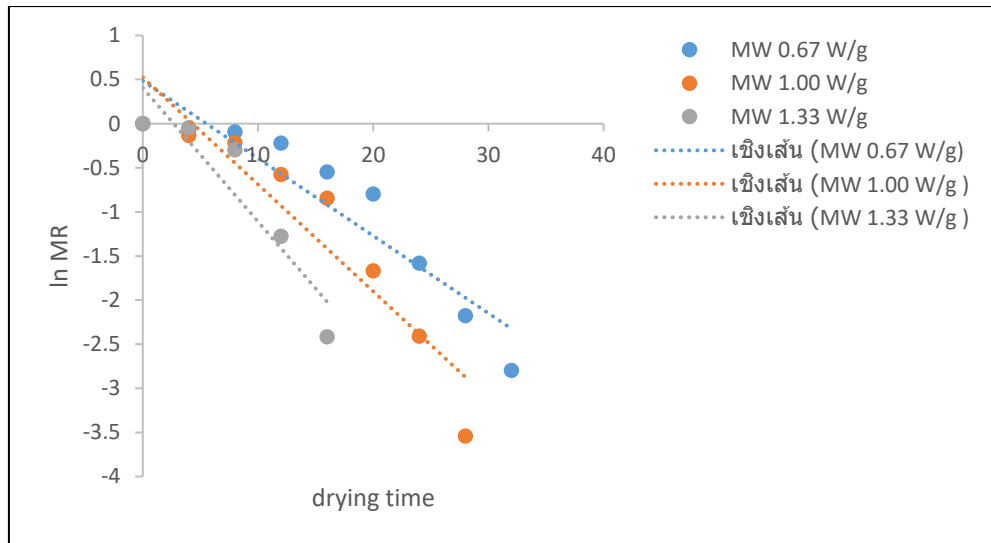
ผักตัดใหม่อี่รี่ที่ใช้ในการทดลองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร และมีความ ยาว 2.5 เซนติเมตร เนื่องจากสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลใช้สมการทรงกลม จึงนำมาหา ค่ารัศมีทรงกลมได้เท่ากับ 1.05 เซนติเมตร นำมาแทนค่าในสมการ และพล็อตกราฟดังแสดงใน ภาพประกอบ 4.21



(ก) อุณหภูมิอากาศร้อน 50 องศาเซลเซียส



(ข) อุณหภูมิอากาศร้อน 60 องศาเซลเซียส



(ค) อุณหภูมิอากาศร้อน 70 องศาเซลเซียส

ภาพประกอบ 0.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมธรรมชาติของอัตราส่วนความชื้นกับเวลาการอบแห้งดักแด่ไหมอีรี่ด้วยความหนาแน่นไมโครเวฟ 0.67, 1.00 และ 1.33 วัตต์ต่อกรัม ที่อุณหภูมิอากาศร้อนต่างๆ

จากภาพประกอบ 4.21 นำค่าอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลองอบแห้งดักแด่ไหมอีรี่มาหาค่าลอการิทึมธรรมชาติ พล็อตกราฟความสัมพันธ์กับเวลาการอบแห้งดักแด่ไหมอีรี่ เพื่อหาค่าความชื้นจากการพล็อตกราฟสามารถหาค่าความชื้นได้ดังแสดงในตาราง 4.9

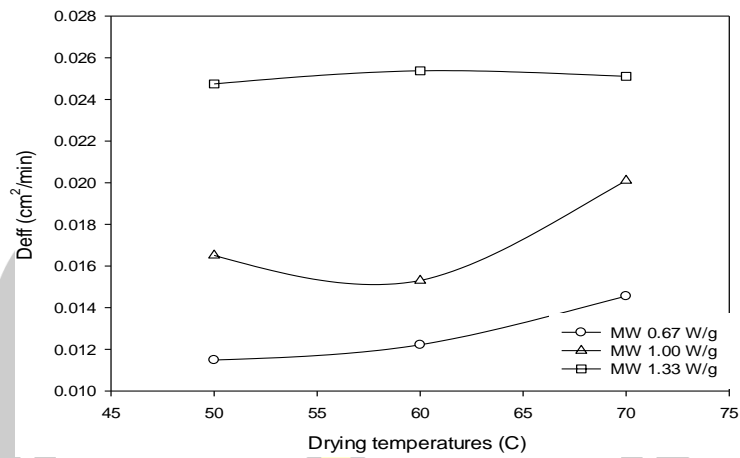
พูนุ ปณฺ ทิโต ชีเว

ตาราง 0.9 ค่าความชื้นจากการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ลอการิทึมธรรมชาติอัตราส่วนความชื้นดักแด้น้ำมันอีรีและเวลาที่ใช้การอบแห้ง

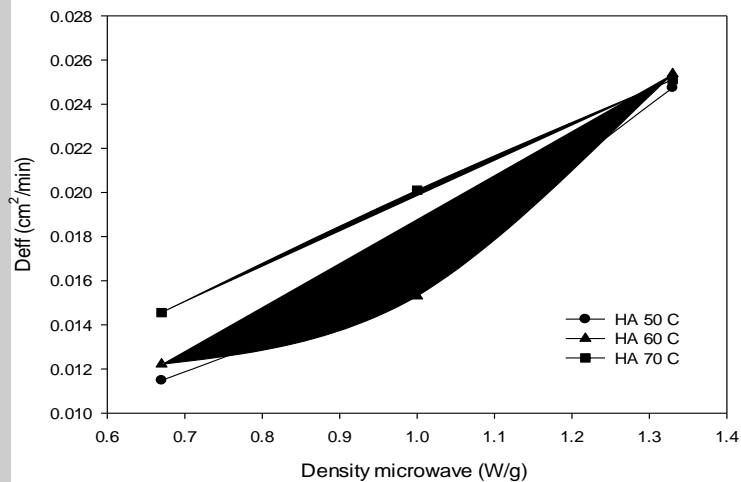
ความหนาแน่นไมโครเวฟ (วัตต์ต่อกรัม)	อุณหภูมิอากาศร้อน (องศาเซลเซียส)	ค่าความชื้น
0.67 (100 วัตต์)	50	0.0693
	60	0.0737
	70	0.0862
1.00 (150 วัตต์)	50	0.0997
	60	0.0908
	70	0.1213
1.33 (200 วัตต์)	50	0.1492
	60	0.1530
	70	0.1659

จากตาราง 4.9 นำค่าความชื้นที่ได้จากความสัมพันธ์อัตราส่วนความชื้นดักแด้น้ำมันอีรีกับเวลาที่ใช้อบแห้ง แทนค่าในสมการที่ 3.8 เพื่อหาความสัมพันธ์การแพร่ความชื้นการอบแห้งดักแด้น้ำมันอีรีด้วยไมโครเวฟ 3 ระดับ คือ 0.67, 1.00 และ 1.33 วัตต์ต่อกรัม ทำงานร่วมกับอุณหภูมิอากาศร้อน 3 ระดับ คือ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นดักแด้น้ำมันอีรี ดังแสดงในภาพประกอบ 4.22





(ก) สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นผักแต้หม้อรี่ภายใต้ความหนาแน่นไมโครเวฟแตกต่างกัน



(ข) สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นผักแต้หม้อรี่ภายใต้อุณหภูมิอากาศร้อนแตกต่างกัน

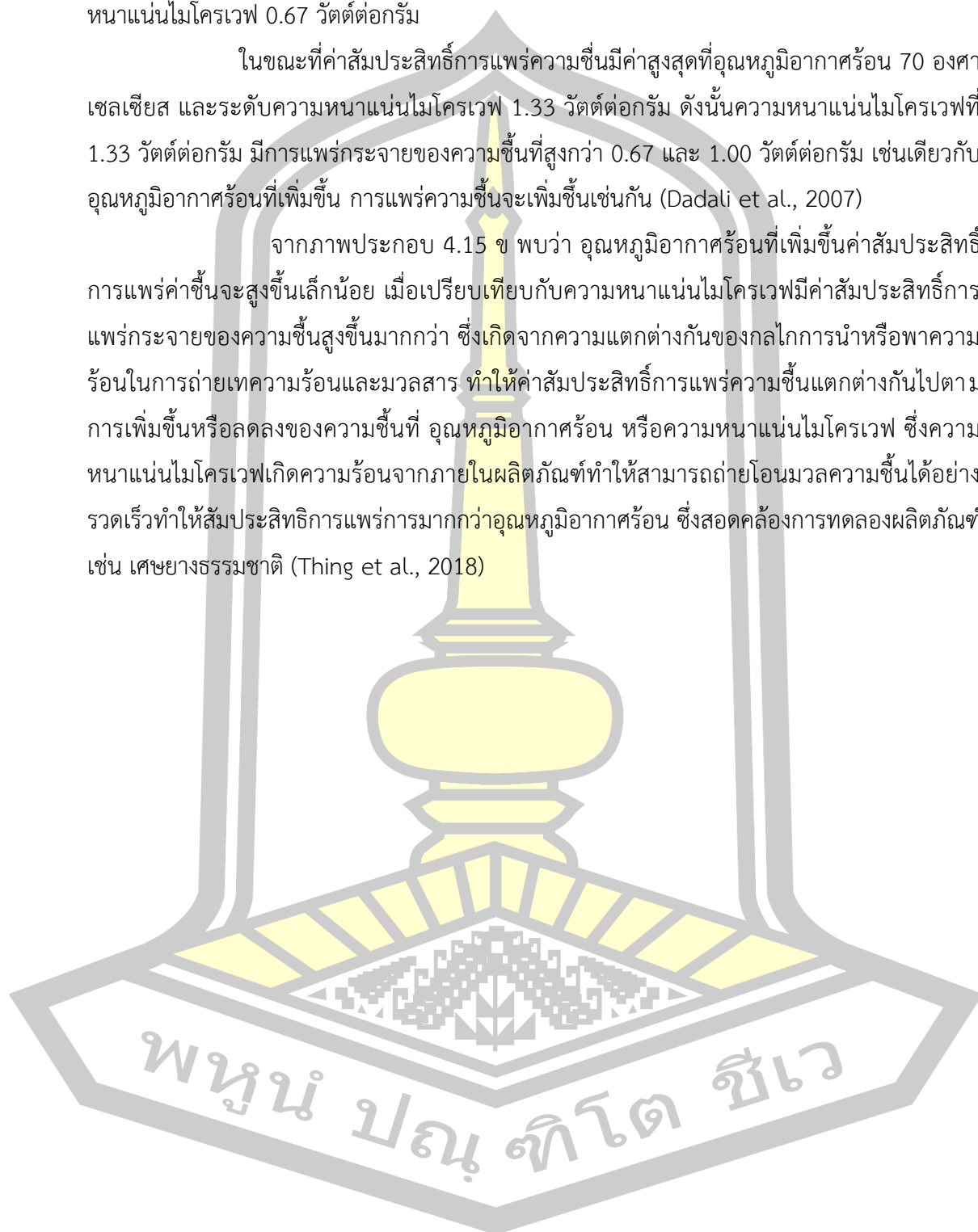
ภาพประกอบ 0.22 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นผักแต้หม้อรี่ด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อนที่สถานะแตกต่างกัน

สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นการอบแห้งผักแต้หม้อรี่ ดังแสดงภาพประกอบ 4.15 พบว่า การเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นไมโครเวฟและอุณหภูมิอากาศร้อนทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่สูงหมายความว่า การอบแห้งผลิตภัณฑ์สามารถแห้งหรือลดความชื้นได้เร็วขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่

สัมประสิทธิ์ของดักแด่ไหมอีรีต่ำที่สุดที่อุณหภูมิอากาศร้อน 50 องศาเซลเซียส และระดับความหนาแน่นไมโครเวฟ 0.67 วัตต์ต่อกรัม

ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อนมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิอากาศร้อน 70 องศาเซลเซียส และระดับความหนาแน่นไมโครเวฟ 1.33 วัตต์ต่อกรัม ดังนั้นความหนาแน่นไมโครเวฟที่ 1.33 วัตต์ต่อกรัม มีการแพร่กระจายของความร้อนที่สูงกว่า 0.67 และ 1.00 วัตต์ต่อกรัม เช่นเดียวกับอุณหภูมิอากาศร้อนที่เพิ่มขึ้น การแพร่ความร้อนจะเพิ่มขึ้นเช่นกัน (Dadali et al., 2007)

จากภาพประกอบ 4.15 ข พบว่า อุณหภูมิอากาศร้อนที่เพิ่มขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ค่าขึ้นจะสูงขึ้นเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับความหนาแน่นไมโครเวฟมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของความร้อนสูงขึ้นมากกว่า ซึ่งเกิดจากความแตกต่างกันของกลไกการนำหรือพาความร้อนในการถ่ายเทความร้อนและมวลสาร ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อนแตกต่างกันไปตามการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของความร้อนที่ อุณหภูมิอากาศร้อน หรือความหนาแน่นไมโครเวฟ ซึ่งความหนาแน่นไมโครเวฟเกิดความร้อนจากภายในผลิตภัณฑ์ทำให้สามารถถ่ายโอนมวลความร้อนได้อย่างรวดเร็วทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อนมากกว่าอุณหภูมิอากาศร้อน ซึ่งสอดคล้องการทดลองผลิตภัณฑ์ เช่น เศษยางธรรมชาติ (Thing et al., 2018)



บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 ผลการทดลองอบแห้งผักแต่้ใหม่อีรี่ด้วยอากาศร้อนเพียงอย่างเดียว

การทดลองอบแห้งผักแต่้ใหม่ด้วยอากาศร้อนเพียงอย่างเดียว ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 3 ระดับ คือ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส และความเร็วลม 2 ระดับ คือ 0.5 และ 1.0 เมตรต่อวินาที สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

อัตราการอบแห้งเพิ่มตามอุณหภูมิและความเร็วในการอบแห้ง สำหรับค่าสีอุณหภูมิในการอบแห้งที่สูงจะทำให้ค่า L^* มีค่าลดลงในขณะที่ค่า a^* และ b^* มีค่าสูงขึ้น

5.2 ผลการอบแห้งผักแต่้ใหม่ด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน

ผลการศึกษาอบแห้งผักแต่้ใหม่อีรี่ด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรก ทดลองอบแห้งที่ความหนาแน่นไมโครเวฟ 3 ระดับ คือ 0.67, 1.33 และ 2.00 วัตต์ต่อกรัม ทำงานร่วมกับอุณหภูมิอากาศร้อน 3 ระดับ คือ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วลม 2 ระดับ คือ 1 และ 2 เมตรต่อวินาที ส่วนที่สองทดลองอบแห้งที่ความหนาแน่นไมโครเวฟ 3 ระดับ คือ 0.67, 1.00 และ 1.33 วัตต์ต่อกรัม ทำงานร่วมกับอุณหภูมิอากาศร้อน 3 ระดับ คือ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียสที่ความเร็วลม 1 เมตรต่อวินาที สามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) ความหนาแน่นไมโครเวฟที่สูงจะส่งผลต่อกระบวนการอบแห้งผักแต่้ใหม่อีรี่ให้มีอัตราการอบแห้งที่รวดเร็ว
- 2) อุณหภูมิอากาศร้อนและความเร็วลมไม่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง เมื่ออบแห้งร่วมกับไมโครเวฟ
- 3) การอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อนจะมีอัตราการอบแห้งที่มากกว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อนเพียงอย่างเดียว
- 4) ค่าสีผักแต่้ใหม่อีรี่หลังจากการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อนจะมีค่า L^* มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้งด้วยอากาศร้อนเพียงอย่างเดียว
- 5) ค่าความหนาแน่นไมโครเวฟที่สูงจะส่งผลต่อการระเหยของน้ำภายในผักแต่้ใหม่อีรี่อย่างรวดเร็ว

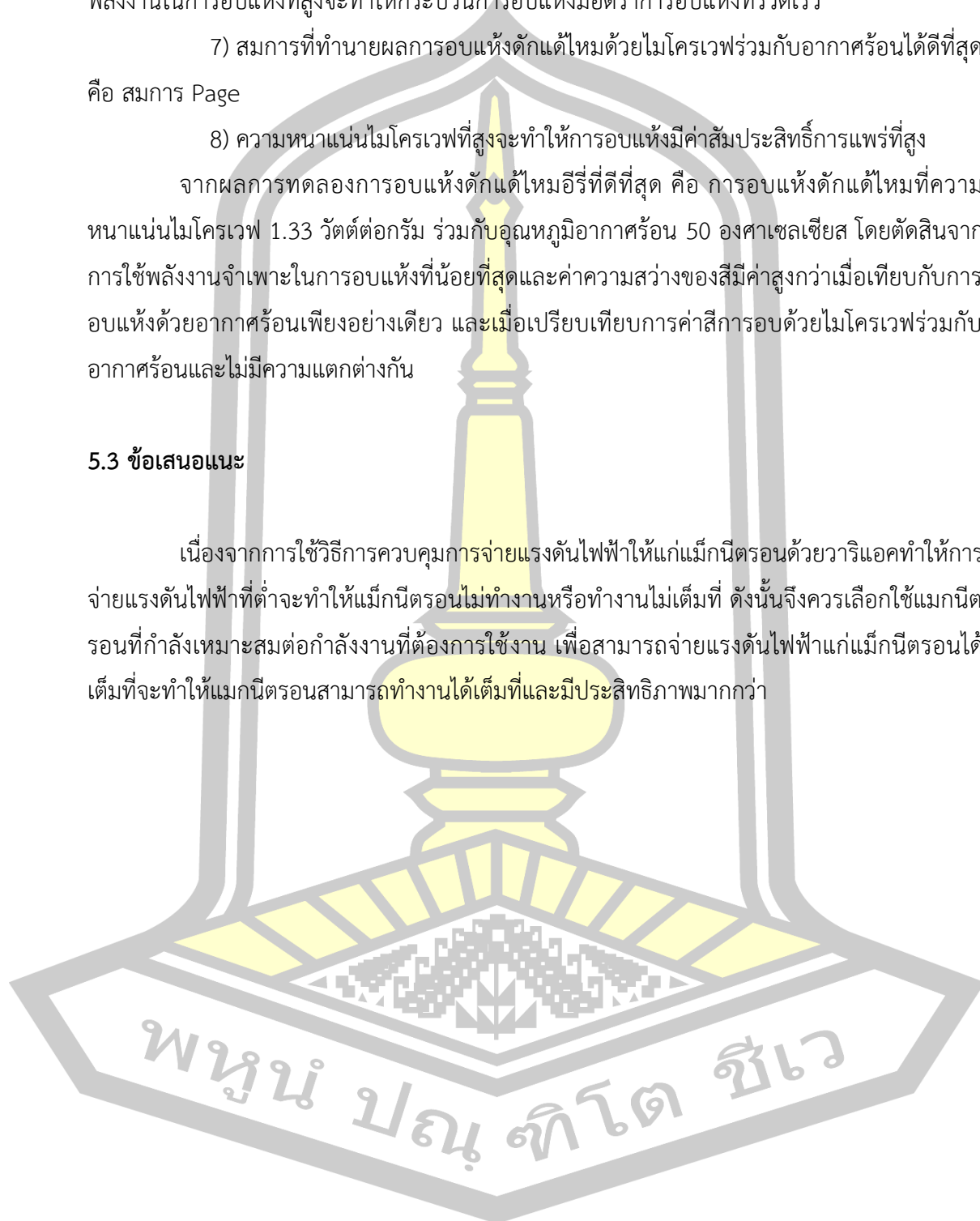
6) ค่าความหนาแน่นไมโครเวฟที่สูงจะมีค่าการใช้พลังงานจำเพาะในการอบแห้งน้อย พลังงานในการอบแห้งที่สูงจะทำให้กระบวนการอบแห้งมีอัตราการอบแห้งที่รวดเร็ว

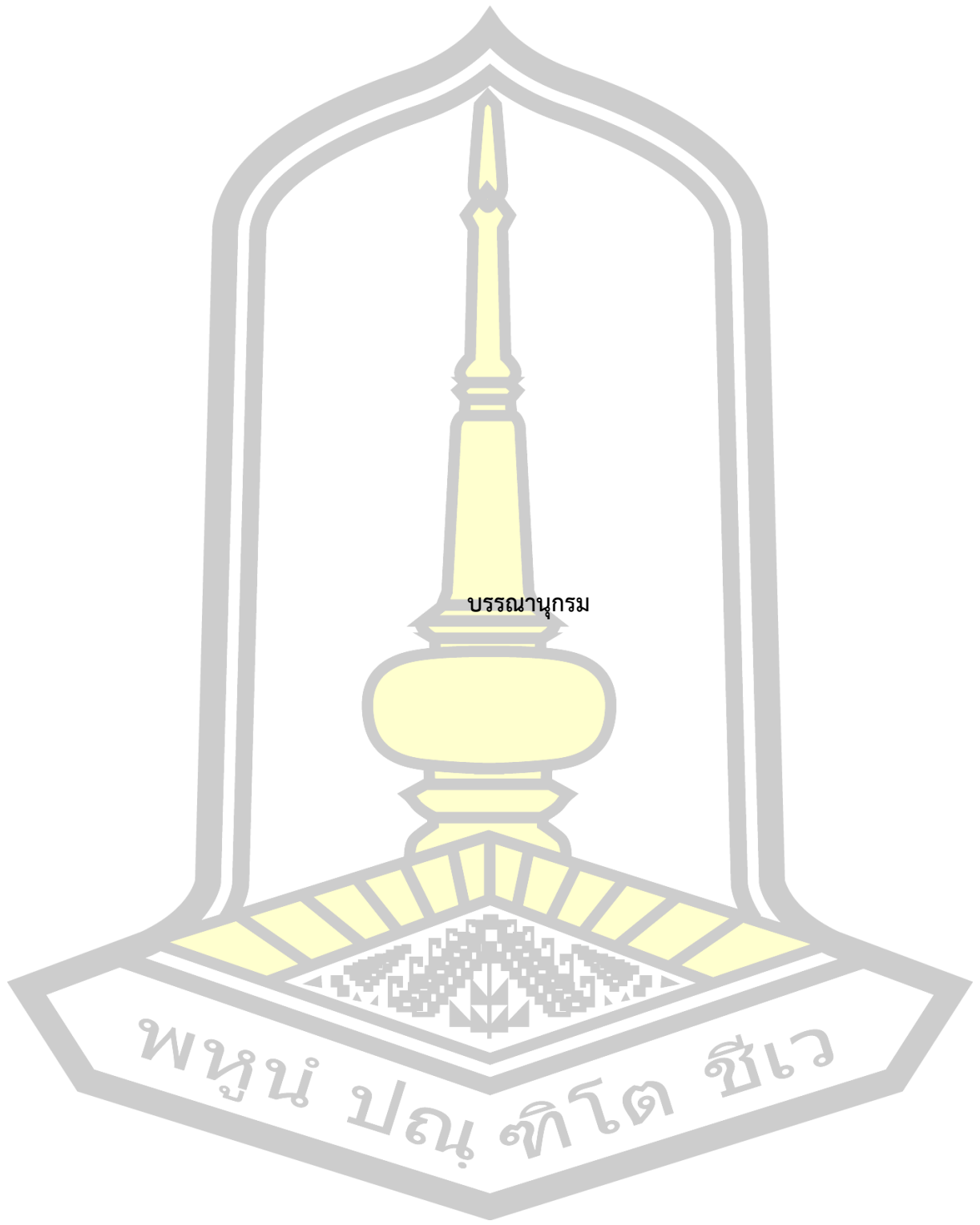
7) สมการที่ทำนายผลการอบแห้งดักแดดใหม่ด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อนได้ดีที่สุด คือ สมการ Page

8) ความหนาแน่นไมโครเวฟที่สูงจะทำให้การอบแห้งมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่สูง จากผลการทดลองการอบแห้งดักแดดใหม่วิธีที่ดีที่สุด คือ การอบแห้งดักแดดใหม่ที่ความหนาแน่นไมโครเวฟ 1.33 วัตต์ต่อกรัม ร่วมกับอุณหภูมิอากาศร้อน 50 องศาเซลเซียส โดยตัดสิ้นจากการใช้พลังงานจำเพาะในการอบแห้งที่น้อยที่สุดและค่าความสว่างของสีมีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับการอบแห้งด้วยอากาศร้อนเพียงอย่างเดียว และเมื่อเปรียบเทียบการค่าสีการอบด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อนและไม่มีความแตกต่างกัน

5.3 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากการใช้วิธีการควบคุมการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้แก่แม่กนิตรอนด้วยวารีแอคทำให้การจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ต่ำจะทำให้แม่กนิตรอนไม่ทำงานหรือทำงานไม่เต็มที่ ดังนั้นจึงควรเลือกใช้แม่กนิตรอนที่กำลังเหมาะสมต่อกำลังงานที่ต้องการใช้งาน เพื่อสามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าแก่แม่กนิตรอนได้เต็มที่ที่จะทำให้แม่กนิตรอนสามารถทำงานได้เต็มที่และมีประสิทธิภาพมากกว่า





บรรณานุกรม

พหุมนุ ปณฺ ทิโต ชีเว

บรรณานุกรม

- กฤษณ์ อภิญญาวิศิษฐ์, อติศักดิ์ นาถกรณกุล, & สมชาติ โสภณรณฤทธิ์. (2560). การออกแบบเครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงต้นแบบ. วารสารวิชาการวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 45, 628-638.
- จรรพงค์ วาฤทธิ์. (2547). เอกสารประกอบการสอนวิชาสมบัติทางกายภาพของผลผลิตเกษตร. เชียงใหม่: ภาควิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- ชวธีร์ ศรีแก้ว, & สิริชัย ส่งเสริมพงษ์. (2555). กระบวนการแปรรูปผักแต่ใหม่อีรี่. Paper presented at the การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ครั้งที่ 50, กรุงเทพฯ.
- ซัชชัย อิเล็กทรอนิกส์. (ม.ป.ป.). แมกนีตรอนที่ใช้ในเตาไมโครเวฟ. Retrieved October 1, 2018, from <https://www.chatchaielec.com/shop/content/4-about-us>.
- ธราวุธ บุญน้อม, สาวิตรี ประภาการ, ญัฐพงษ์ ประภาการ, พรรษา ลิบลับ, & วีรชัย อาจหาญ. (2561). การศึกษากระบวนการผลิตพริกแห้งโดยใช้เตาอบไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนระดับต้นแบบ. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย, 24, 38-46.
- ปองพล สุริยะกันธร, & ฤทธิชัย อัครราชันย์. (2555). แบบจำลองการอบแห้งใบกะเพราด้วยคลื่นไมโครเวฟ. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย, 18, 59-68.
- มะลิ นาชัยสินธ์, & ศักดิ์ชัย ดรดี. (2557). การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนและการแพร่ความชื้นประสิทธิผลของไหลอบแห้ง. วารสารวิจัยเพื่อพัฒนาสังคมและชุมชน มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม, 1, 117-124.
- มารีนา นุ้ยหมิม, สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, & บชญา บุณนาค. (2536). แนวทางอบแห้งสับระดแซ่อิมที่เหมาะสมที่สุด. วารสารวิทยาสารเกษตรศาสตร์ สาขาวิทยาศาสตร์, 27(1), 79-90.
- แม็คเอ็ดดูเคชั่น. (ม.ป.ป.). การเจริญเติบโตของสัตว์. Retrieved October 1, 2018, from <http://www.maceducation.com/e-knowledge/2422210100/13.htm>
- รุ่งนภา พงศสวัสดิ์มานิต. (ม.ป.ป.). เอกสารประกอบการสอนการใช้ไมโครเวฟในการแปรรูปอาหาร กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- วิลัย รังสาทอง. (2547). เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร. กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

- สุคนธ์ ชื่นศรีงาม, & วรณวิบูลย์ กาญจนกุญชร. (2546). คุณภาพอาหารและการควบคุมคุณภาพโดย การตรวจสอบ. In 4 (Ed.), *วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอาหาร*. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- อิลีหย๊ะ สนิโซ, ฟามิรา สะอูดี, & รัชดาภรณ์ ฮานาฟ. (2555). สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น ความ ลื่นเปลื้องพลังงาน และอัตราการระเหยน้ำจำเพาะของการอบแห้งผลหมากด้วยพลังงานความ ร้อนร่วม. *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา*, 17(1), 142-149.
- Aghilinategh, N., Rafiee, S., Hosseinpour, S., Omid, M., & Mohtasebi, S. S. (2015). Optimization of intermittent microwave–convective drying using response surface methodology. *Food Science & Nutrition*, 3(4), 331-341.
- Akgun, N. A., & Doymaz, I. (2005). Modelling of olive cake thin-layer drying process. *Journal of Food Engineering*, 68(4), 455-461.
- Alibas, I. (2007). Energy Consumption and Colour Characteristics of Nettle Leaves during Microwave, Vacuum and Convective Drying. *Biosystems Engineering*, 96(4), 495-502.
- Amjad, W., Crichton, S. O. J., Munir, A., Hensel, O., & Sturm, B. (2018). Hyperspectral imaging for the determination of potato slice moisture content and chromaticity during the convective hot air drying process. *Biosystems Engineering*, 166, 170-183.
- Andrés, A., Bilbao, C., & Fito, P. (2004). Drying kinetics of apple cylinders under combined hot air–microwave dehydration. *Journal of Food Engineering*, 63(1), 71-78.
- Berteli, M. N., & Marsaioli, A. (2005). Evaluation of short cut pasta air dehydration assisted by microwaves as compared to the conventional drying process. *Journal of Food Engineering*, 68(2), 175-183.
- Buffler, C. R. (1993). *Microwave Cooking and Processing*. New York: Springer US.
- Cuccurullo, G., Giordano, L., Metallo, A., & Cinquanta, L. (2017). Influence of mode stirrer and air renewal on controlled microwave drying of sliced zucchini. *Biosystems Engineering*, 158, 95-101.

- Dadali, G., Apar, D. K., & Özbek, B. (2007). Microwave drying kinetics of okra. *Drying Technology*, 25(5), 917-924.
- Das, I., & Arora, A. (2018). Alternate microwave and convective hot air application for rapid mushroom drying. *Journal of Food Engineering*, 223, 208-219.
- Díaz, G. R. z., Martínez-Monzó, J., Fito, P., & Chiralt, A. (2003). Modelling of dehydration-rehydration of orange slices in combined microwave/air drying. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 4(2), 203-209.
- Doymaz, İ. (2007). The kinetics of forced convective air-drying of pumpkin slices. *Journal of Food Engineering*, 79(1), 243-248.
- Fellows, P. J. (2000). Dielectric, ohmic and infrared heating. *Processing Technology*, 18, 365-384.
- Hemis, M., Gariépy, Y., Choudhary, R., & Raghavan, V. (2017). New coupling model of microwave assisted hot-air drying of a capillary porous agricultural product: Application on soybeans and canola seeds. *Applied Thermal Engineering*, 114, 931-937.
- Hii, C. L., Law, C. L., & Cloke, M. (2009). Modeling using a new thin layer drying model and product quality of cocoa. *Journal of Food Engineering*, 90(2), 191-198.
- Li, J., Zu, Y.-G., Fu, Y.-J., Yang, Y.-C., Li, S.-M., Li, Z.-N., & Wink, M. (2010). Optimization of microwave-assisted extraction of triterpene saponins from defatted residue of yellow horn (*Xanthoceras sorbifolia* Bunge.) kernel and evaluation of its antioxidant activity. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 11(4), 637-643.
- Longvah, T., Mangthya, K., & Ramulu, P. (2011). Nutrient composition and protein quality evaluation of eri silkworm (*Samia ricinii*) prepupae and pupae. *Food Chemistry*, 128(2), 400-403.
- Maskan, M. (2001). Kinetics of colour change of kiwifruits during hot air and microwave drying. *Journal of Food Engineering*, 48(2), 169-175.
- Motevali, A., Minaee, S., & Hadi Khoshtagaza, M. (2011). Evaluation of energy consumption in different drying methods. *Energy Conversion and Management*, 52(2), 1192-1199.

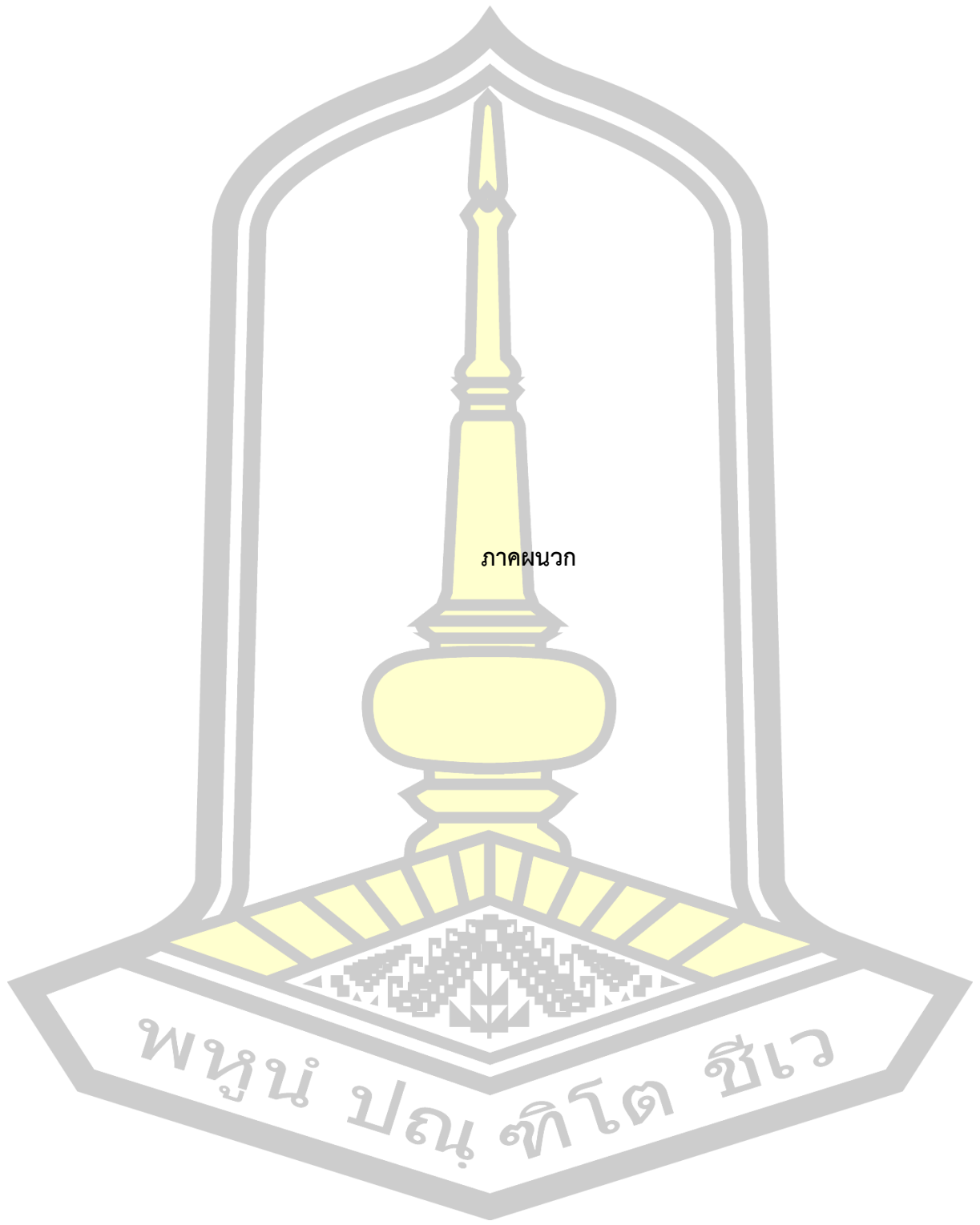
- Nwakuba, N., Kelechi Ejisu, P., & Chijioke Okafor, V. (2017). A mathematical model for predicting the drying rate of cocoa bean (*Theobroma cacao* L.) in a hot air dryer. *Agricultural Engineering International : The CIGR e-journal* 19(3), 195-202.
- Paengkanya, S., Soponronnarit, S., & Nathakaranakule, A. (2015). Application of microwaves for drying of durian chips. *Food and Bioproducts Processing*, 96, 1-11.
- Pereira, N. R., Marsaioli, A., & Ahrné, L. M. (2007). Effect of microwave power, air velocity and temperature on the final drying of osmotically dehydrated bananas. *Journal of Food Engineering*, 81(1), 79-87.
- Piotrowski, D., Lenart, A., & Wardzyński, A. (2004). Influence of osmotic dehydration on microwave-convective drying of frozen strawberries. *Journal of Food Engineering*, 65(4), 519-525.
- Pu, G., Song, G., Song, C., & Wang, J. (2017). Analysis of thermal effect using Coupled Hot-air and Microwave heating at different position of potato. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 41, 244-250.
- Roberts, J. S., Kidd, D. R., & Padilla-Zakour, O. (2008). Drying kinetics of grape seeds. *Journal of Food Engineering*, 89(4), 460-465.
- Rosenthal, I. (1992). Microwave Radiation. In *Electromagnetic Radiations in Food Science*. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Saykova, I., Cwicklinski, G., & Castelle, P. (2009). Analytical approach for predicting effective diffusion coefficients in multidimensional slab geometry. *Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy*, 40, 44-49.
- Silva, C. K. F. d., Silva, Z. E. d., & Mariani, V. C. (2009). Determination of the diffusion coefficient of dry mushrooms using the inverse method. *Journal of Food Engineering*, 95(1), 1-10.
- Singh, R. P., & Heldman, D. R. (2001). Microwave Heating. In *Introduction to Food Engineering 3rd Edition*. London: Academic Press.

- Song, Z., Jing, C., Yao, L., Zhao, X., Sun, J., Wang, W., Ma, C. (2017). Coal slime hot air/microwave combined drying characteristics and energy analysis. *Fuel Processing Technology*, 156, 491-499.
- Soysal, Y., Ayhan, Z., Eştürk, O., & Arkan, M. F. (2009). Intermittent microwave-convective drying of red pepper: Drying kinetics, physical (colour and texture) and sensory quality. *Biosystems Engineering*, 103(4), 455-463.
- Sunjka, P. S., Rennie, T. J., Beaudry, C., & Raghavan, G. S. V. (2004). Microwave-Convective and Microwave-Vacuum Drying of Cranberries: A Comparative Study. *Drying Technology*, 22(5), 1217-1231.
- Tilahun, S. W., Vijaya, R., & Garipey, Y. (2011). Microwave Assisted Hot Air Ventilation Drying of Tomato Slices. *International Conference on Food Engineering and Biotechnology*, 9, 150-161.
- Tsuruta, T., Tanigawa, H., & Sashi, H. (2015). Study on Shrinkage Deformation of Food in Microwave-Vacuum Drying. *Drying Technology*, 33(15-16), 1830-1836.
- Usub, T., Lertsatitthanakorn, C., Poomsa-ad, N., Wiset, L., Yang, L., & Siriamornpun, S. (2008). Experimental performance of a solar tunnel dryer for drying silkworm pupae. *Biosystems Engineering*, 101(2), 209-216.
- Usub, T., Lertsatitthakorn, C., Poomsa-ad, N., Wiset, L., Siriamornpun, S., & Soponronnarit, S. (2010). Thin layer solar drying characteristics of silkworm pupae. *Food and Bioproducts Processing*, 88(2), 149-160.
- Varith, J., Dijkanarukkul, P., Achariyaviriya, A., & Achariyaviriya, S. (2007). Combined microwave-hot air drying of peeled longan. *Journal of Food Engineering*, 81(2), 459-468.
- Wang, J., Xiong, Y.-S., & Yu, Y. (2004). Microwave drying characteristics of potato and the effect of different microwave powers on the dried quality of potato. *European Food Research and Technology*, 219(5), 500-506.
- Wang, N., & Brennan, J. G. (1992). Effect of water binding on the drying behavior of potato. *Drying Technology*, 92, 1350-1359.
- Yang, Y., Tang, L., Tong, L., & Liu, H. (2009). Silkworms culture as a source of protein for humans in space. *Advances in Space Research*, 43(8), 1236-1242.

Yongsawatdigul, J., & Gunasekaran, S. (1996). Microwave-vacuum drying of cranberries:part I. Energy use and efficiency. *Journal of Food Processing and Preservation*, 20(2), 121-143.

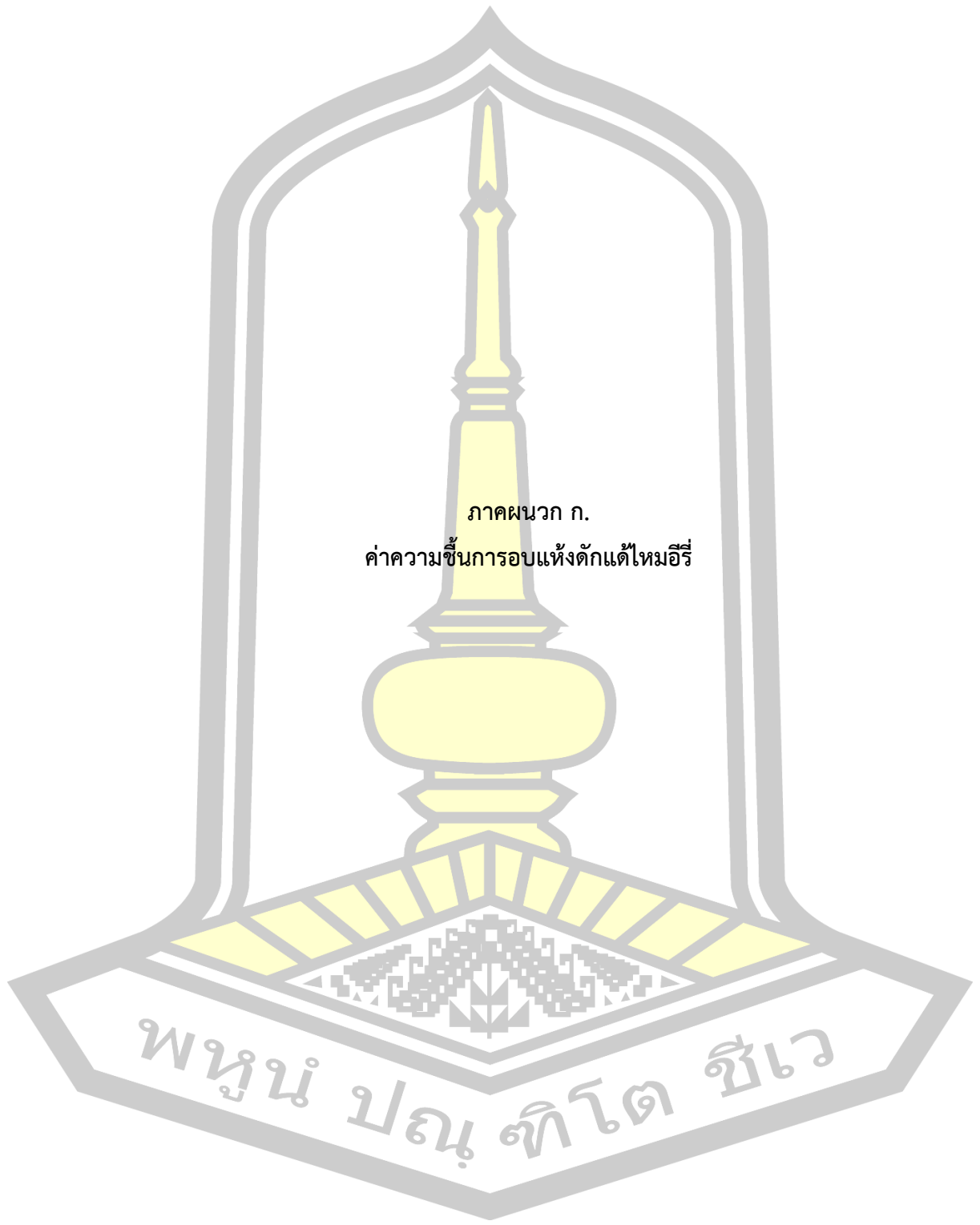
Zhou, J., & Han, D. (2006). Safety evaluation of protein of silkworm (*Antheraea pernyi*) pupae. *Food and Chemical Toxicology*, 44(7), 1123-1130.





ภาคผนวก

พหุ ประจักษ์ ชัยเว



ภาคผนวก ก.

ค่าความขึ้นการอบแห้งดักแต่ไหมอีรี

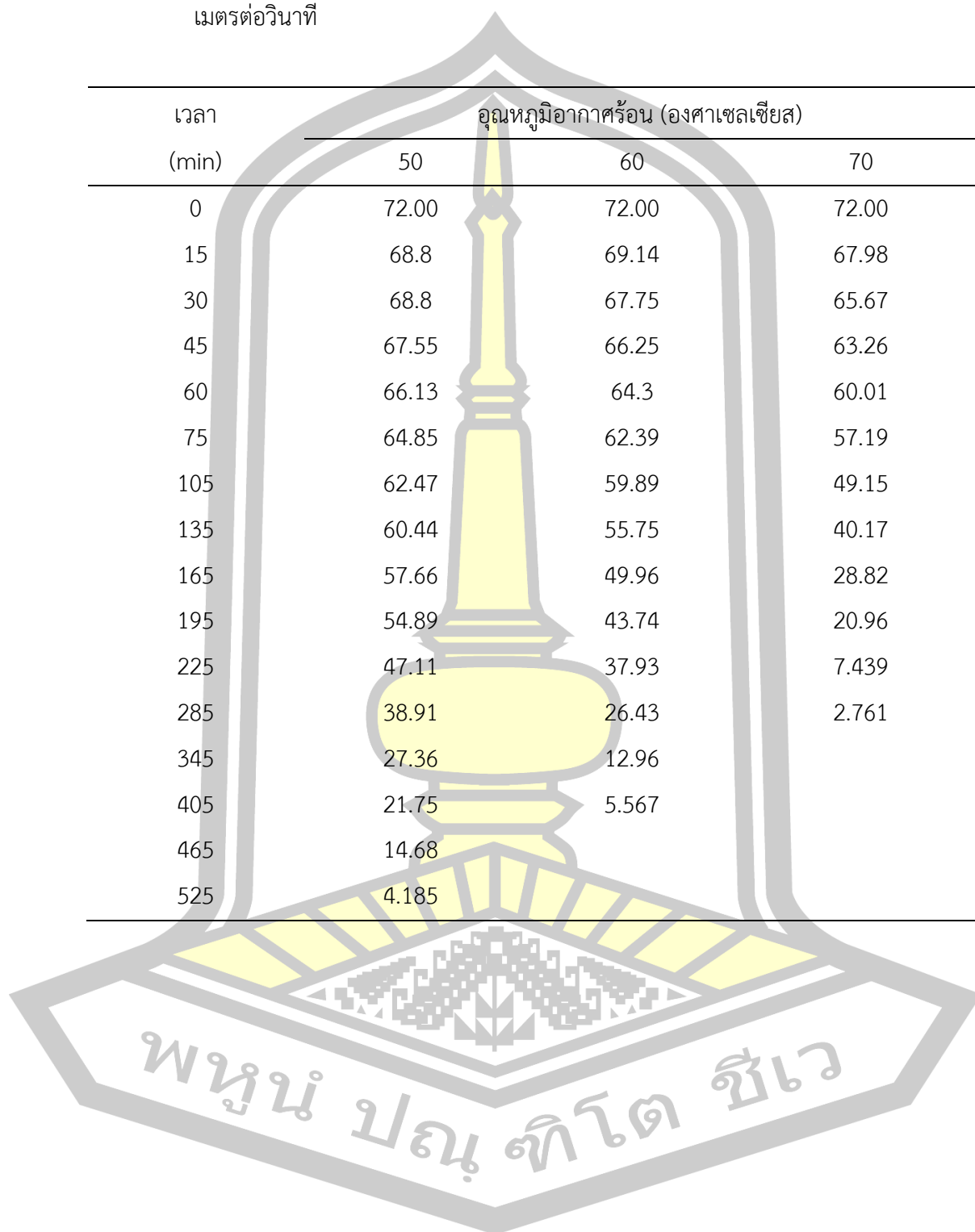
พหุจน์ ปณฺ ทิโต ชีเว

ตาราง ก.1 ค่าความชื้นการอบแห้งดักแต่ใหม่อิรีด้วยอากาศร้อนเพียงอย่างเดียวที่ความเร็วลม 0.5 เมตรต่อวินาที

เวลา (min)	อุณหภูมิอากาศร้อน (องศาเซลเซียส)		
	50	60	70
0	72.00	72.00	72.00
15	69.27	69.24	68.48
30	68.87	68.07	68.26
45	68.42	67.43	66.89
60	67.99	66.56	66.13
75	67.57	65.77	64.33
105	66.46	63.77	62.06
135	65.19	62.32	58.46
165	64.29	59.53	53.39
195	63.22	58.66	48.96
225	62.01	58.11	42.93
285	59.45	55.51	37.79
345	58.01	49.36	30.41
405	55.08	43.00	15.30
465	50.24	32.22	4.05
525	49.68	22.42	
585	43.45	13.22	
645	41.14	3.01	
705	32.38		
765	26.59		
825	23.48		
885	13.51		
945	10.21		
1005	2.39		

ตาราง ก.2 ค่าความชื้นการอบแห้งดักแด่ไหมอีรีด้วยอากาศร้อนเพียงอย่างเดียวที่ความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที

เวลา (min)	อุณหภูมิอากาศร้อน (องศาเซลเซียส)		
	50	60	70
0	72.00	72.00	72.00
15	68.8	69.14	67.98
30	68.8	67.75	65.67
45	67.55	66.25	63.26
60	66.13	64.3	60.01
75	64.85	62.39	57.19
105	62.47	59.89	49.15
135	60.44	55.75	40.17
165	57.66	49.96	28.82
195	54.89	43.74	20.96
225	47.11	37.93	7.439
285	38.91	26.43	2.761
345	27.36	12.96	
405	21.75	5.567	
465	14.68		
525	4.185		



ตาราง ก.3 ค่าความขึ้นการอบแห้งดักแด่ใหม่อีรีด้วยกำลังไมโครเวฟที่ความหนาแน่นไมโครเวฟ 0.67 วัตต์ต่อกรัม ที่ความเร็วลม 1 เมตรต่อวินาที

เวลา (min)	อุณหภูมิอากาศร้อน (องศาเซลเซียส)		
	50	60	70
0	72.00	72.00	72.00
3	70.44	69.49	70.85
6	68.20	63.60	60.81
9	59.48	58.02	56.10
12	48.39	48.00	49.26
15	44.22	43.08	40.21
18	35.28	35.36	30.41
21	24.75	23.35	9.00
24	12.15	11.77	
27			

ตาราง ก.4 ค่าความขึ้นการอบแห้งดักแด่ใหม่อีรีด้วยความหนาแน่นไมโครเวฟ 1.33 วัตต์ต่อกรัม ที่ความเร็วลม 1 เมตรต่อวินาที

เวลา (min)	อุณหภูมิอากาศร้อน (องศาเซลเซียส)		
	50	60	70
0	72.00	72.00	72.00
3	66.81	65.73	52.09
6	58.64	53.78	26.97
9	46.37	35.31	14.87
12	33.00	23.24	8.24
15	24.93	15.94	
18	10.54	9.00	

ตาราง ก.5 ค่าความชื้นการอบแห้งดักแด่ใหม่อี่รีความหนาแน่นไมโครเวฟ 2.00 วัตต์ต่อกรัม ที่
ความเร็วลม 1 เมตรต่อวินาที

เวลา (min)	อุณหภูมิอากาศร้อน (องศาเซลเซียส)		
	50	60	70
0	72.00	72.00	72.00
3	63.89	63.70	61.60
6	46.46	46.45	44.85
9	29.06	20.86	27.40
12	10.51	10.91	9.86
15			

ตาราง ก.6 ค่าความชื้นการอบแห้งดักแด่ใหม่อี่รีความหนาแน่นไมโครเวฟ 0.67 วัตต์ต่อกรัม ที่
ความเร็วลม 2 เมตรต่อวินาที

เวลา (min)	อุณหภูมิอากาศร้อน (องศาเซลเซียส)		
	50	60	70
0	72.00	72.00	72.00
3	70.44	69.49	68.85
6	68.20	63.60	60.81
9	59.48	58.02	56.10
12	48.39	48.00	49.26
15	44.22	43.08	40.21
18	35.28	35.36	30.41
21	24.75	23.35	7.00
24	12.15	11.77	

ตาราง ก.7 ค่าความชื้นการอบแห้งดักแด่ไหมอีรี่ความหนาแน่นไมโครเวฟ 1.33 วัตต์ต่อกรัม ที่
ความเร็วลม 2 เมตรต่อวินาที

เวลา (min)	อุณหภูมิอากาศร้อน (องศาเซลเซียส)		
	50	60	70
0	72.00	72.00	72.00
3	66.81	65.73	52.09
6	58.64	53.78	26.97
9	46.37	35.31	14.87
12	33.00	23.24	8.24
15	24.93	15.94	
18	9.54	9.00	

ตาราง ก.8 ค่าความชื้นการอบแห้งดักแด่ไหมอีรี่ ความหนาแน่นไมโครเวฟ 2.00 วัตต์ต่อกรัม ที่
ความเร็วลม 2 เมตรต่อวินาที

เวลา (min)	อุณหภูมิอากาศร้อน (องศาเซลเซียส)		
	50	60	70
0	72.00	72.00	72.00
3	61.21	59.62	63.75
6	45.00	45.75	47.64
9	30.92	34.64	31.14
12	9.89	21.96	19.63
15		8.05	9.00

พหุ ประถมศึกษา

ตาราง ก.9 ค่าความชื้นการอบแห้งดักแต่ใหม่อี่รีความหนาแน่นไมโครเวฟ 0.67 วัตต์ต่อกรัม
ที่ความเร็วลม 1 เมตรต่อวินาที

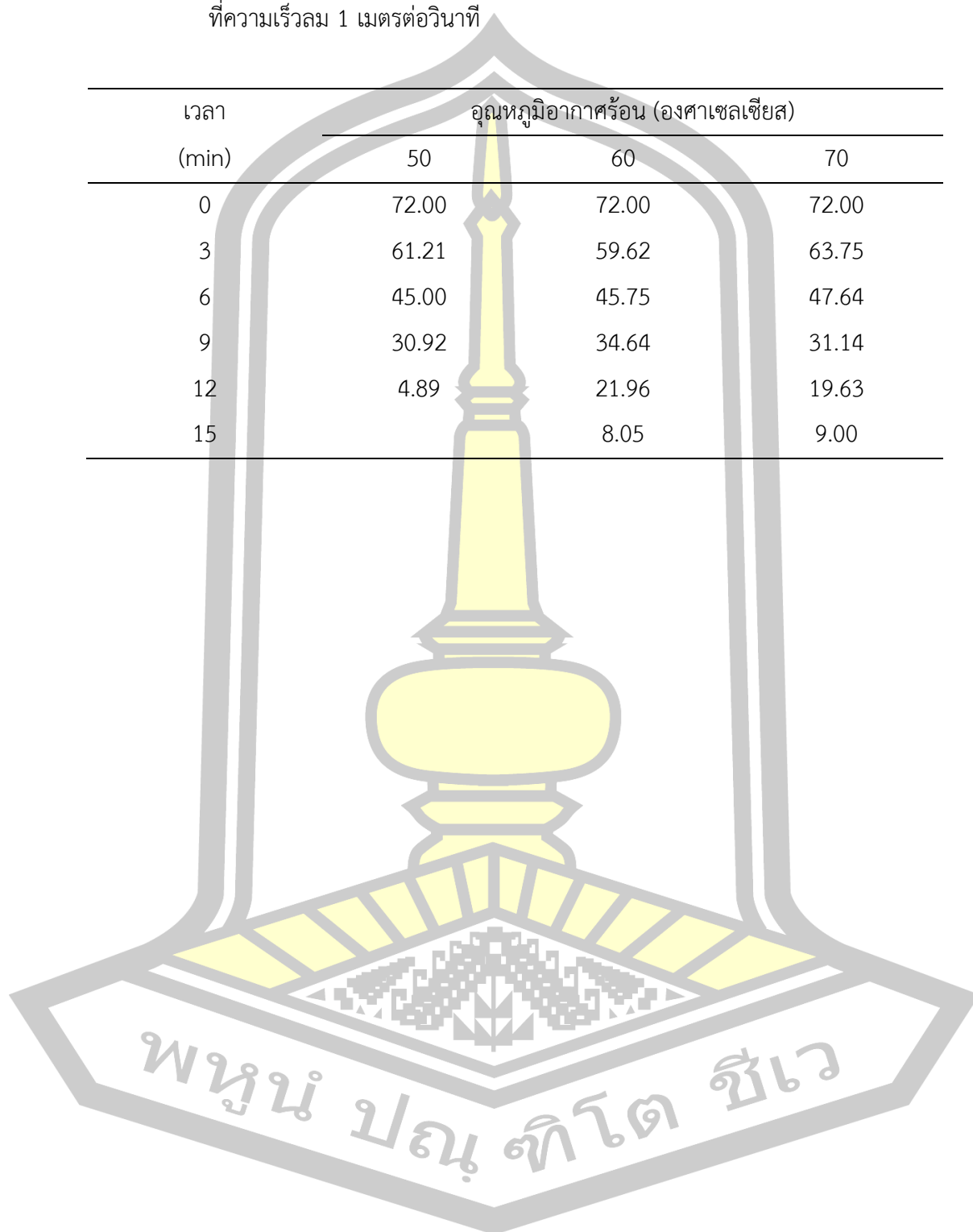
เวลา (min)	อุณหภูมิอากาศร้อน (องศาเซลเซียส)		
	50	60	70
0	72.00	72.00	72.00
3	70.44	69.49	70.85
6	68.20	63.60	60.81
9	59.48	58.02	56.10
12	48.39	48.00	49.26
15	44.22	43.08	40.21
18	35.28	35.36	30.41
21	24.75	23.35	7.00
24	12.15	11.77	

ตาราง ก.10 ค่าความชื้นการอบแห้งดักแต่ใหม่อี่รีความหนาแน่นไมโครเวฟ 1.00 วัตต์ต่อกรัม
ที่ความเร็วลม 1 เมตรต่อวินาที

เวลา (min)	อุณหภูมิอากาศร้อน (องศาเซลเซียส)		
	50	60	70
0	72.00	72.00	72.00
3	66.81	65.73	52.09
6	58.64	53.78	32.97
9	46.37	35.31	20.87
12	33.00	23.24	11.24
15	24.93	15.94	
18	11.54	9.00	

ตาราง ก.11 ค่าความชื้นการอบแห้งดักแต่ใหม่อี่ีความหนาแน่นไมโครเวฟ 1.33 วัตต์ต่อกรัม
ที่ความเร็วลม 1 เมตรต่อวินาที

เวลา (min)	อุณหภูมิอากาศร้อน (องศาเซลเซียส)		
	50	60	70
0	72.00	72.00	72.00
3	61.21	59.62	63.75
6	45.00	45.75	47.64
9	30.92	34.64	31.14
12	4.89	21.96	19.63
15		8.05	9.00



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายมงคลชัย คำปากดี
วันเกิด	วันที่ 15 กรกฎาคม พ.ศ. 2522
สถานที่เกิด	จังหวัดอุดรธานี ประเทศไทย
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 744 ถนนสุนทรารายณ์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา รหัสไปรษณีย์ 30000
ตำแหน่งหน้าที่การงาน	อาจารย์
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา รหัสไปรษณีย์ 30000
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2546 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาค ตะวันออกเฉียงเหนือ พ.ศ. 2553 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องค์กรักษ์ พ.ศ. 2561 ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (ปร.ด.) สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

พูน ปณ ทัโต ชีเว