

การอบแห้งมันชันด้วยเครื่องอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด

ณัฐพล กระจ่าง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
กรกฎาคม 2560
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณา
วิทยานิพนธ์ของ ธีรพล กระจ่าง ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ ของมหาวิทยาลัยบูรพาได้

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์

.....
(ดร.ณรงค์ อังกิมบัววน) อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....
(ดร.กิตติศักดิ์ วิธินันทกิตต์) ประธาน

.....
(ดร.ณรงค์ อังกิมบัววน) กรรมการ

.....
(ดร.อรรถพล เขยสุภเกตต์) กรรมการ

.....
(ดร.อภิชาติ เนียมวงษ์) กรรมการ

คณะวิทยาศาสตร์อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ของมหาวิทยาลัยบูรพา

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกรัฐ ศรีสุข) คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

วันที่ 31 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2560...

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาจาก ดร.ณรงค์ อึ้งกิม boon อาจารย์ที่ปรึกษา ที่กรุณาให้คำแนะนำแนวทางที่ถูกต้อง ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความละเอียดถี่ถ้วนและเอาใจใส่ด้วยดีเสมอมา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณ ดร.กิตติศักดิ์ วิธินันท์กิตต์ ดร.อรรถพล เชยสุภเกตุ และ ดร.อภิชาติ เนียมวงษ์ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำข้อคิดเห็น อันเป็นประโยชน์ และแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณคณะวิทยาศาสตร์ ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา ที่มอบทุนสนับสนุนให้ลาศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ รวมถึงการอนุญาตให้ลาศึกษาต่อในบางส่วนตลอดจนจบหลักสูตร

ขอขอบพระคุณคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่มอบทุนสนับสนุนการนำเสนอผลงานในการประชุมวิชาการระดับชาติ “วิทยาศาสตร์วิจัย” ครั้งที่ 8 และขอขอบคุณอาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ ที่ นื่องนิสิตปริญญาโท ภาควิชาฟิสิกส์ ที่ให้ความช่วยเหลือ และให้คำปรึกษาในด้านต่าง ๆ เป็นอย่างดี นอกจากนี้ ขอขอบคุณภาควิชาวิทยาศาสตร์การอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่ให้ความอนุเคราะห์ทางด้านเครื่องมือ อุปกรณ์ ที่ใช้ในการดำเนินการวิจัยจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จด้วยดี

ท้ายสุดขอขอบพระคุณ คุณพ่อเอนก คุณแม่ประยงค์ กระจ่าง นื่องชาย ญาติพี่น้อง และเพื่อน ๆ ที่ให้การสนับสนุนผู้วิจัยในทุก ๆ ด้าน ทั้งกำลังใจ การช่วยเหลือต่าง ๆ และทุนทรัพย์ในการศึกษามาโดยตลอด

คุณค่าและประโยชน์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นกตัญญูคุณเวทิตา แต่บุพการี บูรพาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่านทั้งในอดีตและปัจจุบัน ที่ทำให้ข้าพเจ้าเป็นผู้มีการศึกษาและประสบความสำเร็จมาจนตราบเท่าทุกวันนี้

ณัฐพล กระจ่าง

56910031: สาขาวิชา: ฟิสิกส์; วท.ม. (ฟิสิกส์)

คำสำคัญ: ขมิ้นชัน/ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ/ แบบจำลองการอบแห้ง/ รังสีอินฟราเรด
ลมร้อน/ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล

ัญญผล กระจ่าง: การอบแห้งขมิ้นชันด้วยเครื่องอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสี

อินฟราเรด (TURMERIC DRYING USING COMBINED HOT AIR AND INFRARED RADIATION) คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์: ณรงค์ อึ้งกิมบัวน, ปร.ด. 153 หน้า, ปี พ.ศ. 2560.

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งและปัจจัยของสภาวะที่มีผลต่อการอบแห้งขมิ้นชัน เพื่อหาแบบจำลองการอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมและค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล ศึกษาค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้ง และสีของขมิ้นชันภายหลังการอบแห้ง โดยทำการทดลองอบแห้งภายใต้สภาวะการอบแห้งที่แตกต่างกัน 4 เงื่อนไข ได้แก่ การอบแห้งลมร้อน การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดโดยไม่ควบคุมอุณหภูมิอากาศอบแห้งและควบคุมอุณหภูมิอากาศอบแห้ง และการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด โดยที่ในทุกการทดลองที่อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดจะใช้กำลังอินฟราเรดเท่ากับ 600 800 และ 1,000 W อุณหภูมิอากาศอบแห้งเท่ากับ 40 50 และ 60 °C สำหรับกรณีที่ใช้ลมร้อนจะใช้ความเร็วของอากาศเท่ากับ 0.5 m/s โดยที่ความชื้นเริ่มต้นของขมิ้นชันอยู่ในช่วง 420-640 % (d.b.) และอบแห้งจนเหลือความชื้นสุดท้ายอยู่ในช่วง 5-10 % (d.b.)

ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งของขมิ้นชัน พบว่า อัตราการอบแห้งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและกำลังของอินฟราเรด โดยที่การอบแห้งที่อุณหภูมิและกำลังของอินฟราเรดสูงขึ้นส่งผลให้อัตราการอบแห้งมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลขึ้นอยู่กับอุณหภูมิสำหรับการอบแห้งขมิ้นชันด้วยลมร้อน และอัตราส่วนของน้ำหนักของตัวอย่างต่อกำลังของอินฟราเรดสำหรับการอบแห้งขมิ้นชันด้วยรังสีอินฟราเรดตามรูปแบบสมการของ Arrhenius โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลมีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและกำลังของอินฟราเรด

ผลการวิเคราะห์แบบจำลองการอบแห้งชั้นบางขมิ้นชัน สรุปได้ว่า แบบจำลองของ Two Term สามารถทำนายผลจลนพลศาสตร์การอบแห้งของขมิ้นชันด้วยลมร้อนได้ดีที่สุด ในส่วนของการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดและการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด พบว่าแบบจำลองของ Midilli *et al.* สามารถใช้อธิบายผลการทดลองได้เป็นอย่างดี

ในส่วนของการวิเคราะห์ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งขมิ้นชัน พบว่า ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มกำลังอินฟราเรด แต่มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิลมร้อน ขณะที่การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะการอบแห้งอื่น ๆ

สำหรับการวิเคราะห์ค่าสีของขมิ้นชันภายหลังการอบแห้ง พบว่า สภาวะการอบแห้งด้วยลมร้อนและลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดให้ค่าความสว่าง (L^*) ค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) และค่าความเป็นสีแดง (a^*) ใกล้เคียงกันและไม่มี ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) สำหรับการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดการเพิ่มอุณหภูมิมอบแห้งทำให้ค่าความสว่าง (L^*) และค่าความเป็นสีแดง (a^*) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) มีค่าไม่แตกต่างกัน ใดๆก็ดี สภาวะการอบแห้งขมิ้นชันด้วยลมร้อนและลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดมีค่าการเปลี่ยนแปลงของสีโดยรวม (ΔE) น้อยกว่าสภาวะการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด

56910031: MAJOR: PHYSICS; M.Sc. (PHYSICS)

KEYWORDS: EFFECTIVE MOISTURE DIFFUSIVITY/ HOT AIR/ INFRARED

RADIATION/ MODEL/ SPECIFIC ENERGY CONSUMPTION/ TURMERIC

NATTAPON KRACHANG: TURMERIC DRYING USING COMBINED HOT AIR AND INFRARED RADIATION. ADVISORY COMMITTEE: NARONG UENKIMBUAN, Ph.D. 153 P. 2017.

The objectives of this research were to study the drying kinetics and effect of drying conditions on turmeric drying to find out the suitable thin layer model and effective moisture diffusivity of turmeric drying and to study the specific energy consumption and color of dried turmeric samples. Four different drying conditions were carried out using hot air drying, infrared drying with and without air temperature control and combined hot air and infrared drying. The drying conditions were conducted on infrared powers of 600, 800 and 1,000 W, with drying air temperatures of 40, 50 and 60 °C, and hot air velocity of 0.5 m/s. The initial moisture contents of turmeric were between 420 and 640 % (d.b.). After drying the final moisture contents of dried turmeric were between 5 and 10 % (d.b.).

The experimental results showed that the drying rate depended on the drying air temperature and the infrared radiation power. The experiment was found that the increasing of infrared power and temperature caused the increasing of drying rate. Moreover, the effective moisture diffusivity depended on drying temperature for hot air drying and ratio of sample weight to infrared power for infrared drying. They were showed in the Arrhenius equation.

The statistical analysis was simulated using empirical drying model. The results showed that Two Term model had a good description on drying of turmeric using hot air drying. For infrared drying and combined hot air and infrared drying, additionally, the simulated values using Midilli *et al.* model had a good description to the experimental drying.

For the analysis of specific energy consumption, the results showed that specific energy consumption decreased with increase of infrared power, but increased with increase of hot air temperature while the infrared drying had lower specific energy consumption than the other drying conditions.

For the quality analysis of dried turmeric the experiment results showed that the lightness (L^*), yellowness (b^*) and redness (a^*) of dried turmeric with hot air and combined hot air and infrared drying conditions had no significant ($p > 0.05$). Additionally, the experiment was found that the increasing of temperature made the lightness (L^*) and redness (a^*) higher, while, the yellowness (b^*) had a similar values for infrared drying. However, the total color difference (ΔE) of turmeric drying using hot air and combined hot air and infrared were less than infrared drying conditions.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ต
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย.....	3
ขอบเขตของการวิจัย.....	3
สถานที่ทำการวิจัย.....	4
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับขมิ้นชัน.....	5
หลักการอบแห้งเบื้องต้น.....	6
วิธีการอบแห้ง.....	9
ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการอบแห้ง.....	10
ความชื้นของวัสดุ.....	11
การอบแห้งด้วยอากาศร้อนหรือลมร้อน.....	12
การอบแห้งโดยใช้รังสีอินฟราเรด.....	13
การประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้ง.....	14
การวิเคราะห์หีสี.....	15
สมการการอบแห้งทางทฤษฎี.....	17
ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล.....	19
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	20
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	22

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	27
วัตถุประสงค์.....	27
อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	28
วิธีดำเนินการวิจัย.....	32
4 ผลการวิจัย.....	36
ผลการทดลองหาจลนพลศาสตร์และปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้งขมิ้นชัน	
ที่สภาวะการอบแห้งต่าง ๆ.....	36
ผลการเปรียบเทียบปัจจัยของแหล่งพลังงานที่ใช้ในการการอบแห้งขมิ้นชัน	
ที่สภาวะการอบแห้งต่าง ๆ.....	47
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งชั้นบางขมิ้นชัน.....	52
ผลการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล.....	83
ความเปลี่ยนแปลงของพลังงานจำเพาะในการอบแห้งขมิ้นชัน.....	87
สีของขมิ้นชันภายหลังการอบแห้ง.....	91
5 อภิปรายและสรุปผล.....	95
สรุปผลการทดลอง.....	95
ข้อเสนอแนะ.....	98
บรรณานุกรม.....	99
ภาคผนวก.....	102
ภาคผนวก ก.....	103
ภาคผนวก ข.....	116
ประวัติย่อของผู้วิจัย.....	153

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบเอมพิริคัลสำหรับทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้ง.....	21
4.1 ผลทางสถิติที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางขมึนชั้นด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 40 °C.....	55
4.2 ผลทางสถิติที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางขมึนชั้นด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 °C.....	56
4.3 ผลทางสถิติที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางขมึนชั้นด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 °C.....	57
4.4 ผลทางสถิติที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางขมึนชั้นด้วยกำลังของรังสีอินฟราเรด 600 W.....	58
4.5 ผลทางสถิติที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางขมึนชั้นด้วยกำลังของรังสีอินฟราเรด 800 W.....	59
4.6 ผลทางสถิติที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางขมึนชั้นด้วยกำลังของรังสีอินฟราเรด 1,000 W.....	60
4.7 ผลทางสถิติที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางขมึนชั้นด้วยกำลังของรังสีอินฟราเรด 600 W ที่อุณหภูมิ 40 °C.....	61
4.8 ผลทางสถิติที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางขมึนชั้นด้วยกำลังของรังสีอินฟราเรด 600 W ที่อุณหภูมิ 50 °C.....	62
4.9 ผลทางสถิติที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางขมึนชั้นด้วยกำลังของรังสีอินฟราเรด 600 W ที่อุณหภูมิ 60 °C.....	63
4.10 ผลทางสถิติที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางขมึนชั้นด้วยกำลังของรังสีอินฟราเรด 800 W ที่อุณหภูมิ 40 °C.....	64
4.11 ผลทางสถิติที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางขมึนชั้นด้วยกำลังของรังสีอินฟราเรด 800 W ที่อุณหภูมิ 50 °C.....	65
4.12 ผลทางสถิติที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางขมึนชั้นด้วยกำลังของรังสีอินฟราเรด 800 W ที่อุณหภูมิ 60 °C.....	66

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.25	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อนประสิทธิภาพของสภาวะการอบแห้งไขมันชั้น ด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรด..... 85
4.26	ค่าความสิ้นเปลืองของพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งไขมันชั้น..... 88
4.27	ผลการวิเคราะห์ค่าสีของไขมันชั้นภายหลังการอบแห้งที่สภาวะการอบแห้งต่าง ๆ... 92
ก.1	ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความชื้นจากการทดลองอบแห้งไขมันชั้นด้วยลมร้อน..... 104
ก.2	ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความชื้นจากการทดลองอบแห้งไขมันชั้น ด้วยรังสีอินฟราเรด..... 107
ก.3	ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความชื้นจากการทดลองอบแห้งไขมันชั้น ด้วยรังสีอินฟราเรดที่ 600 W แบบควบคุมอุณหภูมิอบแห้ง..... 118
ก.4	ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความชื้นจากการทดลองอบแห้งไขมันชั้น ด้วยรังสีอินฟราเรดที่ 800 W แบบควบคุมอุณหภูมิอบแห้ง..... 110
ก.4	ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความชื้นจากการทดลองอบแห้งไขมันชั้น ด้วยรังสีอินฟราเรดที่ 1,000 W แบบควบคุมอุณหภูมิอบแห้ง..... 112
ก.6	ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความชื้นจากการทดลองอบแห้งไขมันชั้น ด้วยลมร้อนร่วมรังสีอินฟราเรดที่ 600 W..... 113
ก.7	ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความชื้นจากการทดลองอบแห้งไขมันชั้น ด้วยลมร้อนร่วมรังสีอินฟราเรดที่ 800 W..... 114
ก.8	ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความชื้นจากการทดลองอบแห้งไขมันชั้น ด้วยลมร้อนร่วมรังสีอินฟราเรดที่ 1,000 W..... 115
ข.1	ข้อมูลอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบาง ไขมันชั้นด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 40 °C..... 117
ข.2	ข้อมูลอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบาง ไขมันชั้นด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 °C..... 122
ข.3	ข้อมูลอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบาง ไขมันชั้นด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 °C..... 125

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า	
ข.17	ข้อมูลอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบาง ขมิ้นชันด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดที่ 600 W อุณหภูมิ 50 °C.....	145
ข.18	ข้อมูลอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบาง ขมิ้นชันด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดที่ 600 W อุณหภูมิ 60 °C.....	146
ข.19	ข้อมูลอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบาง ขมิ้นชันด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดที่ 800 W อุณหภูมิ 40 °C.....	147
ข.20	ข้อมูลอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบาง ขมิ้นชันด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดที่ 800 W อุณหภูมิ 50 °C.....	148
ข.21	ข้อมูลอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบาง ขมิ้นชันด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดที่ 800 W อุณหภูมิ 60 °C.....	149
ข.22	ข้อมูลอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบาง ขมิ้นชันด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดที่ 1,000 W อุณหภูมิ 40 °C.....	150
ข.23	ข้อมูลอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบาง ขมิ้นชันด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดที่ 1,000 W อุณหภูมิ 50 °C.....	151
ข.24	ข้อมูลอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบาง ขมิ้นชันด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดที่ 1,000 W อุณหภูมิ 60 °C.....	152

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 ลักษณะของไขมันชั้น.....	5
2.2 อัตราการอบแห้งเทียบกับเวลา.....	7
2.3 แสดงสเปกตรัมการแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเนื่องจากอุณหภูมิของวัตถุ.....	13
2.4 แผนภาพสีแสดง value chroma และ hue.....	16
2.5 แผนภาพแสดง CIE Lab แสดง L*, a*, b* color space.....	17
3.1 ไขมันชั้นสด.....	27
3.2 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัลยี่ห้อ Sartorius รุ่น TE 3102S ที่มีความละเอียด ± 0.01 กรัม.....	28
3.3 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัลยี่ห้อ Sartorius รุ่น TE 313S ที่มีความละเอียด ± 0.001 กรัม.....	28
3.4 เครื่องวัดความเร็วลม.....	29
3.5 กระป๋องอลูมิเนียมสำหรับหาความชื้น.....	29
3.6 ตู้อบไฟฟ้า ยี่ห้อ Binder.....	29
3.7 เครื่องวัดสียี่ห้อ Hunter Lab รุ่น Color Flex.....	30
3.7 เครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดระดับห้องปฏิบัติการ.....	30
3.8 แสดงตำแหน่งส่วนประกอบหลักของเครื่องอบแห้งแบบลมร้อน ร่วมกับรังสีอินฟราเรด.....	31
4.1 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นกับเวลาของการอบแห้งไขมันชั้น ด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 °C.....	37
4.2 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นกับเวลาของการอบแห้งไขมันชั้น ด้วยกำลังอินฟราเรด 600 800 และ 1,000 W.....	38
4.3 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นกับเวลาของการอบแห้งไขมันชั้น ด้วยกำลังอินฟราเรด 600 W (ก) 800 W (ข) และ 1,000 W (ค) ที่อุณหภูมิอบแห้ง 40 50 และ 60 °C.....	40

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.4 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นกับเวลาของการอบแห้งขมิ้นชัน ด้วยกำลังอินฟราเรด 600 W 800 W และ 1,000 W โดยเปรียบเทียบที่ ที่อุณหภูมิอบแห้งเท่ากับ 40 °C (ก) 50 °C (ข) และ 60 °C (ค).....	42
4.5 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นกับเวลาของการอบแห้งขมิ้นชันด้วยลมร้อน ร่วมกับรังสีอินฟราเรด และการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่อุณหภูมิลมร้อน เท่ากับ 40 50 และ 60 °C กำลังอินฟราเรด 600 W (ก) 800 W (ข) และ 1,000 W (ค)	44
4.6 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นกับเวลาของการอบแห้งขมิ้นชันด้วยลมร้อน ร่วมกับรังสีอินฟราเรด ที่กำลังอินฟราเรด 600 800 และ 1,000 W ที่อุณหภูมิลมร้อน 40 °C (ก) 50 °C (ข) และ 60 °C (ค).....	46
4.7 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นกับเวลาของการอบแห้งขมิ้นชันระหว่าง การอบแห้งขมิ้นชันด้วยแหล่งพลังงานความร้อนต่าง ๆ ที่กำลังอินฟราเรด 600 W ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 40 °C (ก) 50 °C (ข) และ 60 °C (ค).....	48
4.8 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นกับเวลาของการอบแห้งขมิ้นชันระหว่าง การอบแห้งขมิ้นชันด้วยแหล่งพลังงานความร้อนต่าง ๆ ที่กำลังอินฟราเรด 800 W ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 40 °C (ก) 50 °C (ข) และ 60 °C (ค).....	50
4.9 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นกับเวลาของการอบแห้งขมิ้นชันระหว่าง การอบแห้งขมิ้นชันด้วยแหล่งพลังงานความร้อนต่าง ๆ ที่กำลังอินฟราเรด 1,000 W ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 40 °C (ก) 50 °C (ข) และ 60 °C (ค).....	51
4.10 การเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนความชื้นกับเวลาของการอบแห้งขมิ้นชันที่ได้จาก การทดลองและจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ดีที่สุดสำหรับการอบแห้ง ขมิ้นชันด้วยลมร้อนอุณหภูมิต่ำกว่า 40 50 และ 60 °C.....	79
4.11 การเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนความชื้นกับเวลาของการอบแห้งขมิ้นชันที่ได้จาก การทดลองและจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ดีที่สุดสำหรับการอบแห้ง ขมิ้นชันด้วยกำลังอินฟราเรด 600 800 และ 1,000 W.....	80

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.12 การเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนความชื้นกับเวลาของการอบแห้งขมิ้นชันที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ดีที่สุดสำหรับการอบแห้งขมิ้นชันที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 °C กำลังอินฟราเรด 600 W (ก) 800 W (ข) และ 1,000 W (ค).....	81
4.13 การเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนความชื้นกับเวลาของการอบแห้งขมิ้นชันที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ดีที่สุดสำหรับการอบแห้งที่อุณหภูมิลมร้อน 40 50 และ 60 °C กำลังอินฟราเรด 600 W (ก) 800 W (ข) และ 1,000 W (ค).....	83
4.14 การเปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งขมิ้นชันด้วยลมร้อนที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 °C.....	86
4.15 การเปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งขมิ้นชันด้วยลมร้อนที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่กำลัง 600 800 และ 1,000 W.....	87

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ขมิ้นชันมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Curcuma longa* Linn และมีชื่อสามัญว่า Turmeric ขมิ้นชันจัดเป็นพืชล้มลุกในวงศ์ขิงและเป็นพืชสมุนไพรที่สำคัญ ประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกขมิ้นชันประมาณ 5,000 ไร่ ไร่ละ 90 อยู่ในภาคใต้ ส่วนใหญ่ปลูกเป็นพืชรอง หรือพืชเสริมรายได้ การปลูกเป็นพืชเดี่ยวมีน้อยมากทำให้ไม่มีการเก็บสถิติเนื้อที่ปลูกและผลผลิต แหล่งปลูกที่สำคัญได้แก่ สุราษฎร์ธานี นครศรีธรรมราช พังงา ชุมพร พัทลุง ปราณบุรี ละแม ชะเชิงเทรา สระแก้ว ชลบุรี กาญจนบุรี และนครราชสีมา ผลผลิตรวมทั้งประเทศประมาณ 10,000 ตัน และผลผลิตเฉลี่ยต่อไร่ประมาณ 2,000 กิโลกรัม (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2548) ขมิ้นชันเป็นพืชที่สามารถปลูกได้ทั่วไปในภูมิภาคต่าง ๆ ของโลก ที่สำคัญได้แก่ อินเดีย บังคลาเทศ จีน ไต้หวัน เปรู อินโดนีเซีย เป็นพืชล้มลุกอายุหลายปี มีลำต้นจริงอยู่ใต้ดิน เรียกว่า เหง้า (Rhizome) ซึ่งประกอบด้วยเหง้าหลักใต้ดิน เรียกว่า “หัวแม่” มีลักษณะรูปไข่และแตกแขนงทรงกระบอกออกด้านข้างทั้ง 2 ด้าน เรียกว่า “แง่ง” ส่วนลำต้นเหนือดิน เป็นลำต้นที่เกิดจากการอัดตัวกันของกาบใบ มีความสูงประมาณ 30-90 เซนติเมตร ขมิ้นชันมีเนื้อสีเหลืองเข้มจนถึงสีแดงเข้ม มีกลิ่นเฉพาะตัว ซึ่งมาจากน้ำมันหอมระเหยที่มีอยู่ใน ขมิ้นชันเป็นสมุนไพรที่นำมาประยุกต์ใช้เพื่อสร้างรายได้ให้กับผู้ประกอบการ เช่น ขมิ้นชันอบแห้ง สมุนไพร ผลิตภัณฑ์ดูแลร่างกาย ยารักษาโรค รวมไปถึงผงขัดผิวที่ทำมาจากขมิ้นชันอบแห้ง และขมิ้นชันนี้ก็มีสรรพคุณในการต้านอนุมูลอิสระ และสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพสามารถป้องกันสาเหตุการเกิดมะเร็ง ช่วยลดไขมันในเส้นเลือด อีกทั้งยังเป็นผลิตภัณฑ์ที่ส่งขายต่างประเทศ ตลอดจนการนำขมิ้นชันมาทำเป็นเครื่องเทศการปรุงอาหาร

การอบแห้งเป็นกระบวนการแปรรูปอาหารและวัสดุชีวภาพที่มีความสำคัญมากที่สุด กระบวนการหนึ่งในการรักษาคุณภาพ ลดความสูญเสีย และยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ ทำให้ผลิตภัณฑ์แปรรูปทางการเกษตรมีมูลค่าเพิ่มขึ้น ในปัจจุบันผลิตภัณฑ์แปรรูปทางการเกษตรเป็นที่ต้องการอย่างมากทั้งภายในและต่างประเทศ แต่ปัญหาที่เกษตรกรและผู้ประกอบการต้องประสบคือ ผลิตภัณฑ์แปรรูปที่ได้ไม่ตรงตามมาตรฐานอุตสาหกรรม เนื่องจากกระบวนการผลิตนิยมใช้การตากแห้งแบบธรรมชาติ ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์แปรรูปที่ได้มีปัญหาเกี่ยวกับฝุ่นละอองและการรบกวนจากแมลงต่าง ๆ ซึ่งทำให้ผลิตภัณฑ์แปรรูปที่ได้ไม่สะอาดและเสียคุณค่าทางอาหาร ทั้งยังมีข้อจำกัดเกี่ยวกับฤดูกาล ได้แก่ ปัญหาเนื่องจากฝนตก และสภาพอากาศหนาวอีกด้วย

ในปัจจุบันเทคโนโลยีการอบแห้งได้มีการพัฒนาเพิ่มมากขึ้น จึงได้มีการเลือกใช้แหล่งพลังงานที่เหมาะสมมาใช้ในกระบวนการอบแห้งเพื่อเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับผู้ประกอบการในการเลือกใช้ และลดต้นทุนค่าใช้จ่ายสำหรับการกระบวนการผลิต โดยยังคงรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไว้ได้นาน (สมชาติ โสภณธนฤทธิ์, 2540) ดังนั้นกระบวนการอบแห้งของผลิตภัณฑ์สามารถนำเทคโนโลยีการอบแห้งด้วยการใช้พลังงานจากแหล่งต่าง ๆ เช่น คลื่นไมโครเวฟ ริงส์อินฟราเรด พลังงานลมร้อน และริงส์อินฟราเรดร่วมกับลมร้อน เพื่อทำให้ผลิตภัณฑ์อบแห้งที่ได้มีคุณภาพตามมาตรฐานการส่งออกและเป็นการเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์อีกด้วย ซึ่งในแต่ละแหล่งพลังงานความร้อนจะมีข้อดีและข้อจำกัดที่แตกต่างกัน สำหรับเทคโนโลยีของการอบแห้งโดยอาศัยการแผ่รังสีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้เริ่มมีการใช้งานกันอย่างกว้างขวางในงานของอุตสาหกรรมทางอาหารอีกด้วย จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่า Wanyo et al. (2009) ได้ทำการศึกษาการอบแห้งซาใบหม่อนด้วยริงส์อินฟราเรดคลื่นยาว พบว่า อัตราการลดความชื้นของการอบแห้งด้วยริงส์อินฟราเรดคลื่นยาวมีค่าสูงกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน Apintanapong (2009) ได้ทำการศึกษาการอบแห้งใบกระเพราแดงด้วยริงส์อินฟราเรด พบว่า การใช้ริงส์อินฟราเรดส่งผลทำให้อัตราการอบแห้งสูงกว่าแบบลมร้อน และยังสามารถลดการสูญเสียคุณภาพของผลิตภัณฑ์ภายหลังการอบแห้งอีกด้วย Nowak and Lewicki (2004) ได้ทำการออกแบบเครื่องอบแห้งด้วยอินฟราเรดหรือลมร้อนระดับห้องปฏิบัติการ โดยใช้ริงส์อินฟราเรด คลื่นสั้นที่มีความยาวคลื่นเท่ากับ 1200 nm พบว่า ระยะห่างระหว่างแท่งริงส์อินฟราเรดกับวัสดุ และความเร็วมส่งผลต่ออัตราการอบแห้ง โดยที่การอบแห้งด้วยอินฟราเรดสามารถลดระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งได้ถึง 50% เมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้งด้วยลมร้อน และ Nuthong et al. (2011) ได้ทำการศึกษาการอบแห้งลำไยด้วยริงส์อินฟราเรดร่วมกับลมร้อน จะเห็นได้ว่า เมื่อเพิ่มกำลังอินฟราเรดและอุณหภูมิลมร้อนส่งผลให้อัตราการอบแห้งมีค่าสูงขึ้น สำหรับการวิเคราะห์คุณภาพสีและอัตราการคืนตัวของลำไยหลังการอบแห้งพบว่า ค่าความสว่างและค่าความเป็นสีเหลืองลดลง แต่กำลังอินฟราเรดไม่มีผลต่อค่าความเป็นสีแดง ในขณะที่ปัจจัยจากการเพิ่มกำลังอินฟราเรด อุณหภูมิลมร้อน และความเร็วลมไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราการคืนตัว

ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาจนผลศาสตร์การอบแห้งขมิ้นชันด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนร่วมกับริงส์อินฟราเรด โดยพิจารณาพฤติกรรมของการถ่ายเทของมวลที่อยู่ในรูปของความชื้นเพื่อศึกษาอิทธิพลของเงื่อนไขของการอบแห้งที่มีผลต่อการอบแห้งขมิ้นชัน หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งขมิ้นชัน หาค่าความสัมพันธ์เปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งขมิ้นชัน และศึกษาคุณภาพทางด้านสีของขมิ้นชันภายหลังอบแห้ง

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งขมื่นชั้นด้วย ลมร้อน รังสีอินฟราเรด และลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด
2. เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้งขมื่นชั้นด้วย ลมร้อน รังสีอินฟราเรด และลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด
3. เพื่อศึกษาหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้งขมื่นชั้นด้วย ลมร้อน รังสีอินฟราเรด และลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด
4. เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของขมื่นชั้น
5. เพื่อหาค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งขมื่นชั้น
6. เพื่อศึกษาคุณภาพของขมื่นชั้นภายหลังการอบแห้ง

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1. ทำให้ทราบถึงหลักการทำงานของ การอบแห้ง ข้อดีและข้อเสียของการอบแห้งวัสดุทางการเกษตรด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด
2. ทำให้ทราบพฤติกรรมการถ่ายเทมวลที่เกิดขึ้นจากการอบแห้งวัสดุทางการเกษตรด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด
3. ทำให้ได้ค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งขมื่นชั้นแล้วนำไปใช้หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งขมื่นชั้น
4. ทำให้ทราบวิธีการอบแห้งและเทคโนโลยีการอบแห้งขมื่นชั้นด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดที่เหมาะสมเพื่อเผยแพร่ต่อไปในอนาคต

ขอบเขตของการวิจัย

1. วัสดุอบแห้งที่ใช้คือ ขมื่นชั้น นำมาหั่นที่ระดับความหนา 2 มิลลิเมตร
2. เครื่องอบแห้งที่ใช้ทำการศึกษาได้แก่ เครื่องอบแห้งชนิดลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดระดับห้องปฏิบัติการ
3. เงื่อนไขการทดลองที่ทำการศึกษา ได้แก่
 - 3.1 อุณหภูมิลมร้อน 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส
 - 3.2 กำลังอินฟราเรด 600 800 และ 1,000 วัตต์
 - 3.3 ความเร็วลม 0.50 เมตรต่อวินาที

3.4 ระยะห่างระหว่างแท่งอินฟราเรดกับผิวของวัสดุอบแห้งเท่ากับ 0.10 เมตร

4. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ ได้แก่ Newton, Page, Henderson and Pabis

Logarithmic, Modified Page, Two term, Two term exponential, Wang and Sing, Approximation diffusion และ Midilli et al.

5. สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลสามารถอธิบายได้โดยใช้แบบจำลองการแพร่ความชื้นตามกฎข้อที่สองของฟิกส์ โดยกำหนดให้รูปทรงของขม้นชั้นเป็นแผ่นระนาบที่มีความยาวมาก ๆ (infinite slab)

6. คุณภาพของขม้นชั้นภายหลังการอบแห้งที่ศึกษาได้แก่ สี

สถานที่ทำการวิจัย

ภาควิชาฟิสิกส์ และภาควิชาวิทยาศาสตร์การอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
169 ถ.ลพทบางแสน อ.เมือง จ.ชลบุรี 20131

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับขมิ้นชัน

ขมิ้นชันมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Curcuma longa Linn* และมีชื่อสามัญว่า Turmeric ขมิ้นชันจัดเป็นพืชล้มลุกในวงศ์ขิง มีอายุหลายปี มีถิ่นกำเนิดในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ได้แก่ อินเดีย บังกลาเทศ จีน ไต้หวัน เปรู อินโดนีเซีย (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2548)



ภาพที่ 2.1 ลักษณะของขมิ้นชัน

(ที่มาภาพ : http://www.pharmacy.mahidol.ac.th/siri/index.php?page=search_detail&medicinal_id=52)

ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

ขมิ้นชันเป็นไม้ล้มลุกที่มีอายุหลายปี สูง 30-90 เซนติเมตร มีเหง้าใต้ดินรูปไข่ อ้วนสั้น มีแขนงรูปทรงกระบอกแตกออกด้านข้าง 2 ด้าน ตรงกันข้าม เนื้อในเหง้าสีเหลืองส้มหรือสีเหลือง จำปาปนสีแดง มีกลิ่นฉุน ใบเดี่ยว กลางใบสีแดงคล้ำ แทงออกมาเหง้าเรียงเป็นวงซ้อนทับกันรูปใบหอก กว้าง 12-15 เซนติเมตร ยาว 30-40 เซนติเมตร ดอกช่อแทงออกจากเหง้า แทรกขึ้นมาระหว่างก้านใบ รูปทรงกระบอก กลีบดอกสีเหลืองอ่อน ใบประดับสีเขียวอ่อนหรือสีนวล บานครั้งละ 3-4 ดอก ผลรูปกลมมี 3 พู

สรรพคุณทางเภสัชวิทยา

จากการศึกษาสรรพคุณทางยาของขมิ้นชันนั้น จะมีฤทธิ์ขับลม ด้านการเกิดแผลในกระเพาะอาหารและลำไส้ กระตุ้นการหลั่งสารเมือกมาเคลือบ และยับยั้งการหลั่งน้ำย่อยต่าง ๆ สมานแผลในกระเพาะอาหาร ด้านการอักเสบของลำไส้ใหญ่ ด้านเชื้อแบคทีเรีย ด้านเชื้อบิดมีตัว ฆ่าพยาธิ ด้านเชื้อ Helicobacter pylori ฤทธิ์ด้านการอักเสบ ฤทธิ์ขับน้ำดี แก้อืด ท้องเฟ้อ ขับลม รักษาอาการอุจจาระร่วง ยับยั้งการเกาะกลุ่มของเกร็ดเลือด คลายกล้ามเนื้อเรียบของลำไส้ ป้องกันการเกิดมะเร็งและต้านมะเร็ง ปกป้องตับ ด้านออกซิเดชั่น มีฤทธิ์ด้านการเกิดโรคความจำเสื่อม และมีผลป้องกันการถูกทำลายของเซลล์สมอง (ฐานข้อมูลเครื่องยาสมุนไพร คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2554)

หลักการอบแห้งเบื้องต้น

การอบแห้ง คือ กระบวนการที่ความร้อนถูกถ่ายเทด้วยวิธีใดวิธีหนึ่ง เพื่อไล่ความชื้นออก โดยการระเหยน้ำ ในกระบวนการอบแห้งวัสดุทั่วไปมักใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางในการอบแห้ง โดยความร้อนจะมีการถ่ายเทจากกระแสวนอากาศไปยังผิววัสดุ ความร้อนส่วนใหญ่จะถูกใช้ในการระเหยน้ำ โดยไอน้ำจะเคลื่อนที่จากผิววัสดุมายังกระแสวนอากาศและถ้าผิววัสดุมีปริมาณน้ำอยู่มาก อุณหภูมิและความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิวจะคงที่ ส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและอัตราการอบแห้งคงที่ด้วย ถ้าอุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วของกระแสวนอากาศมีค่าคงที่ เมื่อผิววัสดุมีปริมาณน้ำลดลงเหลือน้อย อุณหภูมิและความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิวจะค่อยเปลี่ยนแปลงไป โดยที่อุณหภูมิของวัสดุจะสูงขึ้นและความเข้มข้นของไอน้ำจะลดลง ส่งผลให้อัตราการอบแห้งลดลง และความชื้นที่อยู่ระหว่างการเปลี่ยนแปลงจากอัตราการอบแห้งคงที่และอัตราการอบแห้งลดลง เรียกว่า ความชื้นวิกฤติ โดยสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2.2 สามารถแบ่งการอบแห้งออกเป็นสามช่วง ได้แก่

ก. ช่วงการเพิ่มอุณหภูมิแก่วัสดุ

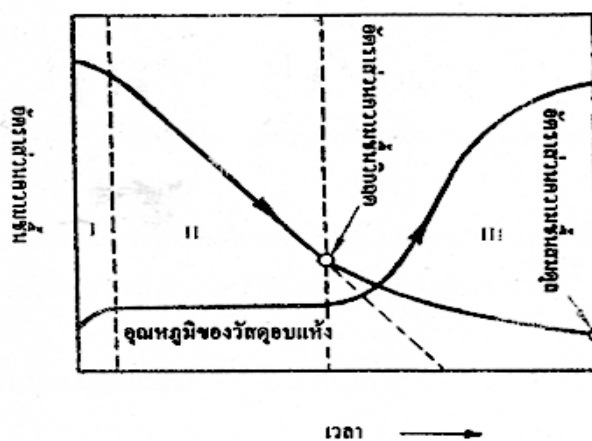
วัสดุซึ่งยังมีความชื้นสูง เมื่อเข้าสู่กระบวนการอบแห้ง วัสดุจะถูกทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นจนใกล้เคียงหรือเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศเมื่อทำการอบแห้งด้วยลมร้อน โดยอัตราการระเหยของน้ำจากเนื้อวัสดุจะมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงค่าหนึ่ง ก่อนที่จะเข้าสู่ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่หรืออัตราการอบแห้งลดลงต่อไป

ข. ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่

เมื่อวัสดุมีอุณหภูมิสูงขึ้นจนเท่ากับอุณหภูมิของลมร้อนการอบแห้ง ความร้อนของวัสดุที่ได้รับในช่วงนี้จะถูกนำไปใช้ในการระเหยของน้ำออกจากตัววัสดุ การถ่ายเทความร้อนและมวลระหว่างวัสดุและอากาศจะเหมือนกับการถ่ายเทความร้อนและมวลที่เกิดขึ้นที่กระเปาะเปียกของเทอร์โมมิเตอร์ ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง คือ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วลม ความร้อนจากอากาศร้อนจะถ่ายเทไปยังผิววัสดุโดยการนำความร้อนผ่านชั้นฟิล์มของก๊าซ และวัสดุจะแพร่ความชื้นจากผิวผ่านชั้นฟิล์มของก๊าซไปยังอากาศร้อน โดยมีผลต่างของอุณหภูมิและผลต่างของความดันไอที่ผิวของวัสดุและอากาศร้อนเป็นตัวผลักดัน ซึ่งอัตราส่วนความชื้นจะลดลงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับเวลา โดยที่การถ่ายเทมวลเกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิวของกระเปาะเปียกและที่ผิวของอากาศรอบนอก

ค. ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง

ช่วงอัตราการอบแห้งลดลงสำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อน เมื่อวัสดุมีความชื้นลดลงต่ำกว่าความชื้นวิกฤติ การถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลมิได้เกิดขึ้นเฉพาะที่ผิวของวัสดุเท่านั้น แต่เกิดภายในเนื้อของวัสดุ น้ำจากภายในวัสดุจะเคลื่อนที่มายังผิววัสดุในรูปของของเหลวหรือไอน้ำ ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่ออัตราการอบแห้งคือ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ โดยอัตราการระเหยจะถูกควบคุมโดยความต้านทานการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของน้ำในเนื้อวัสดุ วัสดุจะมีอุณหภูมิที่สูงขึ้นเนื่องจากอัตราการระเหยของน้ำลดลง แต่อัตราการถ่ายเทความร้อนจากของไหลจะยังมีค่าเท่าเดิม อัตราส่วนความชื้นจะไม่ลดลงเป็นสัดส่วนกับเวลาอีกต่อไป



ภาพที่ 2.2 อัตราการอบแห้งเทียบกับเวลา (เรียวโซ, 2525)

เมื่อทำการอบแห้งวัสดุเกษตรซึ่งมีความชื้นสูง ที่ผิวของวัสดุที่เปียกชื้น ความชื้นที่ผิวจะอยู่ในรูปของน้ำ ถ้านำวัสดุมาอบแห้งภายใต้เงื่อนไขคงที่ อุณหภูมิและความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิวก็จะคงที่ โดยอุณหภูมิของวัสดุจะมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียกของลมร้อน ช่วงเวลาที่วัสดุใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิจนถึงค่านี้ คือ ช่วง I ในช่วงเวลา II ที่ถัดไป อุณหภูมิของวัสดุจะมีค่าคงที่ ทรายใดที่ยังมีความชื้นเหลืออยู่ในรูปของน้ำที่ผิววัสดุ ความร้อนทั้งหมดที่วัสดุได้รับในช่วงนี้จะถูกใช้ในการระเหยความชื้นเท่านั้น อัตราส่วนความชื้นของวัสดุจะลดลงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับเวลา ในช่วงนี้การอบแห้งจะเป็นแบบอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant Drying Rate) ในช่วง III ความชื้นในรูปของน้ำที่ผิวของวัสดุจะระเหยหมดไป การถ่ายเทความชื้นในรูปของน้ำจากส่วนในของวัสดุเกิดขึ้นไม่ทันกับการระเหยของน้ำจากผิวของวัสดุ ดังนั้นผิวของวัสดุ ดังนั้นผิวของวัสดุจะอยู่ในสภาพที่แห้งและอุณหภูมิของวัสดุจะเริ่มสูงขึ้น ปริมาณความร้อนของวัสดุที่ได้รับนอกจากจะลดลงแล้ว ความร้อนนี้ยังต้องใช้ในการระเหยความชื้นและเพิ่มอุณหภูมิของวัสดุด้วย ในช่วงนี้การอบแห้งจะเป็นแบบอัตราการอบแห้งลดลง (Falling Drying Rate) การอบแห้งจะสิ้นสุดลงเมื่อความชื้นลดลงถึงค่าความชื้นสมดุล (Equilibrium Moisture Content) (นริศ พัวพัน วัฒนะ, 2552)

ความสำคัญของการอบแห้ง

การอบแห้ง คือ กระบวนการการลดความชื้นซึ่งส่วนใหญ่ใช้การถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุที่ชื้น เพื่อไล่ความชื้นออกโดยการระเหย โดยใช้ความร้อนที่ได้รับเป็นความร้อนแฝงของการระเหย วัสดุอบแห้งมีมากมายหลายชนิด แต่ที่จะกล่าวต่อไปจะเกี่ยวข้องกับอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารเท่านั้น ประโยชน์ของการอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารอาจสรุปได้ตามลำดับความสำคัญต่อไปนี้

1. เพื่อการถนอมรักษาอาหาร อาหารที่แห้งแล้วสามารถเก็บรักษาไว้ได้นานโดยไม่เสียเนื่องจากการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์มีน้อย
2. เพื่อลดปริมาณและน้ำหนัก อาหารที่แห้งแล้วจะมีปริมาณและน้ำหนักลดลง ทำให้สามารถลดต้นทุนในการเก็บรักษาและการขนส่ง
3. เพื่อช่วยให้กระบวนการการผลิตดีขึ้น ในกรณีนี้อาจจะไม่จริงเสมอไปทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตนั้น ๆ

ในกรณีของเมล็ดพืชเกษตรกรสามารถที่จะเก็บเกี่ยวเมื่อเมล็ดพืชยังมีความชื้นสูงอยู่ ทำให้ลดการสูญเสียของเมล็ดพืชอันเนื่องจากการร่วงหล่นก่อน ระหว่างและหลังเก็บเกี่ยวการเก็บเกี่ยวที่เร็วขึ้นอาจช่วยให้เกษตรกรสามารถปลูกพืชครั้งที่สองอย่างได้ผล การอบแห้งที่ถูกหลักยังสามารถ

ช่วยให้เปอร์เซ็นต์การงอกของเมล็ดพืช ทำให้สามารถนำไปเพาะปลูกได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมล็ดพืชที่อบแห้งแล้วมีคุณภาพสูงและสามารถเก็บรักษาไว้ได้นาน ทำให้เกษตรกรสามารถรอเวลาขายในขณะที่ผลิตผลมีราคาดี

วิธีการอบแห้ง

การอบแห้งโดยอาศัยธรรมชาติ แบ่งออกได้ 2 วิธี คือ

1. การอบแห้งแห้งโดยอาศัยแสงแดดโดยตรง ส่วนใหญ่ใช้ไอร้อนจากแสงแดดหรืออาศัยการผึ่งลม อาหารที่ทำให้แห้งโดยวิธีนี้ได้แก่ ปลา เนื้อสัตว์ เมล็ดธัญพืช ตลอดจนผลไม้บางชนิด เช่น กุ้งตาก วิธีนี้นับเป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายภายในประเทศที่ค่อนข้างยากจน และมีแสงแดดเพียงพอ เป็นวิธีที่ค่อนข้างถูกแต่จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพต่ำเนื่องจากไม่สามารถควบคุมอัตราเร็วในการอบแห้งได้

2. การอบแห้งด้วยตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ วิธีทำให้อาหารแห้งโดยอาศัยธรรมชาติด้วยการตากแดดนั้น มีปัญหาภายในเรื่องของการปนเปื้อนจากสิ่งปนเปื้อน ซึ่งเป็นผลเสียต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์อาหารแห้งที่ได้ และประสิทธิภาพในการอบแห้งด้วยการตากแดดมักต่ำ ดังนั้นจึงมีการพัฒนาตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ขึ้น โดยตู้อบดังกล่าวนี้จะอาศัยพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ได้คืออยู่ในตู้อบ เพื่อเป็นการเพิ่มอัตราการทำให้แห้งได้เร็วขึ้น และในตำแหน่งเดียวกันตู้ดังกล่าวจะมีวัสดุกัน เพื่อลดปัญหาการปนเปื้อนจากสิ่งปนเปื้อนต่าง ๆ เช่น แมลง ฝุ่น เป็นต้น ทำให้ผลิตภัณฑ์อาหารแห้งที่ได้ มีคุณภาพและความสะอาดดีขึ้นจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการตากแดด (ชมพู่ ยัมโต, 2550)

การอบแห้งด้วยเครื่องจักรกล

วิธีการนี้มีการนำเอาเทคนิคและหลักวิชาการทางวิทยาศาสตร์เข้ามาเกี่ยวข้องด้วยอย่างมาก ซึ่งอาศัยการส่งความร้อนเข้าไปในชิ้นอาหารเพื่อทำให้น้ำหรือความชื้นกลายเป็นไอร้อนออกไปจากผิวหน้าอาหาร โดยความร้อนที่ส่งเข้าไปอาจจะเป็นการนำความร้อน การพาความร้อน หรือการแผ่รังสีก็ได้ แต่โดยทั่วไปการทำให้แห้งด้วยเครื่องจักรกลมักนิยมใช้หลักการนำความร้อนและการพาความร้อนเป็นส่วนใหญ่

ข้อเปรียบเทียบการอบแห้งทั้งสองวิธี ดังนี้

1. การอบแห้งโดยเครื่องจักรกลสามารถควบคุมสภาวะทั่วไป เช่น อุณหภูมิ ความชื้น และการหมุนเวียนของบรรยากาศได้ในระดับที่เหมาะสม ส่วนการอบแห้งโดยอาศัยธรรมชาติขึ้นอยู่กับคืนฟ้าอากาศ
2. การอบแห้งโดยใช้เครื่องจักรกลจะใช้พื้นที่น้อยกว่าวิธีที่อาศัยแสงแดด ได้มีการคำนวณไว้ว่า ผู้ที่ประกอบกิจกรรมในเนื้อที่ 20 ไร่ ต้องมีพื้นที่สำหรับตากแห้งเป็นเนื้อที่ 1 ไร่ จึงจะเพียงพอ
3. ผลผลิตแห้งที่ได้จากเครื่องอบแห้งทำให้อาหารแห้งสะอาด และมีคุณภาพดีกว่าวิธีการอบแห้งโดยอาศัยธรรมชาติ
4. คุณสมบัติในการคืนรูป เมื่อนำไปหุงต้ม ผลผลิตแห้งที่ได้จากเครื่องอบแห้งจะดีกว่าผลผลิตแห้งที่ได้จากการอบแห้งโดยอาศัยธรรมชาติ
5. ระยะเวลาในการอบแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้ง จะเร็วกว่าการอบแห้งโดยอาศัยธรรมชาติ
6. ค่าใช้จ่ายในการอบแห้งโดยอาศัยธรรมชาติจะสูงกว่าอบแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้ง

ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการอบแห้ง

ชมพู่ ยัมโต (2550) กล่าวว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการเคลื่อนย้ายน้ำมีผลต่ออัตราเร็วในการอบแห้ง ดังนี้

1. ธรรมชาติของอาหาร อาหารมีเนื้อโปรง น้ำจะเคลื่อนที่แบบผ่านช่องแคบซึ่งเร็วกว่าการแพร่ในอาหารเนื้อแน่น ดังนั้นอาหารเนื้อโปรงจึงแห้งได้เร็วกว่าอาหารเนื้อแน่น อาหารที่มีน้ำตาลสูงจะเหนียวเหนอะหนะกีดขวางการเคลื่อนที่ของน้ำจึงแห้งช้า อาหารที่มีการลวก นวดคลึงทำให้เซลล์แตกจึงแห้งได้เร็วขึ้น
2. ขนาดและรูปร่างอาหาร ขนาดและรูปร่างมีผลต่อพื้นที่ผิว ต่อน้ำหนัก ขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวต่อน้ำหนักมากกว่าขนาดใหญ่จึงแห้งได้เร็วกว่า ความหนาของอาหาร อาหารยิ่งหนามากเท่าไร การอบแห้งก็ใช้เวลานาน นอกจากนี้ต้องคำนึงถึงพื้นที่ผิวที่สัมผัสกับอากาศที่จะเคลื่อนย้ายไอน้ำออกไปด้วย
3. ตำแหน่งของอาหารในเตา อัตราการอบแห้งภายในเครื่องอบเกิดไม่สม่ำเสมอขึ้นกับชนิด ประสิทธิภาพ ทิศทางการเคลื่อนที่ของลม น้ำในอาหารที่สัมผัสลมร้อนได้ดีกว่า หรือสัมผัสกับอากาศร้อนที่มีความชื้นต่ำย่อมระเหยได้ดีกว่า

4. ปริมาณอาหารต่อถาด ถ้าปริมาณอาหารต่อถาดมากเกินไป อาหารส่วนล่างไม่ได้สัมผัสกับอากาศร้อนหรือได้รับความร้อนจากถาดแล้วแต่ไอน้ำไม่สามารถแพร่กระจาย ผ่านชั้นอาหารตอนบนออกมาได้จึงแห้งช้า

5. ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (Relative Humidity : RH) ความแตกต่างระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศร้อนกับอาหารมีผลต่อแรงขับเคลื่อนความชื้นออกจากอาหาร ในการอบแห้งยังมีความชื้นต่ำ (น้ำน้อย : อากาศร้อนมีอุณหภูมิสูง) อัตราการอบแห้งยิ่งสูง แต่ถ้าอากาศร้อนมีความชื้นเข้าใกล้จุดอิ่มตัว (น้ำเยอะ) จะรับไอน้ำได้น้อย อัตราการอบแห้งจะต่ำ ความชื้นของอากาศจะเป็นตัวกำหนดความสามารถในการรับไอน้ำของอากาศร้อน อากาศร้อนที่มีไอน้ำอยู่มากแล้วจะรับไอน้ำได้น้อย

6. อุณหภูมิของอากาศ ถ้าอากาศมีความชื้นคงที่ การเพิ่มอุณหภูมิเป็นการเพิ่มความสามารถในการรับไอน้ำจึงมีผลต่ออัตราการอบแห้งและอุณหภูมิที่สูงขึ้น อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิที่ใช้ต้องไม่สูงจนทำให้อาหารไหม้ หรือเกิดความเสียหายจากปฏิกิริยาทางเคมีหรือกายภาพ การกำหนดอุณหภูมิของอากาศร้อนที่ใช้ขึ้นกับลักษณะการเคลื่อนที่ของอากาศร้อนและระยะเวลาในการอบแห้ง การอบแห้งผักและผลไม้ อุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 45–70 °C ถ้าสูงกว่า 70 °C น้ำจะระเหยเร็วเกินไป อาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเชิงซ้อนทางเคมี กายภาพ ที่ผิวหน้า ผิวหน้าเกิดเปลือกแห้งแข็งกระด้าง น้ำซึมผ่านไม่ได้ เรียกว่า Case Hardening อัตราการอบแห้งลดต่ำลง ผลิตภัณฑ์มีความชื้นสูง เมื่อเก็บผลิตภัณฑ์ไว้จะเกิดการเน่าเสีย เกิดสีคล้ำ

7. ความเร็วของอากาศร้อน ในการอบแห้งอากาศร้อนมีหน้าที่ในการถ่ายเทความร้อนให้กับอาหาร พาความชื้นออกไป ถ้าใช้ความเร็วลมสูงก็จะพาไอน้ำออกจากผิวหน้าของอาหารสู่ภายนอกได้เร็วขึ้น และยังช่วยป้องกันการเกิดสภาวะอิมิตัวในบรรยากาศเหนือผิวของอาหาร

8. ปริมาณน้ำในอาหาร ปริมาณน้ำในอาหารมีผลต่ออัตราการอบแห้ง อาหารที่น้ำมากจะใช้เวลาในการอบแห้งนานกว่าอาหารที่มีน้ำน้อย

ความชื้นของวัสดุ

ในการอบแห้งวัสดุหรือผลผลิตต่างๆ ปริมาณที่สำคัญที่สุดก็คือความชื้นของวัสดุหลังผ่านการอบแห้งแล้วความชื้นเป็นตัวบอกปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในวัสดุเมื่อเทียบกับมวลของวัสดุขึ้นหรือแห้ง (สมชาติ โสภณธรรมฤทธิ์, 2540) ความชื้นในวัสดุสามารถแสดงได้เป็น 2 แบบ ดังสมการที่ (2.1) และ (2.2)

1. ความชื้นมาตรฐานเปียก

$$M_w = \frac{(w - d)}{w} \times 100 \quad (2.1)$$

2. ความชื้นมาตรฐานแห้ง

$$M_d = \frac{(w - d)}{d} \times 100 \quad (2.2)$$

เมื่อ	M_w	คือ	ความชื้นมาตรฐานเปียก, %(w.b.)
	M_d	คือ	ความชื้นมาตรฐานแห้ง, %(d.b.)
	w	คือ	น้ำหนักของวัสดุ, g
	d	คือ	น้ำหนักแห้งของวัสดุ (ไม่มีน้ำ), g

ความชื้นมาตรฐานแห้ง นิยมใช้ในการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งทางทฤษฎี เนื่องจากช่วยให้การคำนวณสะดวกขึ้น เพราะมวลของวัสดุแห้งจะมีค่าคงที่หรือเกือบคงที่ในระหว่างการอบแห้ง ที่ว่าเกือบคงที่นี้ เพราะผลผลิตทางการเกษตรเป็นสิ่งมีชีวิต มีการหายใจ ดังนั้นจึงมีการเผาผลาญสารอาหารในวัสดุอบแห้ง ทำให้มวลแห้งลดลง ส่วนใหญ่แล้วมวลแห้งจะลดลงเล็กน้อย (สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, 2540)

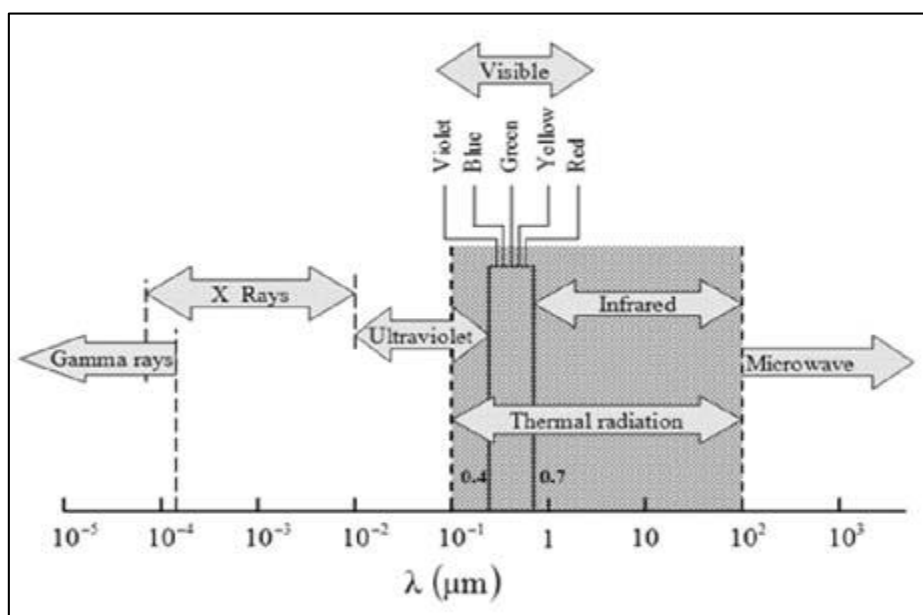
การอบแห้งด้วยอากาศร้อนหรือลมร้อน

การอบแห้งด้วยอากาศร้อนหรือลมร้อนเป็นการใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางในการทำแห้ง โดยอากาศร้อนจะไหลผ่านอุปกรณ์ให้ความร้อนเป็นตัวให้ความร้อน แล้วไหลผ่านชั้นอาหารเพื่อทำแห้ง เมื่ออากาศไหลผ่านผิวหน้าอาหารความร้อนจากอากาศร้อนถ่ายโอนไปที่ผิวอาหารทำให้น้ำในอาหารระเหยออกมาสถานะดังกล่าวทำให้เกิดความแตกต่างของความดันไอระหว่างผิวหน้าอาหารและภายในชั้นอาหาร โดยภายในชั้นอาหารมีความดันไอสุงกว่าความดันไอที่ผิวหน้าของอาหารทำให้เกิดแรงดันเพื่อไล่น้ำออกจากอาหาร (วิไล รังสาตทอง, 2546)

การอบแห้งโดยใช้รังสีอินฟราเรด

รังสีอินฟราเรด (Infrared radiation) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 0.75-1000 μm แสดงดังภาพที่ 2.3 โดยที่ความยาวคลื่นในช่วงนี้สามารถแบ่งย่อยได้เป็น 3 ช่วง คือ

1. รังสีอินฟราเรดช่วงคลื่นสั้น (Near infrared radiation, NIR) มีความยาวคลื่นประมาณ 0.70-3.0 μm มักจะประยุกต์ใช้ในงานถ่ายภาพความร้อน
2. รังสีอินฟราเรดช่วงคลื่นกลาง (Medium infrared radiation, MIR) มีความยาวคลื่นประมาณ 1.50-5.60 μm มักจะประยุกต์ใช้กับระบบนำวิถีของจรวด Missile
3. รังสีอินฟราเรดช่วงคลื่นยาว (Far infrared radiation, FIR) มีความยาวคลื่นประมาณ 5.6 μm ขึ้นไป ช่วงคลื่นยาวนี้จะมีพลังงานความร้อนไม่มากนัก จึงนิยมใช้ในการบำบัดผู้ป่วย เช่น อาการปวดเมื่อยเรื้อรัง และผู้ป่วยด้วยโรคความดันโลหิต รวมถึงการควบคุมน้ำหนัก เป็นต้น



ภาพที่ 2.3 แสดงสเปกตรัมการแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเนื่องจากอุณหภูมิของวัตถุ

(ที่มาภาพ : <http://www.neutron.rmutphysics.com/science-news/index.php?>

[option=com_content&task=view&id=1966&Itemid=0](http://www.neutron.rmutphysics.com/science-news/index.php?option=com_content&task=view&id=1966&Itemid=0))

กลไกการแผ่รังสีอินฟราเรด

แท่งอินฟราเรดมีคุณสมบัติในการกระจายรังสีพลังงาน ทำหน้าที่เป็นตัวเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นรังสีอินฟราเรดในช่วงความยาวคลื่นต่าง ๆ กัน มีความทนทานต่ออุณหภูมิที่สูง เหมาะในการใช้งานติดต่อกันเป็นเวลานาน ถ่ายเทความร้อนได้ดี แผ่ความร้อนได้สม่ำเสมอ แข็งแรง ทนทาน และบำรุงรักษาง่าย ซึ่งวัสดุจะถูกทำให้ร้อน โดยการแผ่รังสีความร้อน คลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากแท่งอินฟราเรดสามารถเจาะทะลุเข้าถึงเนื้อภายในวัสดุ โดยขนาดความลึกที่เจาะเข้าไปจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุและความยาวคลื่นที่แผ่ออกไป โดยที่คลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เจาะทะลุเข้าไปในวัสดุ จะไปกระตุ้นโมเลกุลน้ำภายในวัสดุทำให้สั่นและเกิดความร้อนขึ้น ทำให้อุณหภูมิภายในวัสดุสูงกว่าอุณหภูมิที่ผิว (ศรีมา แจ้คำ, 2546)

การประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้ง

พลังงาน (energy) หมายถึง ความสามารถในการทำงานหรืออำนาจที่แฝงอยู่ในวัตถุซึ่งสามารถเปลี่ยนรูปได้ พลังงานของวัตถุต่าง ๆ อาจสะสมอยู่ในหลายรูปแบบ เช่น พลังงานกล พลังงานศักย์ พลังงานจลน์ ความร้อน แสง ไฟฟ้า เป็นต้น พลังงานไฟฟ้าจะเกิดขึ้นเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำใด ๆ หมายความว่า ขณะนั้นมีประจุไฟฟ้าจำนวนหนึ่งเคลื่อนที่ผ่านตัวนำนั้น ๆ ไปเป็นกระแสต่อเนื่องไปได้นั้นจะต้องมีพลังงานจากแหล่งอื่น เช่น แบตเตอรี่ ไดนาโม เป็นต้น มาทำให้ประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ไป พลังงานที่เกิดขึ้นจากแหล่งอื่นนั้น อาจจะเป็นพลังงานเคมี พลังงานกล พลังงานความร้อน หรือพลังงานแสง ซึ่งแล้วแต่ว่าแหล่งกำเนิดพลังงานนั้นเป็นอะไร พลังงานเหล่านี้จะแปรเปลี่ยนสภาพไปเป็นพลังงานไฟฟ้า พลังงานไฟฟ้าที่สิ้นเปลืองในการเคลื่อนประจุหนึ่งหน่วยประจุจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งคือความต่างศักย์ทางไฟฟ้าระหว่างจุดทั้งสองนั่นเอง ดังนั้นความต่างศักย์ทางไฟฟ้าจึงหมายถึงค่าของพลังงานไฟฟ้าที่สิ้นเปลืองในการเคลื่อนประจุหนึ่งหน่วยประจุระหว่างจุดคู่ใด ๆ (ศรีมา แจ้คำ, 2546) จากงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษา ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) ที่ใช้ในการอบแห้งขมิ้นชันด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด โดยทำการทดลองอบแห้งขมิ้นชันด้วยสภาวะการอบแห้งต่าง ๆ ได้แก่ การอบแห้งด้วยลมร้อน การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด และการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด ดังนั้นประสิทธิภาพในการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้งสามารถแสดงได้ด้วยค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้ง ให้อยู่ในหน่วยของเมกะจูลต่อกิโลกรัมของน้ำที่ระเหย ซึ่งแสดงดังสมการที่ (2.3)

$$\text{Specific Energy Consumption, (SEC)} = \frac{3.6 E_p}{(M_{in} - M_f) \times W_d} \quad (2.3)$$

เมื่อ	E_p	คือ ปริมาณพลังงานที่ใช้, (kW-h)
	M_{in}	คือ ความชื้นเริ่มต้นมาตรฐานแห้ง, %(d.b.)
	M_f	คือ ความชื้นสุดท้ายมาตรฐานแห้ง, %(d.b.)
	W_d	คือ มวลแห้งของวัสดุ (ไม่มีความชื้น), g

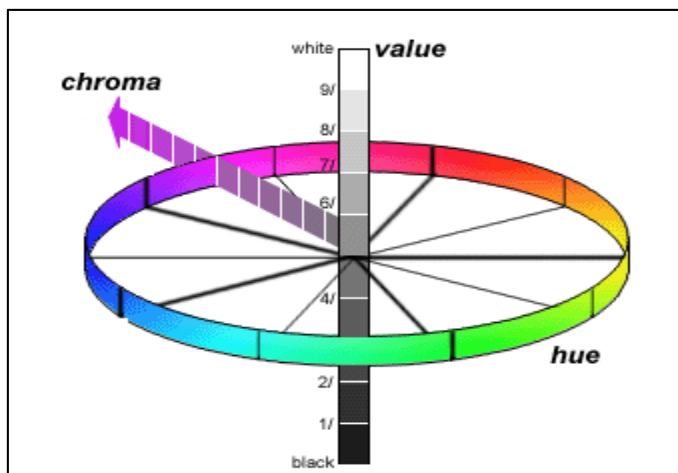
การวิเคราะห์สี

สีแสดงถึงคุณภาพของอาหารและผลผลิตทางการเกษตร ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อคุณภาพการยอมรับของผู้บริโภค หากมีสีที่ผิดปกติผู้บริโภคส่วนใหญ่อาจไม่ยอมรับและอาจไม่คำนึงต่อคุณภาพด้านอื่นต่อไป เช่น รสชาติ และเนื้อสัมผัส เป็นต้น การเปลี่ยนแปลงสีของผลิตภัณฑ์ระหว่างการอบแห้งเกิดขึ้นได้จากการระเหยของน้ำออกจากผิววัสดุระหว่างการอบแห้งในธรรมชาติแสงเป็นพลังงานที่มีสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยมีความยาวคลื่นที่ตามองเห็นอยู่ในช่วง 380-780 nm (ช่อศกา เทพรังษี, 2553) โดยทั่วไปมนุษย์จะระบุลักษณะสีของวัตถุที่มองเห็นเป็น 3 ลักษณะคือ Hue, Value และ Chroma แสดงดังภาพที่ 2.4

- Hue หมายถึง สีที่ปรากฏให้เห็น (เฉดสี) เป็นชื่อของสีหลักที่แตกต่างกัน ในระบบ munsell จะแบ่งออกเป็น 5 สี คือ แดง เหลือง เขียว น้ำเงิน ม่วง

- Value (Lightness) หมายถึง ความสว่างของสี หรือปริมาณแสงที่สะท้อนออกมาจากวัตถุหากมีปริมาณแสงที่สะท้อนออกมามากจะทำให้เห็นสีสว่าง ถ้าปริมาณแสงสะท้อนน้อยจะทำให้เห็นสีเข้ม หรือมีค่าตั้งแต่ 0 = black (หมายถึงวัตถุดำสมบูรณ์) ถึง 10 = white (หมายถึง วัตถุขาวสมบูรณ์)

- Chroma (Saturation) หมายถึง ค่าที่แสดงความบริสุทธิ์ (purity) ของสี สีที่บริสุทธิ์มากที่สุด คือสีที่ไม่มีแสงสีเทาผสมเลย ซึ่งได้แก่สีหลัก (Hue) ทั้ง 100 สี แบ่งสเกลเป็น 0 ถึง 18 เป็นการวัดความแตกต่างของสีหลักจากสีเทาที่ lightness เดียวกัน

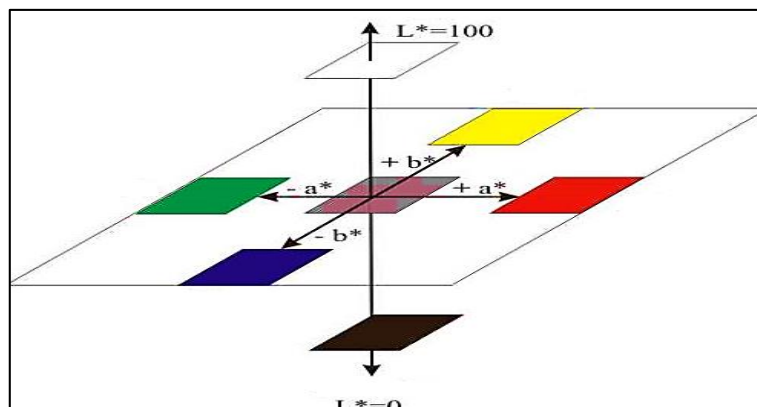


ภาพที่ 2.4 แผนภาพสีแสดง value chroma และ hue (Kanthamoon, 2009)

สำหรับระบบ CIE นั้น ได้พัฒนาระบบสีจนเป็นระบบที่ยอมรับและใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน คือ ระบบ L^* , a^* , b^* ซึ่งเป็นการอธิบายระบบสีแบบ 3 มิติ โดยให้ค่า L^* ใช้กำหนดค่าความสว่าง (Lightness) โดยที่ค่า $L = 0$ หมายถึง วัตถุดำสมบูรณ์ และ $L = 100$ หมายถึง วัตถุขาวสมบูรณ์ ในขณะที่ค่า a^* ใช้กำหนดสีแดง หรือสีเขียว โดยที่ค่า a เป็น + วัตถุมีสีออกแดง และค่า a เป็น - วัตถุมีสีออกเขียว และในส่วนของค่า b^* ใช้กำหนดสีเหลือง หรือสีน้ำเงิน โดยที่ค่า b เป็น + วัตถุมีสีออกเหลือง และค่า b เป็น - วัตถุมีสีออกน้ำเงิน แสดงดังภาพที่ 2.5 และในการหาความแตกต่างของสีที่เป็นตัวเลขนั้น เมื่อพิจารณาจากรูป จะพบว่าจุด ๆ หนึ่ง ใน space นั้นเป็น L_i^* , a_i^* , b_i^* และเมื่อสีมีการเปลี่ยนเฉดสีไปจะได้อีกจุดใน space เป็น L_f^* , a_f^* , b_f^* ซึ่ง 2 จุดนี้จะมีระยะห่างกันใน space เท่าไหรันั้น จะเป็นตัวบ่งบอกถึงค่าการเปลี่ยนแปลงของสีโดยรวม แสดงดังสมการที่ (2.4)

$$\Delta E = \sqrt{(L_i^* - L_f^*)^2 + (a_i^* - a_f^*)^2 + (b_i^* - b_f^*)^2} \quad (2.4)$$

เมื่อ ΔE คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงของสีโดยรวม
 L_i^* , a_i^* และ b_i^* คือ ค่าความสว่าง, ค่าความเป็นสีแดง (หรือเขียว) และค่าความเป็นสีเหลือง (หรือน้ำเงิน) ที่สภาวะการอบแห้งเริ่มต้น ตามลำดับ
 L_f^* , a_f^* และ b_f^* คือ ค่าความสว่าง, ค่าความเป็นสีแดง (หรือเขียว) และค่าความเป็นสีเหลือง (หรือน้ำเงิน) ที่สภาวะการอบแห้งสุดท้าย ตามลำดับ



ภาพที่ 2.5 แผนภาพแสดง CIE Lab แสดง L^* , a^* , b^* color space (Kanthamoon, 2009)

สมการการอบแห้งทางทฤษฎี (Theoretical Drying Kinetic Equation)

ได้มีผู้ศึกษานำหลักการทางทฤษฎีหลายทฤษฎีมาเพื่ออธิบายการเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุที่มีโครงสร้างภายในเป็นรูพรุนในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง Luikov (1966) ได้เสนอกลไกการเคลื่อนที่ของน้ำภายในวัสดุ (สมชาติ โสภณธรรมฤทธิ์, 2540) ซึ่งอาจจะเกิดแบบต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1. การเคลื่อนที่ในรูปของเหลวเนื่องจาก Capillary Flow ซึ่งเป็นผลมาจากแรงตึงผิว (Surface Force)
2. การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของเหลว เนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น (Liquid Diffusion)
3. การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของเหลว เนื่องจากการแพร่ของความชื้นบนผิวของรูพรุนเล็ก ๆ (Surface Diffusion)
4. การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของไอ เนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น (Vapor Diffusion)
5. การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของไอ เนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ (Thermal Diffusion)
6. การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของเหลว เนื่องจากความแตกต่างของความดันรวม (Hydrodynamic Flow)

การอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง การเคลื่อนที่ของน้ำส่วนมากจะอยู่ในรูปของเหลว ซึ่งเป็นผลมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น (Vapor Diffusion) ที่

เป็นไปในลักษณะของการแพร่ของน้ำภายในวัสดุ การถ่ายเทมวลภายในอธิบายได้ด้วยสมการการแพร่ความชื้นที่อยู่บนพื้นฐานตามกฎข้อที่สองของ Fick แสดงดังสมการที่ (2.5)

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{\text{eff}} \nabla^2 M \quad (2.5)$$

เมื่อ	M	คือ	ความชื้น, %(d.b.)
	D_{eff}	คือ	สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น, (cm ² /min)
	t	คือ	เวลาในการอบแห้ง, (min)

ถ้าพิจารณาการถ่ายเทมวลในทิศทาง x, y, z ซึ่งตั้งฉากกันและกันและตั้งสมมติฐานว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ไม่ขึ้นกับปริมาณความชื้นในวัสดุ (ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คงที่) จะได้ว่า

$$\frac{\partial MR}{\partial t} = D_{\text{eff}} \left(\frac{\partial^2 MR}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 MR}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 MR}{\partial z^2} \right) \quad (2.6)$$

โดยกำหนดให้

$$MR = \frac{M_t - M_{\text{eq}}}{M_{\text{in}} - M_{\text{eq}}} \quad (2.7)$$

เมื่อ	MR	คือ	อัตราส่วนความชื้น
	M_{in}	คือ	ความชื้นเริ่มต้น, %(d.b.)
	M_{eq}	คือ	ความชื้นสมดุล, %(d.b.)
	M_t	คือ	ความชื้นที่เวลาใด ๆ, %(d.b.)

สำหรับวัสดุที่มีรูปทรงเป็นแผ่นระนาบที่มีความยาวมาก ๆ (infinite slab) และมีความหนาครึ่งหนึ่งของวัสดุเท่ากับ 1 ตัวอย่างวัสดุทางการเกษตรที่มีรูปร่างเป็นแผ่นระนาบ เช่น ผลไม้แผ่น กุ้งฝอยแห้ง เพื่อถนอม สาหร่ายทะเลแผ่น เป็นต้น แสดงดังสมการที่ (2.8)

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_{in} - M_{eq}} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{(2n-1)^2} \right) \exp \left(-\frac{(2n-1)^2 D_{eff} \pi^2 t}{4l^2} \right) \quad (2.8)$$

เมื่อ	n	คือ	ค่าคงที่ (1, 2, 3,...)
	D_{eff}	คือ	สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล, (cm ² /min)
	t	คือ	เวลาในการอบแห้ง, (min)
	l	คือ	ความหนาครึ่งหนึ่งของวัสดุ, (cm)

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลเป็นการเคลื่อนที่ของน้ำในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ซึ่งเป็นช่วงที่การถ่ายเทความร้อนและมวลไม่ได้เกิดเฉพาะที่ผิวนอกของวัสดุเท่านั้น แต่เกิดภายในผิวและเนื้อวัสดุด้วย ส่วนในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่นั้นน้ำจะระเหยที่ผิววัสดุของเท่านั้น ซึ่งช่วงอัตราการอบแห้งคงที่นี้อัตราการระเหยน้ำต่อพื้นที่จะมีค่าคงที่ โดยที่การเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งจะมีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลมีค่าสูงขึ้น (นริศ พัวพันวัฒนะ, 2552) เมื่อกำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลมีค่าคงที่ตลอดช่วงของการอบแห้ง (ไม่ขึ้นกับความชื้น) และจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่าความแตกต่างของความดันไภายในและภายนอกวัสดุ ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งวัสดุจะทำให้ค่าความดันไภายในและภายนอกแตกต่างกัน โดยการกำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งในรูปแบบสมการของ Arrhenius แสดงดังสมการที่ (2.9)

$$D_{eff} = D_0 \exp \left[\frac{-E_a}{RT} \right] \quad (2.9)$$

เมื่อ	R	คือ	ค่าคงที่ของก๊าซ มีค่าเท่ากับ 8.314 (kJ/mol.K)
	T	คือ	อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง, (K)
	D_0	คือ	ค่าคงที่ของ Arrhenius, (cm ² /min)
	E_a	คือ	พลังงานกระตุ้น, (kJ/mol)

สำหรับกระบวนการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดแบบไม่ควบคุมอุณหภูมิอากาศอบแห้งนั้น ได้ประยุกต์ใช้สมการของ Arrhenius ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ในรูปสมการเอกซ์โพเนนเชียลของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลกับอัตราส่วนของน้ำหนักของตัวอย่างต่อกำลังของรังสีอินฟราเรด แสดงดังสมการที่ (2.10)

$$D_{\text{eff}} = D_0 \exp\left[\frac{-E_a m}{P}\right] \quad (2.10)$$

เมื่อ m คือ น้ำหนักของตัวอย่าง, (kg)
 P คือ กำลังของรังสีอินฟราเรด, (W)
 E_a คือ พลังงานกระตุ้น, (kW/kg)

หลังจากการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลซึ่งเป็นค่าที่ได้จากผลการทดลองนั้นสามารถหาค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) และค่า Arrhenius factor (D_0) โดยนำค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลและอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งมาคำนวณในสมการของ Arrhenius และสำหรับการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้น สามารถคำนวณได้ด้วยการนำค่า D_0 และ E_a ที่ได้จากสมการที่ (2.9) และ (2.10) แทนค่ากลับในสมการอีกครั้ง โดยแทนค่าอุณหภูมิอบแห้งและค่าอัตราส่วนของน้ำหนักของตัวอย่างต่อกำลังของรังสีอินฟราเรดที่ใช้ในการทดลองลงไป ตามลำดับ ทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลที่ใช้ในการทดลองได้

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงความชื้นในรูปอัตราส่วนความชื้น (Moisture Ratio) โดยที่การลดลงของความชื้นจะมีลักษณะเป็นฟังก์ชันลดตามรูปแบบของสมการเอ็กโปเนนเชียลและความชื้นจะลดลงเข้าใกล้ความชื้นสมดุล จะได้สมการที่อยู่ในรูปแบบของอัตราส่วนความชื้น (Moisture Ratio) แสดงดังสมการที่ (2.11) ซึ่งความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นที่เปลี่ยนแปลงกับเวลาในรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบเอมพิริคัล เนื่องจากเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ซับซ้อนในเชิงของตัวแปรและสามารถใช้ทำนายอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นของวัสดุได้เป็นอย่างดีภายใต้สภาวะเงื่อนไขการอบแห้งนั้น ๆ โดย

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้สมการออบแห้งทางคณิตศาสตร์แบบเอมพิริคัลจำนวน 10 สมการ แสดงดังตารางที่ 2.1

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_{in} - M_{eq}} = \exp(-kt) \quad (2.11)$$

ตารางที่ 2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบเอมพิริคัลสำหรับทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้ง (Qilong et al., 2013)

ที่	ชื่อแบบจำลอง	ชนิดแบบจำลอง
1	Newton	$MR = \exp(-kt)$
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$
3	Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$
4	Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$
5	Modified Page	$MR = \exp(-kt)^n$
6	Two Term	$MR = a \exp(-k_0t) + b \exp(-k_1t)$
7	Two Term Exponential	$MR = a \exp(-kt) + (1-a)\exp(-kat)$
8	Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$
9	Approximation of diffusion	$MR = a \exp(-kt) + (1-a)\exp(-kbt)$
10	Midilli et al.	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น
 M_{in} คือ ความชื้นเริ่มต้น, %(d.b.)
 M_{eq} คือ ความชื้นสมดุล, %(d.b.)
 M_t คือ ความชื้นที่เวลาใด ๆ, %(d.b.)
 t คือ เวลาในการอบแห้ง, (min)
 k คือ ค่าคงที่ของการอบแห้ง, (min^{-1})

ตารางที่ 2.1 แสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของวัสดุ เพื่อหาแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับใช้อธิบายกราฟการอบแห้ง จากข้อมูลการทดลองสามารถวิเคราะห์แบบจำลองการอบแห้งได้โดยใช้วิธีการวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เชิงเส้น โดยแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดสำหรับใช้อธิบายพฤติกรรมของการอบแห้งจะพิจารณาจาก ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) และค่าไคสแคว (χ^2) โดยที่แบบจำลองที่ดีกว่าจะต้องให้ค่า R^2 สูงกว่า และให้ค่า RMSE และ χ^2 ต่ำกว่าแบบจำลองอื่นๆ ซึ่งค่าเหล่านี้สามารถคำนวณหาได้ดังต่อไปนี้

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^N (\overline{MR}_{pre,i} - MR_{pre,i})^2} \quad (2.12)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2 \right]^{1/2} \quad (2.13)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - n} \quad (2.14)$$

เมื่อ	$MR_{exp,i}$	คือ	อัตราส่วนความชื้นจากการทดลอง
	$MR_{pre,i}$	คือ	อัตราส่วนความชื้นจากการทำนาย
	$\overline{MR}_{pre,i}$	คือ	อัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยจากการทำนาย
	N	คือ	จำนวนชุดข้อมูลจากการทดลอง
	n	คือ	จำนวนค่าคงที่ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Afzal and Abe (1998) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของการอบแห้งด้วยการแผ่รังสีของอินฟราเรดที่มีผลต่ออัตราการแพร่ของความชื้นภายในมันฝรั่ง ซึ่งทำการทดลองโดยที่ค่าความเข้มอินฟราเรดอยู่ในช่วง 0.125-0.500 W/cm² ความหนาของแผ่นมันฝรั่งมีค่าอยู่ระหว่าง 2.5 กับ 10.5 mm ใช้ความเร็วลมของอากาศและความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 0.5 m/s และ 36% ตามลำดับ ผลการวิจัย

พบว่า การเพิ่มขึ้นของความเข้มของรังสีมีส่วนสำคัญต่อการเพิ่มขึ้นของการแพร่ความชื้นภายในมันฝรั่ง และค่า Activation Energy ของน้ำภายในมันฝรั่งกลับมีค่าแปรผกผันกับความหนาของชั้นมันฝรั่ง

Afzal, Abe, and Hikida (1999) ได้ทำการศึกษาการอบแห้งชั้นบางของข้าวบาร์เลย์ โดยทำการทดลองเปรียบเทียบการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวที่อุณหภูมิก่อนเข้าห้องอบแห้ง 40 55 และ 70 °C และความเร็วลม 0.5 m/s กับการอบแห้งโดยใช้รังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนที่ความเข้มรังสี 0.167 0.333 และ 0.500 W/cm² อุณหภูมิก่อนเข้าห้องอบแห้ง 40 55 และ 70 °C ที่ความเร็วลม 0.3 0.5 และ 0.7 m/s ผลการวิจัย พบว่า การอบแห้งโดยใช้รังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนจะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งน้อยกว่าการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียว และที่ความเข้มของรังสีอินฟราเรดเพิ่มขึ้นจะทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งน้อยลง และถ้ากำหนดความเข้มของรังสีอินฟราเรดที่ต่างกันและใช้ความเร็วลมต่างกันพบว่า ที่ความเข้มข้นของรังสีอินฟราเรดสูง ความเร็วลมต่ำจะสามารถลดพลังงานรวมได้มากที่สุด

Doymaz (2015) ศึกษาคุณภาพของแครอทแผ่นจากการอบแห้งด้วยอินฟราเรดที่กำลังอินฟราเรด 62 74 88 104 และ 125 วัตต์ แครอทหั่นเป็นแผ่นบางหนา 0.5 เซนติเมตร ผลจากการศึกษา พบว่า กำลังอินฟราเรดมีผลต่อคุณสมบัติของแครอทแผ่นเช่นการกินตัวและสี สำหรับแบบจำลองเลือกใช้แบบจำลอง 6 แบบจำลอง ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ดีที่สุดคือแบบจำลองของ Midilli et al. สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลสำหรับการอบแห้งแครอทหาจากสมการ Fick's law ซึ่งได้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลอยู่ระหว่าง 2.45×10^{-9} ถึง 7.38×10^{-9} และค่าพลังงานกระตุ้นหาจากสมการ Arrhenius ซึ่งได้ค่าพลังงานกระตุ้นเป็น 4.247 kW/kg

Ertekin and Yaldiz (2004) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของการอบแห้งชั้นบางมะเขือยาวด้วยเครื่องอบแห้งแบบอากาศร้อน ที่อุณหภูมิอบแห้ง 30–70 °C และความเร็วอากาศ 0.5–2.0 m/s แล้วได้ทำการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและความเร็วอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง อิทธิพลจากมะเขือยาวที่ผ่านการเตรียมตัวอย่างและความหนาของมะเขือยาวที่มีต่อพฤติกรรมของการอบแห้ง และศึกษาเวลาที่ใช้ในการอบแห้งและคุณภาพของมะเขือยาวหลังการอบแห้ง จากผลการศึกษา พบว่า เมื่ออุณหภูมิและความเร็วอากาศเพิ่มขึ้นทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งลดลง และของมะเขือยาวที่ผ่านการเตรียมตัวอย่างก็จะใช้เวลาการอบแห้งลดลงเช่นเดียวกัน ในส่วนของความหนาที่ลดลงของมะเขือยาวก็ทำให้เวลาการอบแห้งสั้นลง แต่ในทางตรงกันข้ามเมื่อเพิ่มอุณหภูมิมอบแห้งค่าความสว่างของสีจะลดลง แต่เมื่อเพิ่มความเร็วอากาศจะทำให้ค่าความสว่างของสีเพิ่มขึ้น และอัตราการกินตัวจะมีค่าสูงที่สุดที่อุณหภูมิมอบแห้ง 50 °C โดยที่ความหนาไม่มีอิทธิพลต่อค่าสี และในส่วนของ

การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่า แบบจำลอง Midilli et al. ให้ผลการทำนายการอบแห้งมะเขือยาวดีที่สุดเมื่อเทียบกับแบบจำลองอื่น ๆ

Hebbbar, Vishwanathan, and Ramesh (2004) ได้ทำการศึกษาการพัฒนาเครื่องอบแห้งร่วมระหว่างลมร้อนและอินฟราเรดเพื่อนำมาใช้กับผัก โดยทำการทดลองอบแห้งมันฝรั่งและแคโรท โดยใช้รังสีอินฟราเรด ลมร้อน และใช้รังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน กำหนดให้อุณหภูมิภายในกระบวนการอบแห้งอยู่ที่ 80°C เมื่อทำการอบแห้งลมร้อนเพียงอย่างเดียวจะกำหนดอุณหภูมิของอากาศร้อนที่ผ่านเข้าสู่กระบวนการอบแห้งมีอุณหภูมิ 80°C ส่วนแบบร่วมจะใช้อุณหภูมิ 40°C ความเร็วลมร้อน 1.0 m/s ผลการทดลองพบว่า การใช้ระบบลมร้อนร่วมกับอินฟราเรดจะทำให้ประหยัดพลังงานได้ 63% และลดเวลาในกระบวนการอบแห้งได้ 48% เมื่อทำการเปรียบเทียบกับการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียว

Mongpraneet, Abe, and Tsurusaki (2002) ได้ทำการศึกษาคุณลักษณะของการอบแห้งใบหอมด้วยระบบสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรด ไกล โดยมีเงื่อนไขคือ ความยาวของใบหอมเท่ากับ 5 และ 10 mm ความแรงของรังสีอินฟราเรดไกลถูกปรับที่ 40 50 60 70 80 90 และ 100 W และระยะห่างจากหลอดรังสีอินฟราเรดไกลกับใบหอมเท่ากับ 7.5 10 12 15.2 17 20 และ 22.5 cm อบแห้งใบหอมที่ความชื้นเริ่มต้น 91.3-93.5 % (w.b.) อบแห้งจนมีความชื้นสุดท้าย 5 % (w.b.) ผลการทดลองพบว่า อัตราการอบแห้งใบหอมมี 3 ระยะคือ ระยะการให้ความร้อน ระยะการอบแห้งคงที่ และระยะการอบแห้งลดลง โดยที่อัตราการอบแห้งและปริมาณความชื้นที่เวลาต่างๆ ในการอบแห้งใบหอม 5 และ 10 mm มีค่าใกล้เคียงกันมาก และอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นตามความแรงของรังสีอินฟราเรดไกลที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้เวลาในการอบแห้งใบหอมเพิ่มขึ้นตามระยะห่างจากหลอดรังสีอินฟราเรดไกลกับใบหอมที่อบแห้งที่เพิ่มขึ้น และเวลาการอบแห้งใบหอมลดลงตามระดับความแรงของรังสีอินฟราเรดไกลที่เพิ่มขึ้น พบว่า ที่ระดับความแรงของรังสีอินฟราเรดไกลที่เหมาะสมที่สุดในการอบแห้งใบหอมด้วยระบบสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกลเท่ากับ 70 W เพราะที่ระดับความแรงของรังสีอินฟราเรดไกล 70 W มีอัตราการคืนตัวมากกว่าที่ระดับความแรงรังสีอินฟราเรดไกลต่าง ๆ ส่วนในวิเคราะห์การเปลี่ยนสีของใบหอมอบแห้งและคืนตัวแล้ว พบว่าความเขียวลดลงตามระดับความแรงของรังสีอินฟราเรดไกลที่เพิ่มขึ้น

Madamba, Driscoll, and Buckle (1996) ได้ทำการศึกษาการอบแห้งชั้นบางของขึ้นกระเทียมที่ความหนา 2-4 มิลลิเมตร ทำการอบแห้งด้วยอุณหภูมิ 50-80 องศาเซลเซียส ความเร็วอากาศ 0.5-1 เมตรต่อวินาทีจากการวิเคราะห์ (ANOVA) พบว่าอุณหภูมิและความหนาของขึ้นกระเทียมมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่ออัตราการอบแห้ง ขณะที่ความชื้นสัมพัทธ์ (ที่มีค่าต่ำ) และความเร็วอากาศไม่มีนัยสำคัญต่ออัตราการอบแห้ง สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของน้ำมีค่า

ระหว่าง 2 ถึง 4.2×10^{-10} ตารางเมตรต่อวินาทีตลอดช่วงอุณหภูมิที่ทำการทดลอง พลังงานกระตุ้นมีค่า 989 กิโลจูลต่อกิโลกรัม จากข้อมูลการทดลองสามารถวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จำนวน 4 แบบจำลอง พบว่าแบบจำลอง Page และ Two-compartment ให้ผลการทำนายดีกว่าแบบจำลอง Exponential และ Thomson และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลที่ขึ้นกับอุณหภูมิสามารถอธิบายได้จากความสัมพันธ์ของ Arrhenius

Sharma, Verma, and Pathare (2005) ได้ทำการศึกษาการอบแห้งหัวหอมซอยแบบชั้นบางโดยใช้การอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน ที่กำลังอินฟราเรด 300 400 และ 500 W ความเร็วลม 1 1.25 และ 1.5 m/s และอุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าห้องอบแห้ง 35 40 และ 45 °C เพื่อหาอัตราส่วนความชื้นและอัตราการอบแห้ง จากผลการทดลอง พบว่า ปริมาณความชื้นจะลดลงอย่างรวดเร็วในตอนเริ่มต้นและหลังจากนั้นจะลดลงอย่างช้า ๆ จนถึงสิ้นสุดการอบแห้ง และที่อุณหภูมิของอากาศ 35 °C ความเร็วลม 1.0 m/s กำลังอินฟราเรด 300 400 และ 500 W จะใช้ระยะเวลาในการอบแห้ง 510 420 และ 330 นาที และการอบแห้งเมื่ออุณหภูมิของอากาศเพิ่มขึ้น โดยที่ความเร็วลมคงที่และเปรียบเทียบที่กำลังอินฟราเรดคงที่ พบว่า ระยะเวลาการอบแห้งลดลง

Toğrul (2005) ได้ทำการศึกษาการอบแห้งแอปเปิลด้วยอินฟราเรด ในช่วงอุณหภูมิอบแห้ง 50-80 °C และได้ทำการพิจารณาเลือกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถใช้ในการทำนายการอบแห้งของแอปเปิล ได้แก่ สมการของ Newton, Page, Modified Page, Wang and Singh, Henderson and Pabis, Logarithmic, Diffusion approach, Simplified Fick's diffusion SFFD equation, Modified Page equation-II และสมการของ Midilli ผลการวิจัยพบว่าสมการของ Midilli สามารถทำนายการอบแห้งได้ดีที่สุดในทุกช่วงของการอบแห้ง

ประทีป ตุ่มทอง อำไพศักดิ์ ทิบุญญา ประพันธ์พงษ์ สมศิลา และชนกร หอมจำปา (2555) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของการอบแห้งปลานิลด้วยอากาศร้อน และหาสมการการอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมสำหรับทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้ง โดยทำการทดลองอบแห้งภายใต้เงื่อนไขความเร็วลม 1.0 1.5 และ 2.0 m/s และอุณหภูมิอบแห้ง 50 60 และ 70 °C พารามิเตอร์ที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการศึกษา ได้แก่ อัตราการอบแห้ง และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ผลจากการศึกษา พบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วลม หรือเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าสมการของ Two Term สามารถทำนายพฤติกรรมของการอบแห้งปลานิลด้วยอากาศร้อนดีที่สุด โดยให้ค่า R^2 (0.9999) มากที่สุด และ RMSE (0.092) น้อยที่สุด

วันเพ็ญ หวานระรื่น ภาณุพงศ์ บุญเพียร และณรงค์ อึ้งกิมบัวน (2554) ได้ทำการศึกษาจลนพลศาสตร์และแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งพริกไทยด้วยตู้อบลมร้อน

ที่อุณหภูมิ 50 70 และ 90 °C จากผลการทดลองจะใช้แบบจำลองการอบแห้งจำนวน 11 แบบจำลอง เพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองพริกไทย โดยความถูกต้องของแบบจำลองจะพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ไคสแควร์ และรากที่สองของค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดกำลังสอง จากผลการทดลอง พบว่า อัตราการอบแห้งพริกไทยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้อุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้น แบบจำลองการอบแห้งแบบ Logarithm จะให้ผลการทำนายการอบแห้งพริกไทยดีที่สุด โดยให้ค่า R^2 สูงที่สุดในขณะที่ให้ค่า χ^2 และ RMSE น้อยที่สุด

ภราดร หนูทอง ชีรพงษ์ วุฒิงาม นราวัฒน์ ปิ่นพะสงค์ ศิวะ อัจฉริยวิริยะ และอารีย์ อัจฉริยวิริยะ (2551) งานวิจัยนี้ได้สร้างเครื่องอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนสำหรับห้องปฏิบัติการ แล้วทำการหาความสัมพันธ์ของอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งและความชื้นของตัวอย่างหลังอบแห้ง พร้อมทั้งศึกษาอิทธิพลของกำลังอินฟราเรดและ/หรืออุณหภูมิลมร้อนที่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง โดยทำแต่ละการทดลองทำการอบแห้งแห้งมันฝรั่งขนาด 10x10x50 mm³ จำนวน 1.0 kg ที่กำลังอินฟราเรดขนาด 100 500 และ 1000 W และ/หรืออุณหภูมิลมร้อน 40 50 และ 80 °C ใช้ความเร็วลมคงที่ 0.7 m/s และระยะห่างระหว่างมันฝรั่งกับแท่งอินฟราเรด 200 mm ลดความชื้นมันฝรั่งจนเหลือ 10 %(d.b.) จากผลการทดลอง พบว่า อุณหภูมิภายในห้องอบแห้งและความชื้นของมันฝรั่งหลังการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนค่อนข้างมีความสัมพันธ์กันอีกทั้งยัง พบว่า การอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวหรือการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนที่ใช้ขนาดกำลังอินฟราเรดต่ำ ๆ อิทธิพลของกำลังอินฟราเรดมีผลน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับผลของอุณหภูมิลมร้อนที่มีผลอย่างมากต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิวัสดุและการเพิ่มขึ้นของอัตราการอบแห้งทำให้ใช้เวลาอบแห้งลดลง ส่วนการอบแห้งมันฝรั่งด้วยอินฟราเรดอย่างเดียวหรือการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนที่กำลังอินฟราเรดสูง ๆ พบว่าเมื่ออิทธิพลของกำลังอินฟราเรดมีผลอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับผลของอุณหภูมิลมร้อนที่มีผลน้อยต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิวัสดุและการเพิ่มขึ้นของอัตราการอบแห้ง

สุนทร โมงปราณีต, Takemi Abe และทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์ (2548) ได้ทำการศึกษาทดลองการอบแห้งเนื้อลำไยด้วยอินฟราเรดเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการอบแห้งเนื้อลำไย ในช่วงความเร็วลม 0.4-1.8 m/s ซึ่งจะทำการอบจนเหลือความชื้นสุดท้าย 35 %(d.b.) พบว่า ฮีตเตอร์อินฟราเรดแผ่นเซรามิกสี่เหลี่ยมขนาด 800 W จำนวน 2 หลอด จะได้คุณภาพของเนื้อลำไยทางด้านสีและความเหนียวดีที่สุด โดยระยะห่างระหว่างผิวลำไยถึงผิวแท่งอินฟราเรดที่เหมาะสมคือ 25 cm. ซึ่งจะใช้พลังงานในการอบแห้งต่ำที่สุด ในส่วนของความเร็วลม พบว่าระยะเวลาการอบแห้งจะลดลงเมื่อความเร็วลมมีค่าเพิ่มขึ้น อุณหภูมิวิกฤติของเนื้อลำไยมีค่าเท่ากับ 80 °C ซึ่งด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์พบว่าที่ความเร็วลม 1.1 m/s จะได้คุณภาพเนื้อลำไยที่ดีที่สุด

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ได้ทำการทดลองอบแห้งขมิ้นชันด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดระดับห้องปฏิบัติการ โดยทำการทดลองอบแห้งขมิ้นชันที่สภาวะการอบแห้งต่าง ๆ ได้แก่ การอบแห้งด้วยลมร้อน การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดแบบไม่ควบคุม อุณหภูมิอากาศอบแห้ง การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดแบบควบคุมอุณหภูมิอากาศอบแห้ง และการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด โดยมีวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งขมิ้นชัน แล้วนำข้อมูลมาวิเคราะห์เพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมของการอบแห้งชั้นบางขมิ้นชัน หาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของขมิ้นชัน หาค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งขมิ้นชัน และวิเคราะห์สีของขมิ้นชันภายหลังการอบแห้ง โดยมีรายละเอียดของการศึกษาดังนี้

วัตถุดิบ

ขมิ้นชัน (Turmeric) ที่ใช้ในการทดลอง เป็นแหล่งวัตถุดิบที่ซื้อมาจากตลาดสดชลบุรี อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี แสดงดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 ขมิ้นชันสด

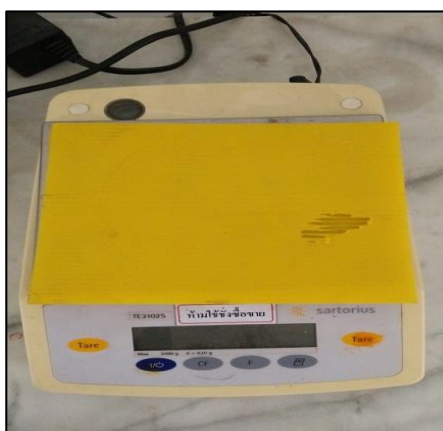
อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมือวัด

1. เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอลยี่ห้อ Sartorius ค่าความละเอียด ± 0.01 กรัม
2. เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอลยี่ห้อ Sartorius ค่าความละเอียด ± 0.001 กรัม
3. เครื่องวัดความเร็วลม (Anemometer) รุ่น TW-02
4. เวอร์เนียคาร์ลิปเปอร์ ค่าความละเอียด ± 0.05 mm
5. เครื่องวัดสียี่ห้อ Hunter Lab รุ่น Color Flex
6. กระป๋องลูมิเนียมสำหรับหาความชื้น (Moisture can)
7. ตู้อบไฟฟ้า ยี่ห้อ Binder สำหรับหามวลแห้ง



ภาพที่ 3.2 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอลยี่ห้อ Sartorius รุ่น TE 3102S ที่มีความละเอียด ± 0.01 กรัม



ภาพที่ 3.3 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอลยี่ห้อ Sartorius รุ่น TE 313S ที่มีความละเอียด ± 0.001 กรัม



ภาพที่ 3.4 เครื่องวัดความเร็วลม



ภาพที่ 3.5 ครอบป้องกันนิยมน้ำสำหรับหาความชื้น



ภาพที่ 3.6 ตู้อบไฟฟ้า ยี่ห้อ Binder



ภาพที่ 3.7 เครื่องวัดสีหือ Hunter Lab รุ่น Color Flex

เครื่องอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด

1. การอบแห้งขมิ้นชันด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดในการทดลอง แสดงดังภาพที่ 3.8 โดยมีรายละเอียดของเครื่องอบแห้งดังนี้



ภาพที่ 3.8 เครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดระดับห้องปฏิบัติการ

- 1.1 ห้องอบแห้งเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมขนาด $40 \times 40 \times 40 \text{ cm}^3$
- 1.2 ขดลวดความร้อนขนาด 1,500 Watt จำนวน 3 ตัว
- 1.3 พัดลมแรงเหวี่ยงใบพัดโค้งหน้า ขับด้วยมอเตอร์ขนาด 0.5 แรงม้า

1.4 แท่งอินฟราเรดรูปสี่เหลี่ยมขนาด 1000 Watt จำนวน 2 แท่ง วางในแนวขนานกับ ตะแกรงอบแห้งและห่างจากวัสดุอบแห้ง 0.10 m

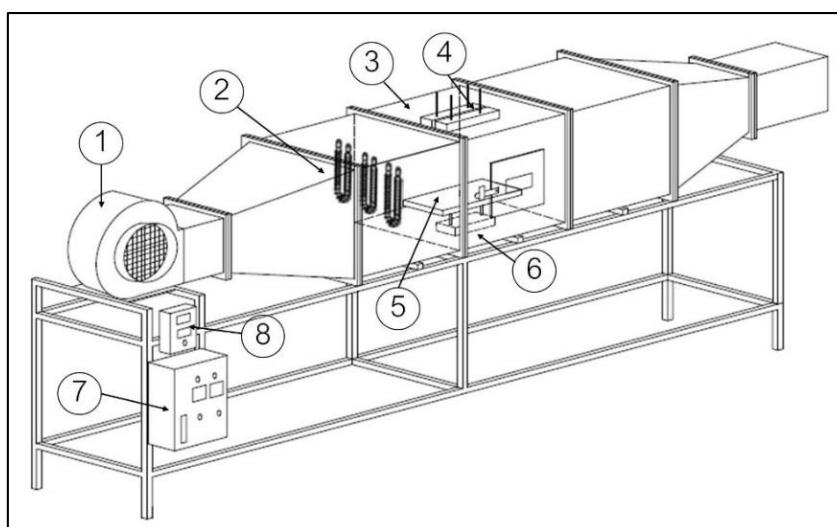
1.5 ชุดควบคุมอุณหภูมิอบแห้งด้วยหน่วยควบคุมอุณหภูมิชนิด PID (Proportional–Integral–Derivative Controller) ซึ่งมีเทอร์โมคัปเปิลชนิด K เป็นตัวเซนเซอร์ควบคุมอุณหภูมิ ที่มีค่า ความละเอียด ± 1 °C

1.6 ชุดควบคุมกำลังไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่แท่งอินฟราเรด

1.7 ชุดควบคุมความเร็วอากาศ

1.8 ชุดอุปกรณ์อ่านค่าน้ำหนัก (Load cell)

1.9 กิโลวัตต์-ชั่วโมงมิเตอร์แบบใช้กับไฟฟ้าหนึ่งเฟส สำหรับวัดปริมาณพลังงาน ไฟฟ้าที่ใช้ในระบบอบแห้งทั้งหมด



ภาพที่ 3.9 แสดงตำแหน่งส่วนประกอบหลักของเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด

- (1. พัดลม (Blower) 2. ชุดลดความร้อน (Heaters) 3. ห้องอบแห้ง (Drying chamber)
4. แท่งอินฟราเรด (Infrared heaters) 5. ตะแกรง (Tray) 6. ชุดอ่านค่าน้ำหนัก (Load cell)
7. ชุดควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Controller) 8. ชุดควบคุมกำลังไฟฟ้า (Regulator))

การทำงานของเครื่องอบแห้งลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดสามารถทำการทดลอง อบแห้งได้ 3 ระบบ ได้แก่ ลมร้อน อินฟราเรด และลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด สำหรับการ ทดลองด้วยลมร้อนนั้นจะบังคับอากาศจากภายนอกเข้าสู่เครื่องอบแห้งด้วยพัดลมแบบแรงเหวี่ยง ไบพัด โคลิ่งหน้า (1) ซึ่งสามารถปรับความเร็วรอบได้ ทำให้อากาศจากภายนอกเคลื่อนที่ผ่านชุด

ลดความร้อน (2) เข้าสู่ห้องอบแห้ง (3) โดยทิศทางการไหลของอากาศจะไหลขนานกับตะแกรงอบแห้ง (5) และในส่วนของ การทดลองด้วยรังสีอินฟราเรด (4) จะถูกควบคุมด้วยชุดควบคุมกำลังไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่แท่งอินฟราเรด (8) โดยที่การทดลองทั้ง 2 แบบ สามารถควบคุมอุณหภูมิเข้าห้องอบแห้งและอุณหภูมิอากาศอบแห้งภายในห้องอบแห้งด้วยชุดควบคุมอุณหภูมิ (PID) (7) โดยมีเทอร์โมคัปเปิลเป็นตัวเซนเซอร์อุณหภูมิเช่นเดียวกัน การบันทึกค่าอุณหภูมิจะอ่านค่าได้จากชุดควบคุมอุณหภูมิ (PID) การวัดความเร็วอากาศจะใช้เครื่องวัดความเร็วอากาศ (Anemometer) และการเก็บข้อมูลน้ำหนักของขมิ้นชันจะบันทึกจากชุดอ่านค่าน้ำหนัก (Load cell) (6)

วิธีดำเนินการวิจัย

มีขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยดังต่อไปนี้

1. ศึกษา และค้นคว้าข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

1.1 ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับทฤษฎีการอบแห้ง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้ง และคุณภาพทางด้านสีภายหลังการอบแห้ง

1.2 ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งด้วยลมร้อน รังสีอินฟราเรด และลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด

1.3 ศึกษาวิธีการทำวิจัยจากเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องต่าง ๆ

2. วิธีดำเนินการทดลองอบแห้งขมิ้นชันที่สภาวะการอบแห้งต่าง ๆ

2.1 นำขมิ้นชันสดมาหั่นให้มีขนาดหน้าประมาณ 2 มิลลิเมตร แล้วนำมาทำการทดลองอบแห้งที่สภาวะต่าง ๆ ดังนี้

สภาวะที่ 1 อบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 °C ความเร็วของอากาศ 0.5 m/s

สภาวะที่ 2 อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด 600 800 และ 1,000 W

สภาวะที่ 3 อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด 600 800 และ 1,000 W แบบควบคุมอุณหภูมิอากาศภายในห้องอบแห้งที่ 40 50 และ 60 °C

สภาวะที่ 4 อบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดที่ขนาดกำลังอินฟราเรด 600 800 และ 1,000 W อุณหภูมิลมร้อน 40 50 และ 60 °C ความเร็วของอากาศ 0.5 m/s

2.2 ก่อนทำการทดลองให้เปิดเครื่องอบแห้งเพื่อเป็นการอุ่นเครื่องประมาณ 30 นาที

2.3 บันทึกน้ำหนักของขมิ้นชันในระหว่างการอบแห้ง ด้วยเซนเซอร์น้ำหนัก (Load cell) โดยเก็บข้อมูลทุก ๆ 5 นาที ในครึ่งชั่วโมงแรก หลังจากนั้นเก็บข้อมูลทุก ๆ 15 นาที

2.4 บันทึกปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้งขมิ้นชันด้วยกิโวลต์-ชั่วโมงเมตร

2.5 ทดสอบคุณภาพด้านสีของขมิ้นชันภายหลังการอบแห้ง โดยกำหนดความชื้นสุดท้ายของทุกเงื่อนไขการทดลองในช่วง 5-10 %(d.b.)

2.6 หาความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสุดท้าย

นำขมิ้นชันที่ผ่านการอบแห้งในแต่ละสภาวะการอบแห้งต่าง ๆ ออกมาทำการชั่งน้ำหนักและนำมาอบแห้งใหม่อีกครั้งเพื่อหามวลแห้งของขมิ้นชัน โดยการนำขมิ้นชันมาอบแห้งด้วยอากาศร้อนด้วยตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 103°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง (AOAC, 1990) ทำการชั่งน้ำหนักอีกครั้งและนำไปหาความชื้นต่อไป

3. การวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลอง

3.1 การวิเคราะห์เพื่อหาค่าความชื้นและอัตราส่วนความชื้น

การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งขมิ้นชันในรูปของอัตราส่วนความชื้น โดยนำข้อมูลน้ำหนักของวัสดุ (w) ที่เวลาต่าง ๆ และน้ำหนักแห้ง (d) มาคำนวณหาความชื้นวัสดุตั้งสมการที่ (2.2) และคำนวณหาอัตราส่วนความชื้นตั้งสมการที่ (2.7) เป็นการคำนวณค่าโดยประมาณ คือไม่คิดค่าความชื้นสมดุล โดยตั้งสมมติฐานว่าความชื้นสมดุลมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความชื้นเริ่มต้นและความชื้นที่เวลาใด ๆ

3.2 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล

การวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของขมิ้นชัน โดยใช้สมการการแพร่ความชื้นตามกฎข้อที่สองของฟิคส์ (Fick's Second Law of Diffusion) เพื่อใช้ในการทำนายการเคลื่อนที่ของความชื้น ดังสมการที่ (2.5) โดยที่ผลเฉลยทั่วไปของสมการสำหรับการแพร่ความชื้นภายในวัสดุ แสดงดังสมการที่ (2.8) ภายใต้สมมติฐานที่ว่า การแพร่ของน้ำออกจากวัสดุเกิดจากเกรเดียนต์ของความเข้มข้นของความชื้น และสมมุติให้วัสดุมีลักษณะเป็นแผ่นบางซึ่งกว้างและยาวมาก (infimite slab) การถ่ายเทความชื้นเกิดขึ้นในทิศทางความหนาเพียงทิศทางเดียว โดยที่อุณหภูมิและสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลมีค่าคงที่และไม่เกิดการหดตัวของวัสดุในระหว่างทำการอบแห้ง

ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลจะใช้วิธีแก้ปัญหาคณิตศาสตร์ด้วยสมการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น โดยข้อมูลผลการทดลองระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งมาคำนวณโดยใช้สมการที่ (2.8) จากนั้นนำค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลซึ่งเป็นค่าที่ได้จากผลการทดลองมาหาค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) และค่า Arrhenius factor (D_0) โดยนำ

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลและอุณหภูมิอบแห้งกับค่าอัตราส่วนของน้ำหนักของตัวอย่างต่อกำลังของรังสีอินฟราเรดมาคำนวณในสมการของ Arrhenius และสำหรับการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้น สามารถคำนวณได้ด้วยการนำค่า D_0 และ E_a ที่ได้จากสมการที่ (2.9) และ (2.10) แทนค่ากลับในสมการอีกครั้ง โดยแทนค่าอุณหภูมิอบแห้งและค่าอัตราส่วนของน้ำหนักของตัวอย่างต่อกำลังของรังสีอินฟราเรดที่ใช้ในการทดลองลงไป ตามลำดับ ในส่วนของการวิเคราะห์ค่า R^2 RMSE และ χ^2 นั้นเป็นการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากสมการของ Arrhenius

นอกจากนี้การวิเคราะห์ผลการทดลองนั้น นำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์เปรียบเทียบระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลซึ่งเป็นค่าที่ได้จากผลการทดลองกับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และเขียนกราฟความสัมพันธ์เปรียบเทียบค่าอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากผลการทดลองกับค่าอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวัสดุที่มีรูปทรงเป็นแผ่นระนาบที่มีความยาวมาก ๆ (infinite slab) ซึ่งได้มาจากการแทนค่ากลับของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลที่ได้จากผลการทดลอง

3.3 การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การวิเคราะห์ค่าคงที่ของการอบแห้งที่เกิดจากการวิเคราะห์ด้วยสมการอบแห้งแบบเอมไพริคัลนั้นจะพิจารณาแบบจำลองการการอบแห้งชั้นบางตามตารางที่ (2.1) โดยนำข้อมูลอัตราส่วนความชื้น (MR) ที่คำนวณดังสมการที่ (2.7) กับเวลาอบแห้ง (t)

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ความถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear regression) เพื่อหาสมการอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมที่สุด โดยจะพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square error, RMSE) และค่าไคสแควร์ (reduced chi-square, χ^2) ซึ่งแบบจำลองที่ดีจะให้ค่า R^2 ที่สูงสุด และให้ค่า RMSE และค่า χ^2 น้อยที่สุด โดยนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาคำนวณดังสมการที่ (2.12) ถึง (2.14) ตามลำดับ

3.4 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์พลังงานจำเพาะ

สำหรับการวิเคราะห์ค่าความสัมพันธ์พลังงานจำเพาะและค่าสีของขมิ้นชันชั้นบางหลังการอบแห้ง โดยเลือกทำการทดลองอบแห้งขมิ้นชันบางเงื่อนไขการทดลอง ดังต่อไปนี้

สภาวะที่ 1 อบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 °C ความเร็วของอากาศ 0.5 m/s

สภาวะที่ 2 อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด 600 800 และ 1,000 W

สภาวะที่ 3 อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด 600 800 และ 1,000 W แบบควบคุมอุณหภูมิ อากาศภายในห้องอบแห้งที่ 50 และ 60 °C

สภาวะที่ 4 อบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดที่ขนาดกำลังอินฟราเรด 600 800 และ 1,000 W อุณหภูมิลมร้อน 40 50 และ 60 °C ความเร็วของอากาศ 0.5 m/s

โดยนำข้อมูลผลการทดลองที่ได้จากการบันทึกข้อมูลต่าง ๆ ได้แก่ ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้งขมิ้นชันที่สภาวะการอบแห้งต่าง ๆ ที่บันทึกจากกิโลวัตต์-ชั่วโมงมิเตอร์ (E_p) ข้อมูลความชื้นเริ่มต้น (M_{in}) ความชื้นสุดท้าย (M_f) และมวลแห้งของวัสดุ (W_d) โดยที่ขมิ้นชันมีความชื้นเริ่มต้นอยู่ในช่วง 480-640 % (d.b.) และกำหนดความชื้นสุดท้ายของการทดลองในช่วง 7-10 % (d.b.) และนำข้อมูลทั้งหมดมาคำนวณค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่สภาวะการอบแห้งต่าง ๆ แสดงดังสมการที่ (2.3) และนำตัวอย่างขมิ้นชันแห้งไปทำการวัดค่าสี ดังที่จะกล่าวในหัวข้อถัดไป

3.5 การวิเคราะห์คุณภาพด้านสี

การทดสอบคุณภาพทางด้านสีของขมิ้นชันด้วยเครื่องวัดสียี่ห้อ Hunter Lab รุ่น Color Flex วัดค่าสีของขมิ้นชันในเทอมของตัวแปร L^* , a^* , b^* โดยที่ค่า L^* (lightness) แสดงค่าความสว่างและค่า a^* (redness) แสดงค่าสีแดงและสีเขียว และค่า b^* (yellowness) แสดงค่าสีเหลืองและสีน้ำเงิน

สำหรับวิธีการทดลองวัดสีของขมิ้นชันนั้นจะต้องสอบเทียบเครื่องวัดสีด้วยแผ่นสีดำและแผ่นสีขาวมาตรฐาน ในส่วนของการทดลองวัดสีนั้นจะนำตัวอย่างขมิ้นชันแห้งออกจากตะแกรงอบแห้งหลังจากสิ้นสุดการทดลองอบแห้ง ซึ่งแต่ละเงื่อนไขการทดลองอบแห้งนั้นจะสุ่มตัวอย่างออกมาจากตะแกรงอบแห้งจำนวน 15 ชิ้น โดยนำตัวอย่างขมิ้นชันแต่ละชิ้นมาวางลงบนช่องทดสอบแล้วครอบด้วยฝาสีดำอีกชั้น โดยในการวัดสีแต่ละครั้งนั้นจะทำการวัดสีขมิ้นชันแห้งทั้ง 2 ด้าน โดยการวัดสีแต่ละชิ้นตัวอย่างแห้งจะทำการวัดสีด้านละ 2 ครั้ง หลังจากนั้นนำข้อมูลดังกล่าวไปวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยวิธี “one-way Analysis of variance” และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี “Duncan’s post-hoc test” ซึ่งผลการทดลองค่าสีขมิ้นชันจะแสดงในรูปของ “ค่าเฉลี่ย \pm ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน” และนำไปคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงของสีโดยรวม (ΔE) สามารถคำนวณดังสมการที่ (2.4)

บทที่ 4

ผลการวิจัย

งานวิจัยนี้จะนำเสนอผลการทดลองการอบแห้งขมิ้นชันด้วยเครื่องอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน โดยมีเงื่อนไขการทดลองดังต่อไปนี้

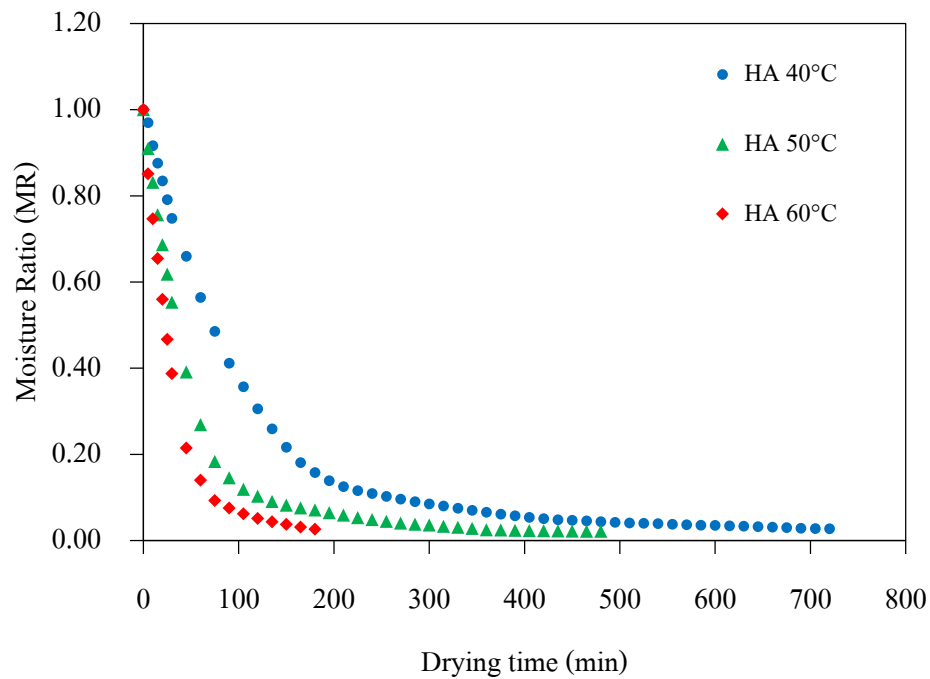
1. ทดลองอบแห้งด้วยอุณหภูมิลมร้อน 40 50 และ 60 °C ความเร็วของอากาศ 0.5 m/s
2. ทดลองอบแห้งด้วยกำลังของรังสีอินฟราเรด 600 800 และ 1,000 W และทดลองอบแห้งโดยทำการควบคุมอุณหภูมิของอากาศในห้องอบแห้งเท่ากับ 40 50 และ 60 °C
3. ทดลองอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดที่กำลังอินฟราเรด 600 800 และ 1,000 W อุณหภูมิลมร้อน 40 50 และ 60 °C ความเร็วของอากาศ 0.5 m/s

แล้วทำการวิเคราะห์จลนพลศาสตร์และปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้งขมิ้นชันต่ออัตราส่วนความชื้นเทียบกับเวลา วิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล เพื่อหาค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งขมิ้นชัน และวิเคราะห์สีของขมิ้นชันภายหลังการอบแห้ง โดยแต่ละเงื่อนไขการทดลองใช้ขมิ้นชันหนักประมาณ 50-60 g ความชื้นเริ่มต้น 420-630 %(d.b.) ทำการอบแห้งขมิ้นชันจนเหลือความชื้นสุดท้ายประมาณ 5-10 %(d.b.) ซึ่งรายละเอียดผลการศึกษามีดังนี้

ผลการทดลองหาจลนพลศาสตร์และปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้งขมิ้นชันที่สภาวะการอบแห้งต่าง ๆ

การอบแห้งด้วยลมร้อน

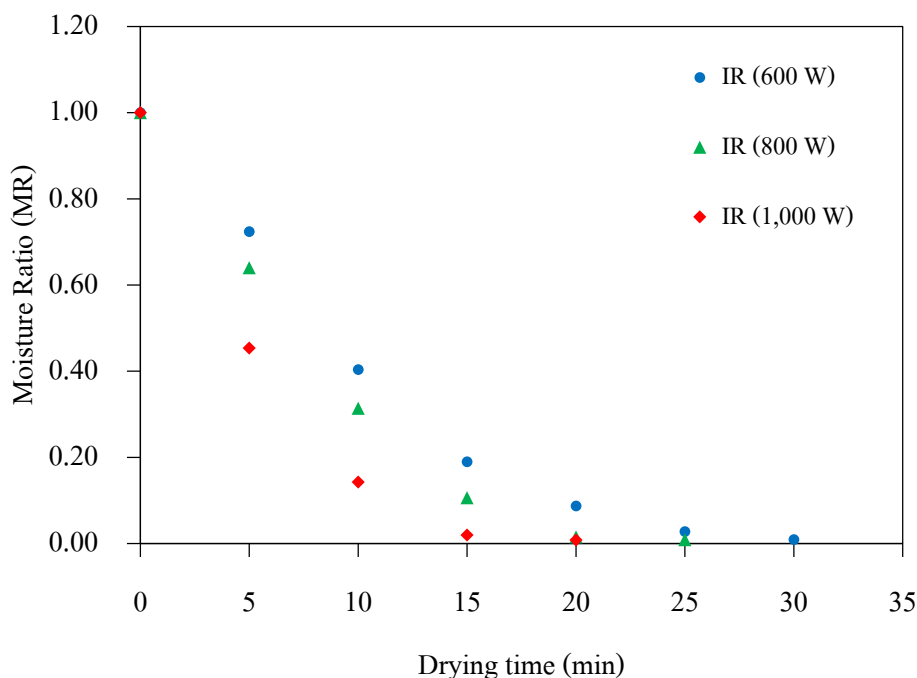
จากผลการทดลองการอบแห้งขมิ้นชันด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 40 50 และ 60 °C ความเร็วของอากาศ 0.5 m/s แสดงดังภาพที่ 4.1 พบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้ความชื้นในขมิ้นชันลดลงได้เร็วกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้มากขึ้นส่งผลให้ความชื้นในขมิ้นชันเกิดการระเหยได้ดีขึ้น ทำให้อัตราการอบแห้งมีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาในการอบแห้งลดลง ซึ่งการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 °C จะใช้เวลาในการอบแห้งประมาณ 720 360 และ 180 นาที ตามลำดับ



ภาพที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นกับเวลาของการอบแห้งขมิ้นชันด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 °C

การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด

จากผลการทดลองการอบแห้งขมิ้นชันด้วยกำลังอินฟราเรด 600 800 และ 1,000 W แสดงดังภาพที่ 4.2 พบว่า การเพิ่มขึ้นของกำลังอินฟราเรดส่งผลทำให้อัตราการอบแห้งมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มพลังงานจากแท่งอินฟราเรดให้กับวัสดุมากขึ้นตามกำลังที่ป้อนให้ ทำให้อุณหภูมิวัสดุเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ส่งผลให้ความชื้นภายในวัสดุระเหยได้เร็วขึ้น มีผลให้ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งลดลง โดยการอบแห้งด้วยกำลังอินฟราเรด 600 800 และ 1,000 W ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งเป็น 30 25 และ 20 นาที ตามลำดับ

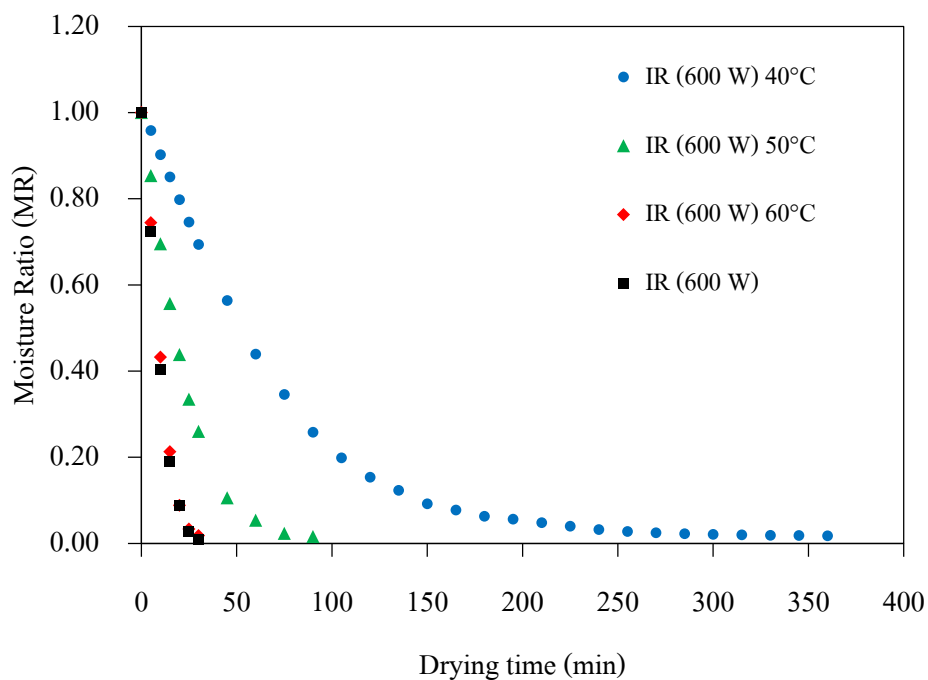


ภาพที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นกับเวลาของการอบแห้งขมิ้นชันด้วยกำลังอินฟราเรด 600 800 และ 1,000 W

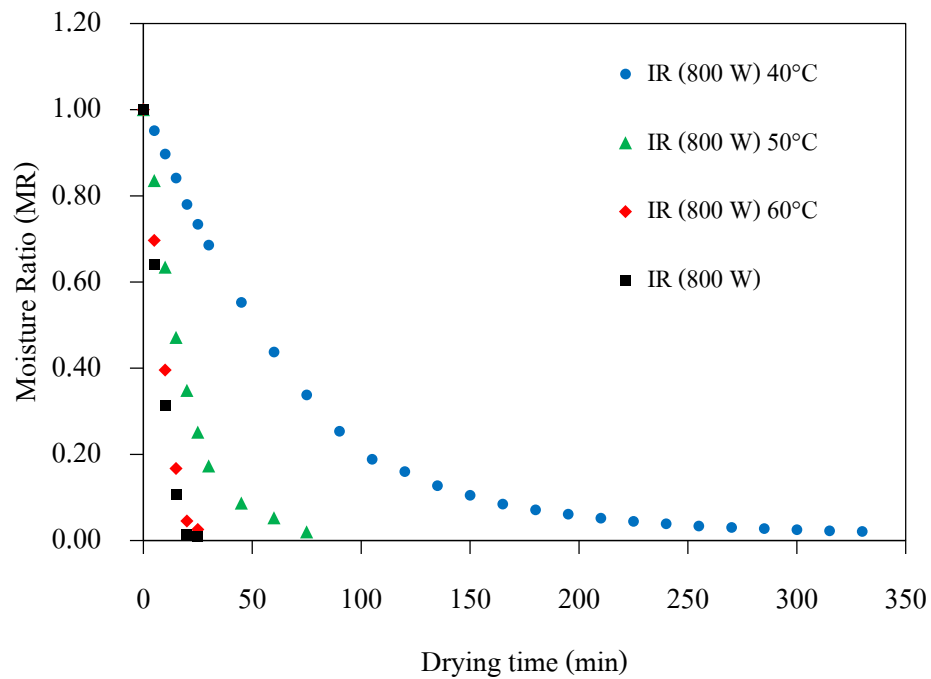
สำหรับผลการทดลองการอบแห้งขมิ้นชันด้วยกำลังอินฟราเรด 600 800 และ 1,000 W โดยทำการควบคุมอุณหภูมิของอากาศในห้องอบแห้งเท่ากับ 40 50 และ 60 °C แสดงดังภาพที่ 4.3 พบว่า ปัจจัยของอุณหภูมิต่างส่งผลต่ออัตราการอบแห้ง โดยที่การอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำจะใช้อัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง ทำให้ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งน้อยลง ซึ่งการอบแห้งด้วยกำลังอินฟราเรด 600 W ที่อุณหภูมิต่ำ 40 50 และ 60 °C จะใช้เวลาในการอบแห้งประมาณ 360 90 และ 30 นาที ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 4.3 (ก) ส่วนที่ กำลังอินฟราเรด 800 W ที่อุณหภูมิต่ำ 40 50 และ 60 °C จะใช้เวลาในการอบแห้งประมาณ 330 75 และ 25 นาที ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 4.3 (ข) และกำลังอินฟราเรด 1,000 W ที่อุณหภูมิต่ำ 40 50 และ 60 °C จะใช้เวลาในการอบแห้งประมาณ 225 60 และ 25 นาที ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 4.3 (ค)

ผลการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนความชื้นกับเวลาของสภาวะการอบแห้งขมิ้นชันด้วยรังสีอินฟราเรดที่ กำลังอินฟราเรด 600 800 และ 1,000 W โดยทำการควบคุมอุณหภูมิอากาศอบแห้งเท่ากับ 40 50 และ 60 °C และไม่ควบคุมอุณหภูมิอากาศอบแห้ง แสดงดังภาพที่ 4.3 พบว่า การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่ กำลังอินฟราเรดต่าง ๆ แบบไม่ควบคุมอุณหภูมิอากาศ

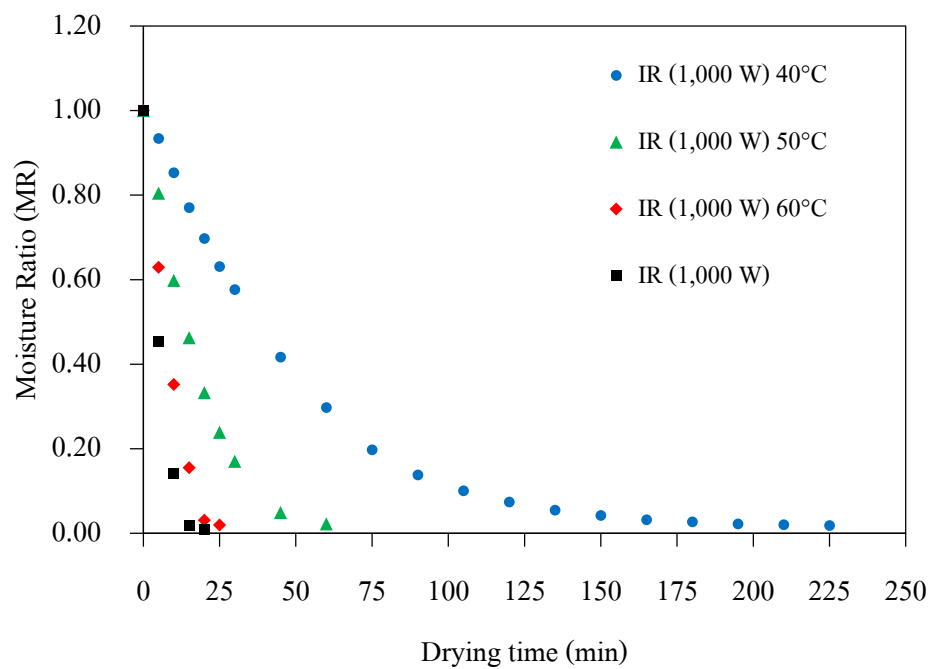
อบแห้งนั้นมียัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดแบบควบคุมอุณหภูมิอากาศอบแห้งทุกเงื่อนไขการทดลอง เนื่องจากการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดแบบควบคุมอุณหภูมิอากาศอบแห้งนั้นทำให้เวลาในการทำงานของแท่งอินฟราเรดลดลงส่งผลทำให้ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งมากกว่า และเมื่อพิจารณาการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดแบบไม่ควบคุมอุณหภูมิอากาศอบแห้งที่กำลังอินฟราเรดต่ำ จะเห็นได้ว่ามียัตราการอบแห้งใกล้เคียงกับการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดแบบควบคุมอุณหภูมิอากาศอบแห้งที่อุณหภูมิสูง ในขณะที่การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดแบบไม่ควบคุมอุณหภูมิอากาศอบแห้งที่กำลังอินฟราเรดสูงจะมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าอย่างชัดเจน จึงสรุปได้ว่าการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดแบบไม่ควบคุมอุณหภูมิที่กำลังอินฟราเรดสูง จะสามารถทำอุณหภูมิอบแห้งได้สูงกว่าการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดแบบควบคุมอุณหภูมิอากาศอบแห้งที่ทุกอุณหภูมิอากาศอบแห้ง ส่งผลทำให้ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งน้อยกว่าการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดแบบควบคุมอุณหภูมิอากาศอบแห้ง



(ก)



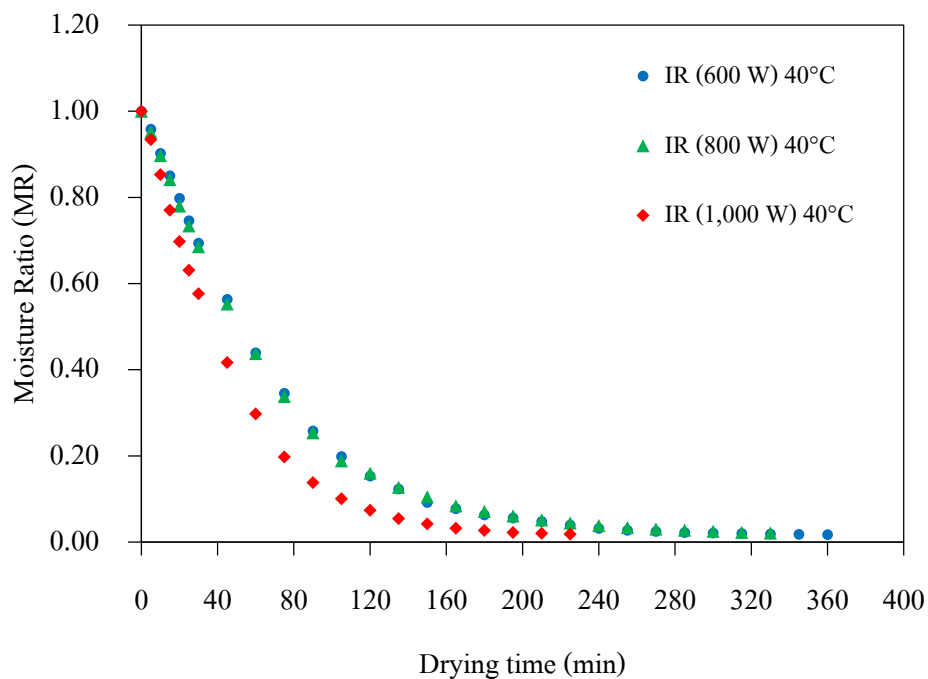
(ข)



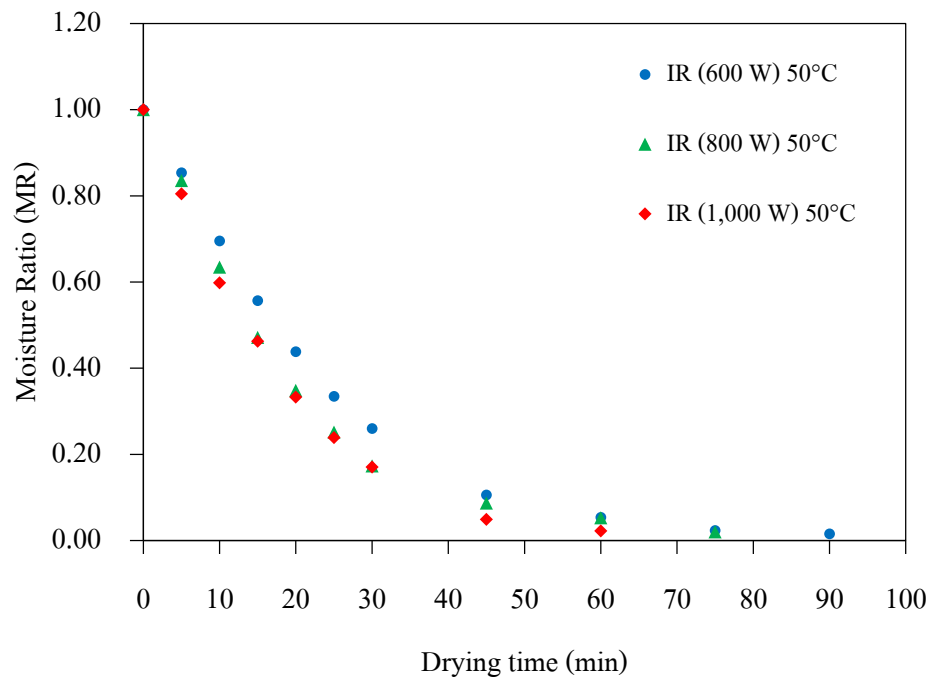
(ค)

ภาพที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นกับเวลาของการอบแห้งขมิ้นชันด้วย
 กำลังอินฟราเรด 600 W (ก) 800 W (ข) และ 1,000 W (ค) ที่อุณหภูมิอบแห้ง
 เท่ากับ 40 50 และ 60 °C ตามลำดับ

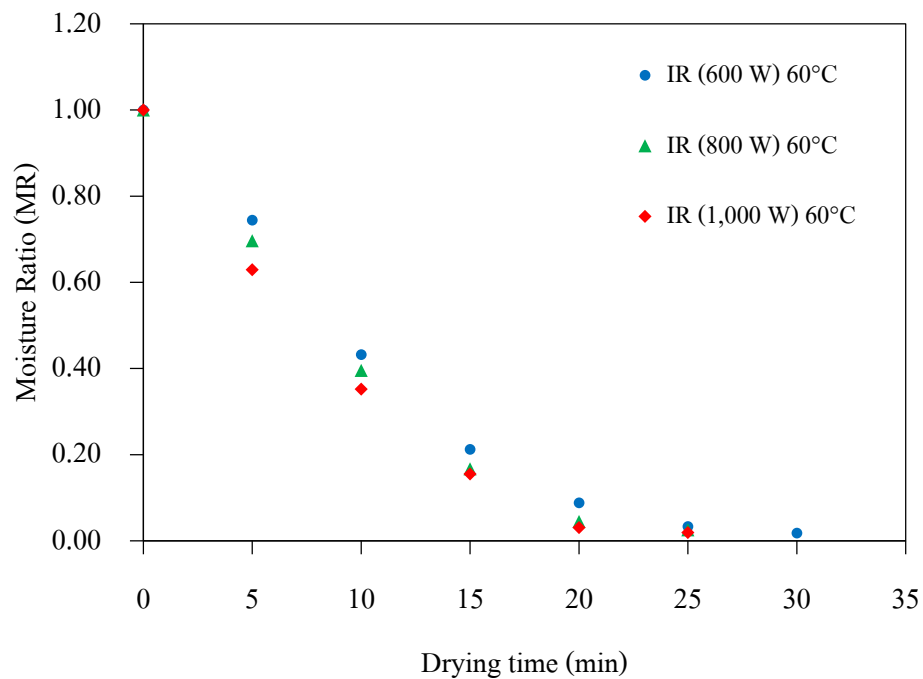
จากผลการทดลองการเปรียบเทียบการอบแห้งขมิ้นชันด้วยกำลังอินฟราเรด 600 800 และ 1,000 W ที่อุณหภูมิอบแห้งคงที่ แสดงดังภาพที่ 4.4 พบว่า ปัจจัยของกำลังอินฟราเรดส่งผลต่ออัตราการอบแห้ง โดยการอบแห้งที่กําลังอินฟราเรดสูงสามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งได้มากกว่าการอบแห้งที่กําลังอินฟราเรดต่ำ เมื่อพิจารณาอัตราการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ สังเกตได้ว่าการเพิ่มขึ้นของกำลังอินฟราเรดจะส่งผลต่ออัตราการอบแห้งอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่การอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำสูงนั้นอิทธิพลของกำลังอินฟราเรดจะส่งผลต่ออัตราการอบแห้งค่อนข้างน้อย ทำให้อัตราการอบแห้งมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกันมาก จึงสรุปได้ว่าการเพิ่มกำลังอินฟราเรดสำหรับการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำสูงนั้นจะส่งผลต่ออัตราการอบแห้งน้อยมากเมื่อเทียบกับการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ



(ก)



(ข)

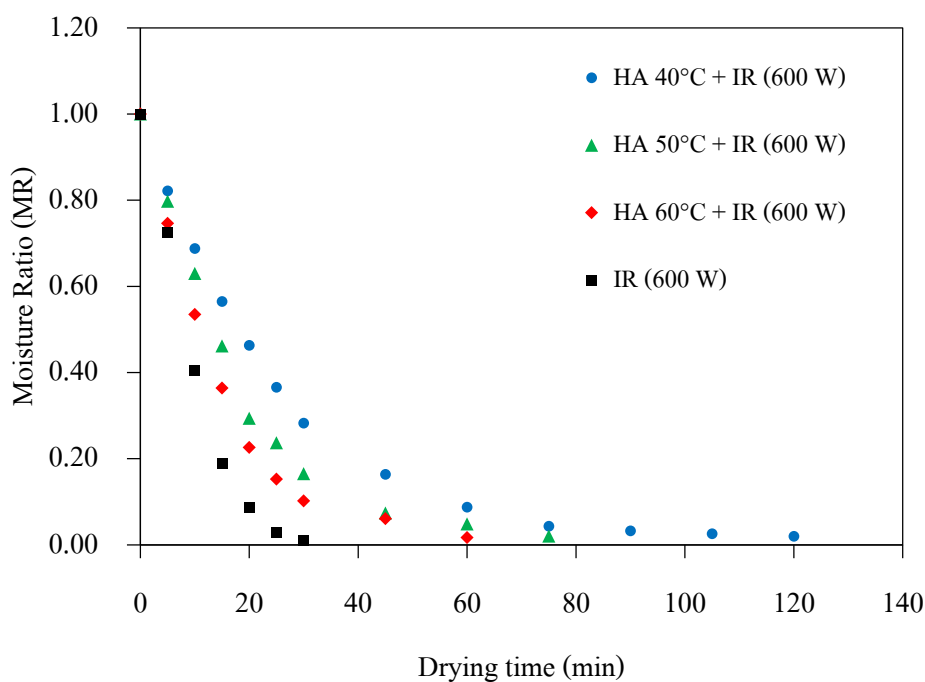


(ค)

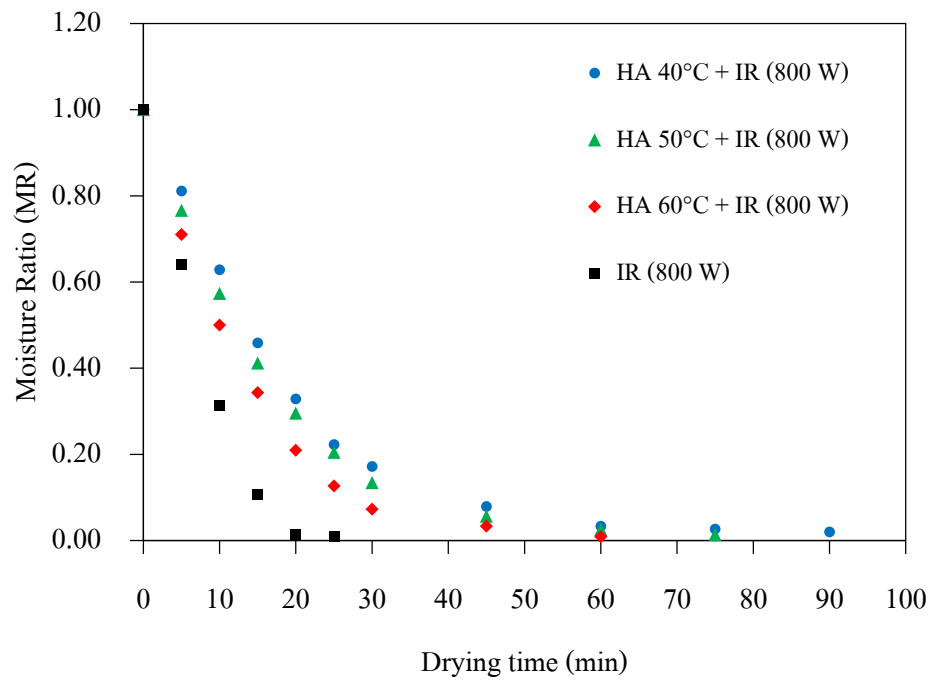
ภาพที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นกับเวลาของการอบแห้งขมิ้นชันด้วยกำลังอินฟราเรด 600 W 800 W และ 1,000 W โดยเปรียบเทียบที่อุณหภูมิอบแห้งเท่ากับ 40 °C (ก) 50 °C (ข) และ 60 °C (ค) ตามลำดับ

การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด

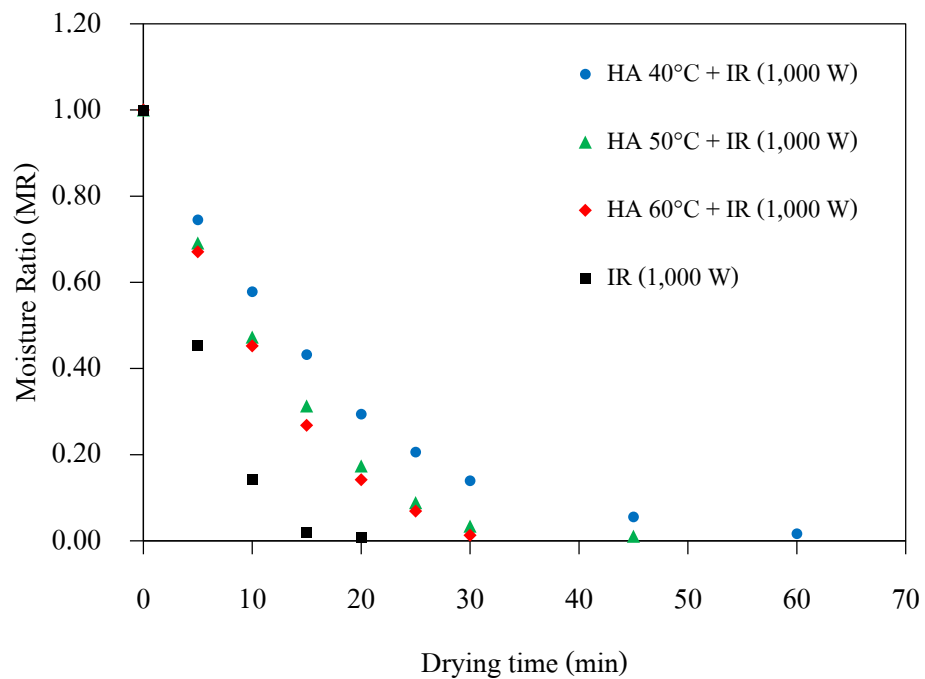
จากผลการทดลองการอบแห้งขมิ้นชันด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดที่กำลังอินฟราเรด 600 800 และ 1,000 W อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 40 50 และ 60 °C แสดงดังภาพที่ 4.5 พบว่า ปัจจัยของอุณหภูมิลมร้อนนั้นส่งผลต่อการลดลงของความชื้นของขมิ้นชัน โดยที่อัตราการอบแห้งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนจึงใช้ระยะเวลาในการอบแห้งน้อยลง เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนจะมีส่วนในการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิขมิ้นชัน ซึ่งการอบแห้งด้วยกำลังอินฟราเรด 600 W ที่อุณหภูมิลมร้อน 40 50 และ 60 °C จะใช้เวลาในการอบแห้งประมาณ 120 75 และ 60 นาที ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 4.5 (ก) ส่วนที่กำลังอินฟราเรด 800 W ที่อุณหภูมิลมร้อน 40 50 และ 60 °C จะใช้เวลาในการอบแห้งประมาณ 90 75 และ 60 นาที ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 4.5 (ข) และกำลังอินฟราเรด 1,000 W ที่อุณหภูมิลมร้อน 40 50 และ 60 °C จะใช้เวลาในการอบแห้งประมาณ 60 45 และ 30 นาที ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 4.5 (ค)



(ก)



(ข)

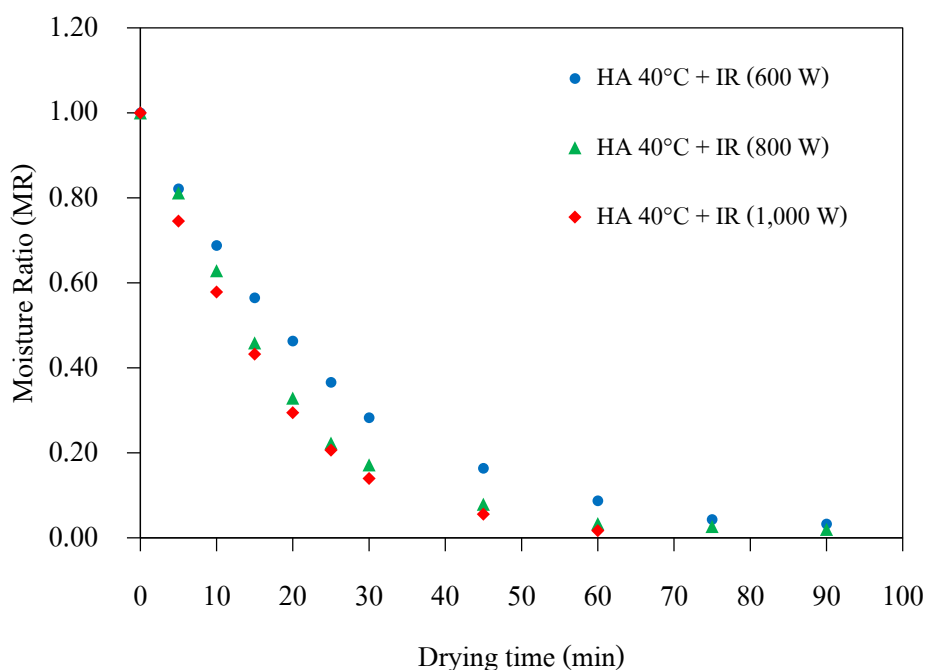


(ค)

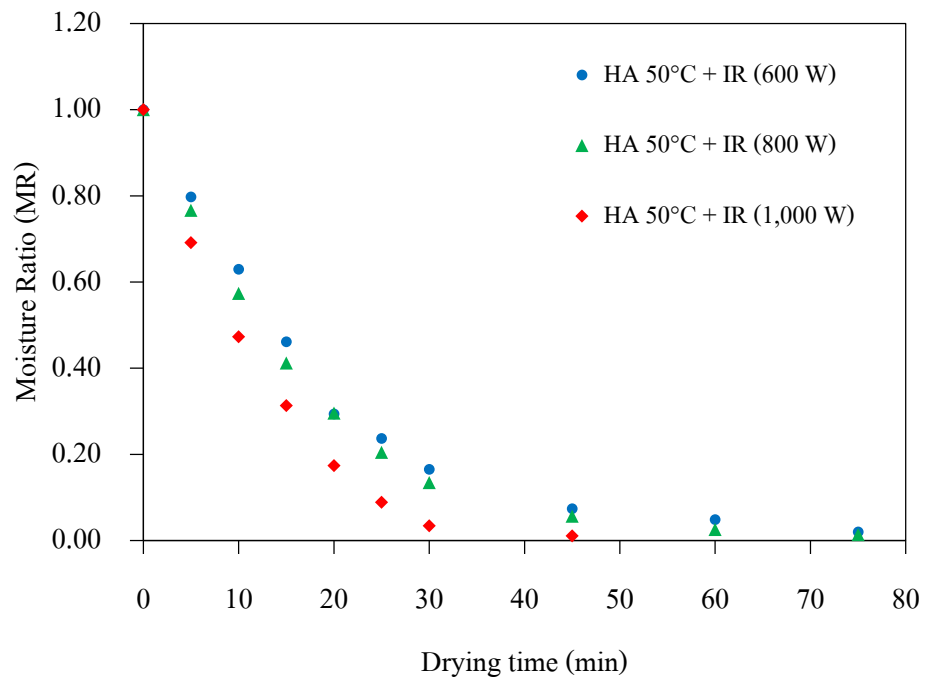
ภาพที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นกับเวลาของการอบแห้งขมิ้นชันด้วยลมร้อน ร่วมกับรังสีอินฟราเรด และการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 40 50 และ 60 °C กำลังอินฟราเรด 600 W (ก) 800 W (ข) และ 1,000 W (ค) ตามลำดับ

ผลการเปรียบเทียบสภาวะการอบแห้งขมิ้นชันด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด และ รังสีอินฟราเรดโดยไม่ควบคุมอุณหภูมิอากาศอบแห้ง แสดงดังภาพที่ 4.5 สรุปได้ว่า การอบแห้งด้วย รังสีอินฟราเรดโดยไม่ควบคุมอุณหภูมิอากาศอบแห้งมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งด้วยลม ร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดทุกเงื่อนไขการทดลองอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากการอบแห้งด้วยรังสี อินฟราเรดโดยไม่ควบคุมอุณหภูมิอากาศอบแห้งนั้นทำให้แท่งอินฟราเรดทำงานอย่างเต็มที่ส่งผล ทำให้อุณหภูมิอากาศอบแห้งมีค่าค่อนข้างสูง และปัจจัยของอุณหภูมิลมร้อนที่ทำให้อุณหภูมิจของ ขมิ้นชันลดลงทำให้การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดใช้ระยะเวลาในการอบแห้ง มากกว่า

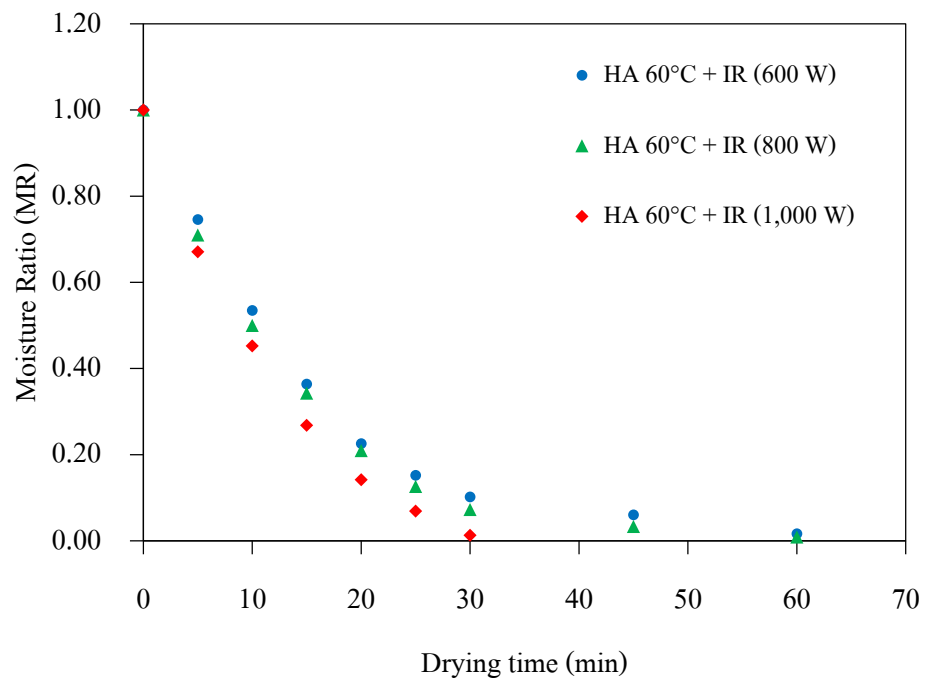
จากผลการทดลองการเปรียบเทียบการอบแห้งขมิ้นชันด้วยกำลังอินฟราเรด 600 800 และ 1,000 W ที่อุณหภูมิลมร้อนคงที่ แสดงดังภาพที่ 4.6 พบว่า ปัจจัยของกำลังอินฟราเรดส่งผลต่อ อัตราการอบแห้งเช่นกัน ซึ่งการเพิ่มกำลังอินฟราเรดทำให้อัตราการอบแห้งมีค่าสูงขึ้นที่ทุกอุณหภู มิ ลมร้อน เนื่องจากการเพิ่มกำลังอินฟราเรดทำให้อุณหภูมิของขมิ้นชันมีการเพิ่มอย่างต่อเนื่อง โดย การอบแห้งที่ กำลังอินฟราเรดสูงสามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งได้มากกว่าการอบแห้งที่ กำลัง อินฟราเรดต่ำ



(ก)



(ข)

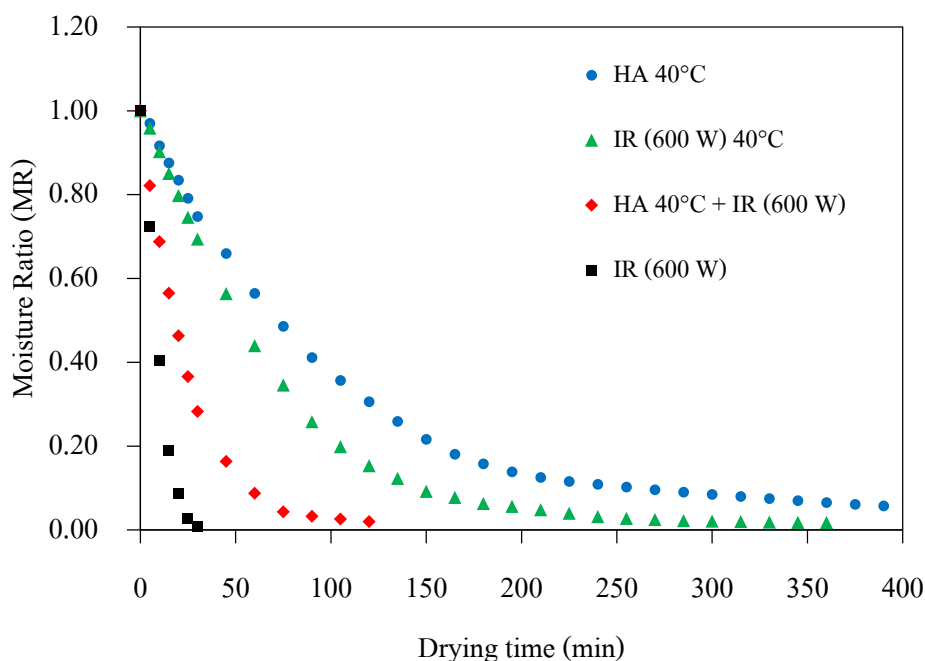


(ค)

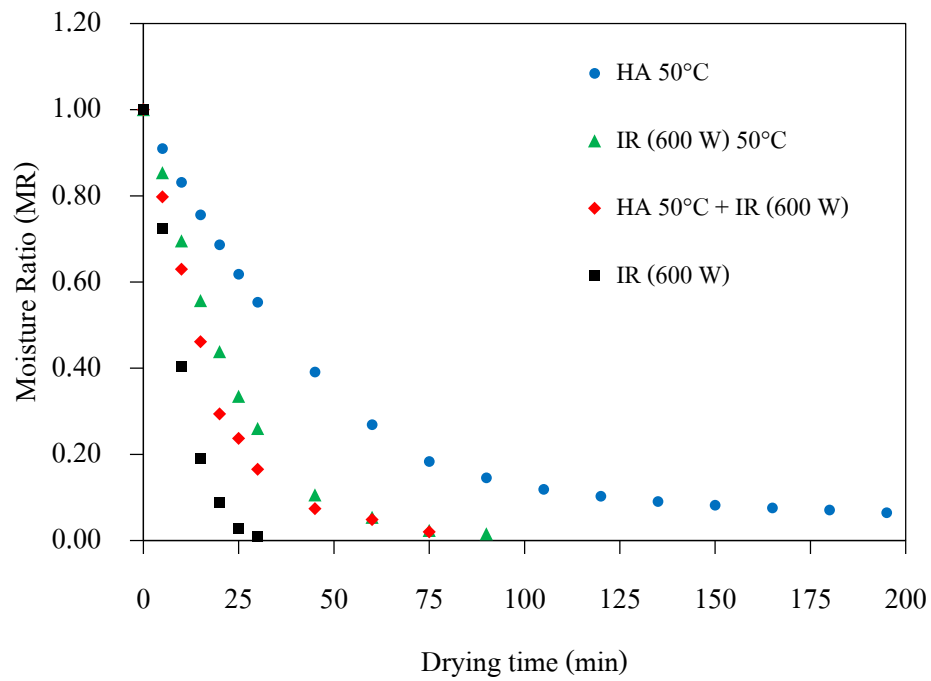
ภาพที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นกับเวลาของการอบแห้งขมิ้นชันด้วยลมร้อน ร่วมกับรังสีอินฟราเรด ที่กำลังอินฟราเรด 600 800 และ 1,000 W ที่อุณหภูมิลมร้อน 40 °C (ก) 50 °C (ข) และ 60 °C (ค) ตามลำดับ

ผลการเปรียบเทียบปัจจัยของแหล่งพลังงานที่ใช้ในการการอบแห้งขมิ้นชันที่สภาวะการอบแห้งต่าง ๆ

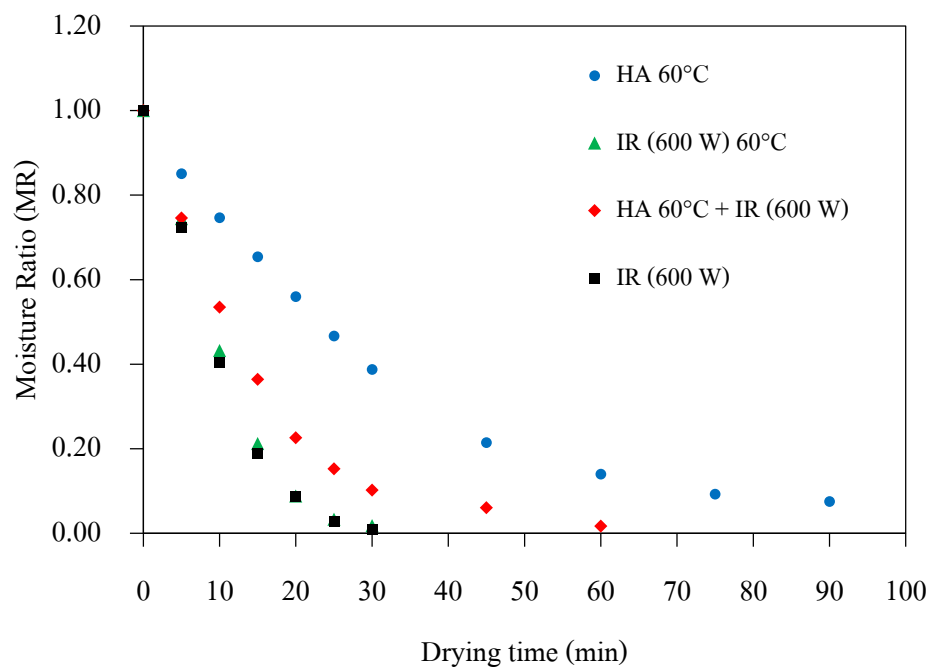
สำหรับการเปรียบเทียบผลการทดลองจากแหล่งพลังงานความร้อนต่าง ๆ แสดงคังภาพที่ 4.7-4.9 ตามลำดับ พบว่า การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดแบบไม่ควบคุมอุณหภูมิอบแห้งจะมีอัตราการอบแห้งสูงที่สุดในทุกเงื่อนไขการทดลอง รองลงมาคือ การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดแบบควบคุมอุณหภูมิอบแห้ง และการอบแห้งด้วยลมร้อน ตามลำดับ แต่ในกรณีการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดแบบควบคุมอุณหภูมิอบแห้งที่อุณหภูมิอบแห้งเท่ากับ 60°C จะมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดในทุก ๆ กำลังอินฟราเรด ซึ่งน่าจะมีสาเหตุมาจากการการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดแบบควบคุมอุณหภูมิอากาศภายในห้องอบแห้งที่อุณหภูมิสูงนั้นทำให้เวลาในการทำงานของแท่งอินฟราเรดยาวนานส่งผลทำให้อัตราการอบแห้งมีค่าใกล้เคียงกับสภาวะการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดแบบไม่ควบคุมอุณหภูมิอากาศภายในห้องอบแห้ง และสรุปได้ว่าในแต่ละสภาวะการอบแห้งต่าง ๆ นั้น ปัจจัยของอุณหภูมิและกำลังอินฟราเรดที่มีค่าสูงจะมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าอุณหภูมิและกำลังอินฟราเรดที่มีค่าต่ำในทุกแหล่งพลังงานความร้อน



(ก)

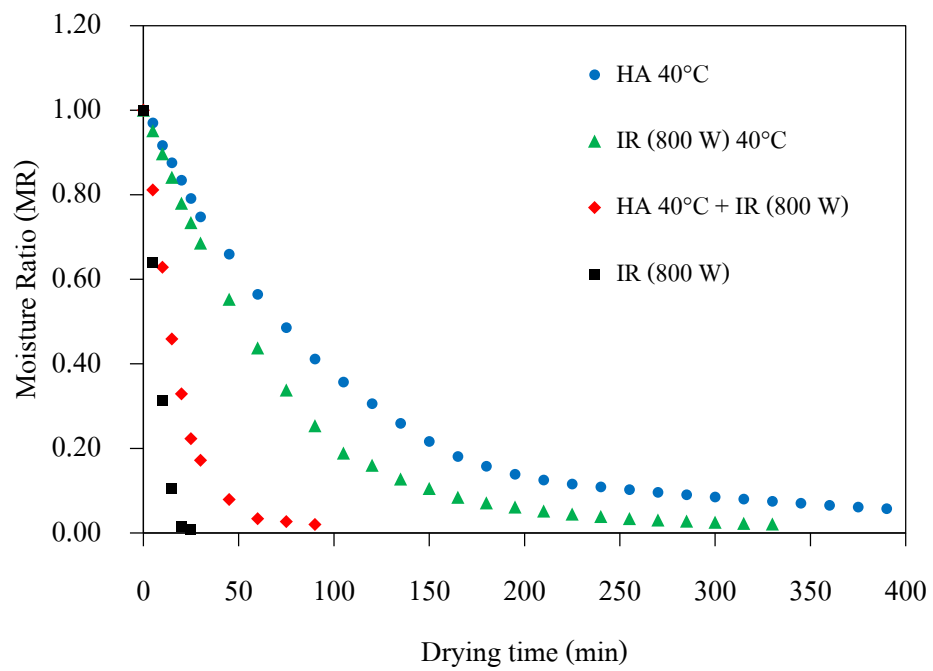


(ข)

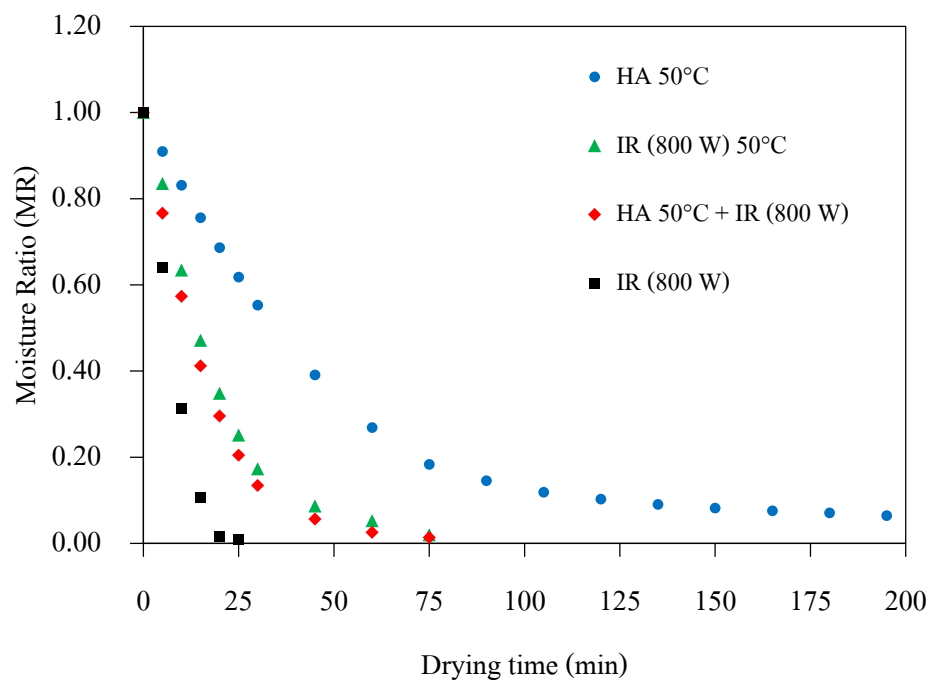


(ค)

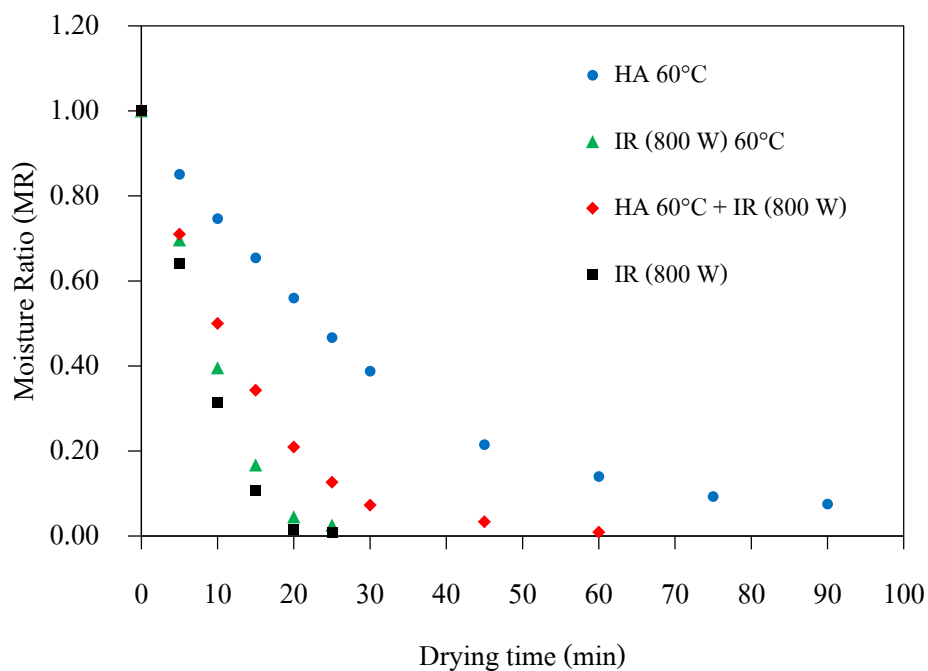
ภาพที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นกับเวลาของการอบแห้งขมิ้นชันระหว่างการอบแห้งขมิ้นชันด้วยแหล่งพลังงานความร้อนต่าง ๆ ที่กำลังอินฟราเรด 600 W ที่อุณหภูมิเท่ากับ 40 °C (ก) 50 °C (ข) และ 60 °C (ค) ตามลำดับ



(n)

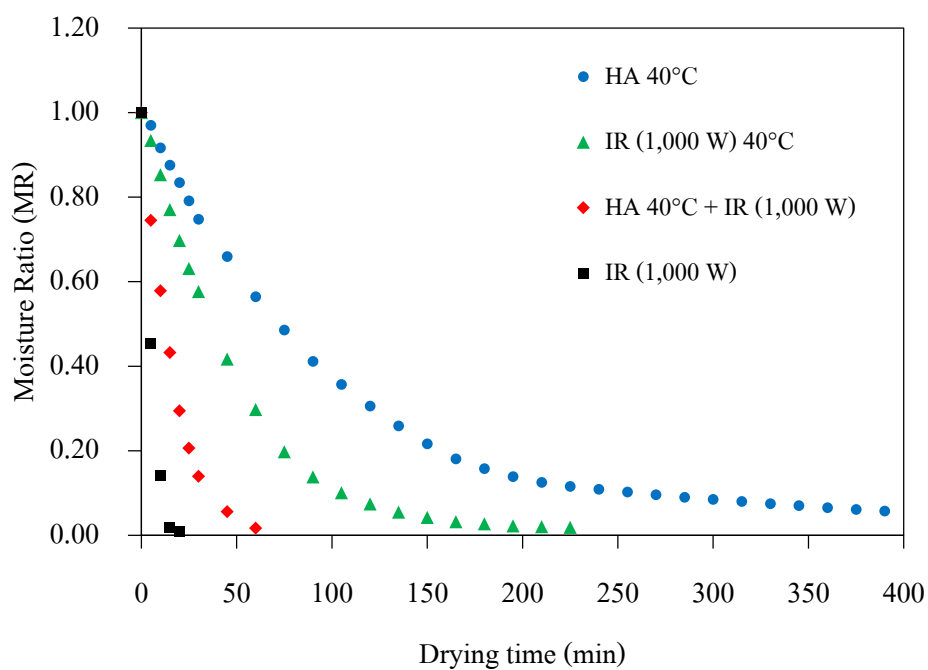


(ñ)

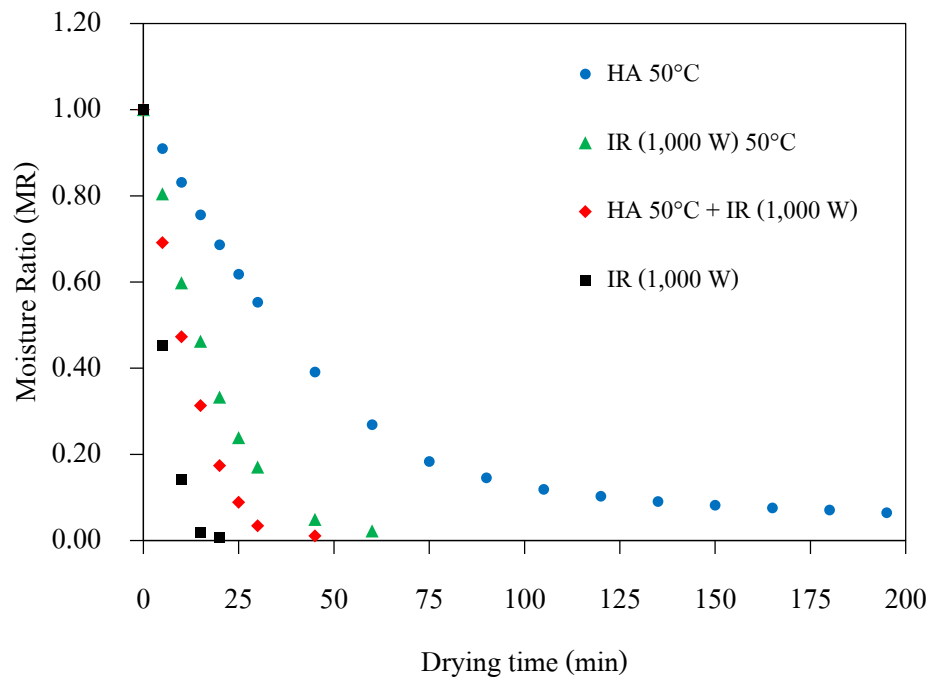


(ค)

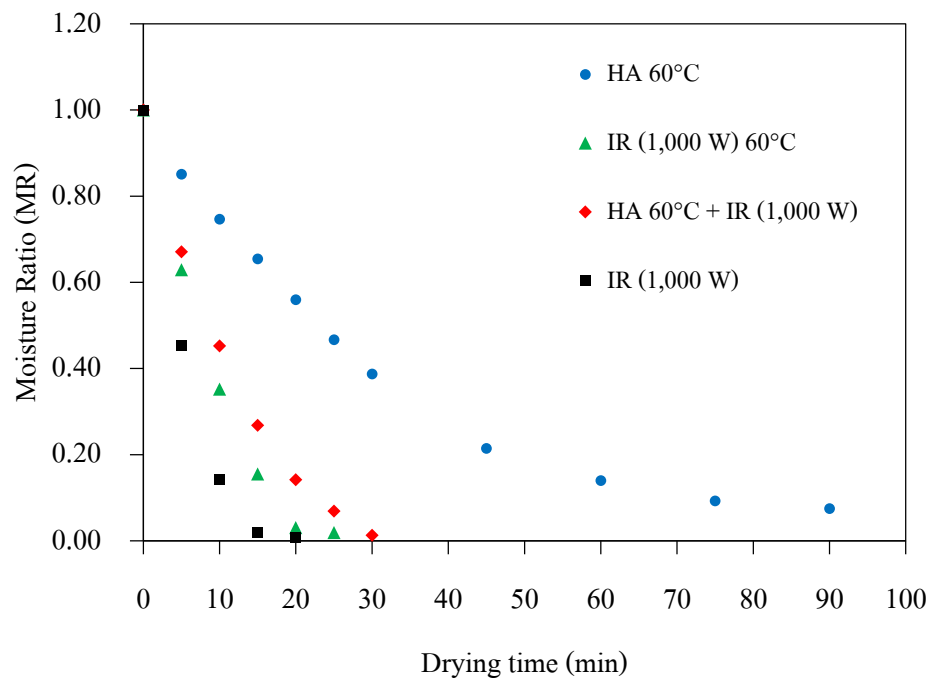
ภาพที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นกับเวลาของการอบแห้งขมิ้นชันระหว่างการอบแห้งขมิ้นชันด้วยแหล่งพลังงานความร้อนต่าง ๆ ที่กำลังอินฟราเรด 800 W ที่อุณหภูมิเท่ากับ 40 °C (ก) 50 °C (ข) และ 60 °C (ค) ตามลำดับ



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นกับเวลาของการอบแห้งขมิ้นชันระหว่าง การอบแห้งขมิ้นชันด้วยแหล่งพลังงานความร้อนต่าง ๆ ที่กำลังอินฟราเรด 1,000 W ที่อุณหภูมิเท่ากับ 40 °C (ก) 50 °C (ข) และ 60 °C (ค) ตามลำดับ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งชั้นบางขมิ้นชัน

จากข้อมูลผลการทดลองการอบแห้งขมิ้นชันที่เงื่อนไขการทดลองต่าง ๆ ได้ทำการเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามตารางที่ 2.1 เมื่อนำข้อมูลการอบแห้งมาคำนวณหาอัตราส่วนความชื้น ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาอบแห้ง นำมาวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบบจำลองการอบแห้ง โดยใช้เทคนิคของการวิเคราะห์ถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Regression) เพื่อเปรียบเทียบหาแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดสำหรับใช้อธิบายพฤติกรรมของการอบแห้งชั้นบางขมิ้นชัน ซึ่งแบบจำลองที่อธิบายผลการทดลองได้ดีที่สุดจะต้องพิจารณาจากค่า R^2 ที่สูงสุด ค่า RMSE และ χ^2 ที่ต่ำสุด เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองอื่น ๆ โดยที่ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 4.1-4.24 โดยจากตารางจะแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดสำหรับใช้อธิบายพฤติกรรมของการอบแห้งขมิ้นชันที่เงื่อนไขการทดลองต่าง ๆ โดยที่สภาวะการอบแห้งต่าง ๆ และให้ผลการวิเคราะห์แบบจำลองที่อธิบายผลการทดลองได้ดีที่สุด ดังต่อไปนี้

การอบแห้งด้วยลมร้อน

จากผลการทดลองการอบแห้งขมิ้นชันด้วยอุณหภูมิลมร้อน 40 50 และ 60 °C พบว่าแบบจำลอง Two Term จะให้ผลการทำนายดีที่สุดสำหรับการอบแห้งที่อุณหภูมิลมร้อน 40 และ 50 °C โดยที่อุณหภูมิลมร้อน 40 °C ให้ค่า R^2 RMSE และ χ^2 เท่ากับ 0.999183 0.007425 และ 0.000060 และที่อุณหภูมิลมร้อน 50 °C มีค่าเท่ากับ 0.997800 0.012616 และ 0.000178 ตามลำดับ ในขณะที่การอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 °C แบบจำลอง Midilli et al. จะให้ผลการทำนายดีที่สุด โดยให้ค่า R^2 RMSE และ χ^2 เท่ากับ 0.998738 0.011378 และ 0.000169 ตามลำดับ

การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด

จากผลการทดลองการอบแห้งขมิ้นชันด้วยกำลังอินฟราเรด 600 800 และ 1,000 W พบว่าแบบจำลอง Page จะให้ผลการทำนายดีที่สุดสำหรับการอบแห้ง โดยที่กำลังอินฟราเรด 600 W ให้ค่า R^2 RMSE และ χ^2 เท่ากับ 0.999935 0.002864 และ 0.000011 ตามลำดับ ในขณะที่แบบจำลอง Midilli et al. จะให้ผลการทำนายดีที่สุดสำหรับการอบแห้งที่กำลังอินฟราเรด 800 และ 1,000 W โดยที่กำลังอินฟราเรด 800 W ให้ค่า R^2 RMSE และ χ^2 เท่ากับ 0.999988 0.001268 และ 0.000005 ตามลำดับ และที่กำลังอินฟราเรด 1,000 W มีค่าเท่ากับ 0.999910 0.003534 และ 0.000062 ตามลำดับ

ในส่วนของผลการทดลองการอบแห้งขมิ้นชันด้วยกำลังอินฟราเรด 600 800 และ 1,000 W โดยทำการควบคุมอุณหภูมิอากาศอบแห้งเท่ากับ 40 50 และ 60 °C พบว่า แบบจำลอง Midilli et al. จะให้ผลการทำนายดีที่สุดสำหรับกำลังอินฟราเรด 600 W ที่อุณหภูมิอบแห้งเท่ากับ 40 50 และ 60 °C โดยที่อุณหภูมิอบแห้ง 40 °C ให้ค่า R^2 RMSE และ χ^2 เท่ากับ 0.999835 0.004192 และ 0.000020 ตามลำดับ ในขณะที่อุณหภูมิอบแห้ง 50 °C มีค่าเท่ากับ 0.999924 0.002879 และ 0.000013 ตามลำดับ และที่อุณหภูมิอบแห้ง 60 °C มีค่าเท่ากับ 0.999975 0.001785 และ 0.000007 ตามลำดับ ในส่วนของการทดลองการอบแห้งที่ กำลังอินฟราเรด 800 W พบว่า แบบจำลอง Midilli et al. จะให้ผลการทำนายดีที่สุดสำหรับอุณหภูมิอบแห้งเท่ากับ 40 50 และ 60 °C โดยที่อุณหภูมิอบแห้ง 40 °C ให้ค่า R^2 RMSE และ χ^2 เท่ากับ 0.999701 0.005706 และ 0.000038 ตามลำดับ ในขณะที่อุณหภูมิอบแห้ง 50 °C มีค่าเท่ากับ 0.999245 0.008901 และ 0.000132 ตามลำดับ และที่อุณหภูมิอบแห้ง 60 °C มีค่าเท่ากับ 0.999834 0.004578 และ 0.000063 ตามลำดับ และในส่วนของ การทดลองการอบแห้งที่ กำลังอินฟราเรด 1,000 W พบว่า แบบจำลอง Midilli et al. จะให้ผลการทำนายดีที่สุดสำหรับอุณหภูมิอบแห้งเท่ากับ 40 และ 50 °C โดยที่อุณหภูมิอบแห้ง 40 °C ให้ค่า R^2 RMSE และ χ^2 เท่ากับ 0.999873 0.003876 และ 0.000019 ตามลำดับ และที่อุณหภูมิอบแห้ง 50 °C มีค่าเท่ากับ 0.999822 0.004266 และ 0.000033 ตามลำดับ ในขณะที่อุณหภูมิอบแห้ง 60 °C แบบจำลอง Wang and Singh จะให้ผลการทำนายดีที่สุด โดยให้ค่า R^2 RMSE และ χ^2 เท่ากับ 0.999811 0.004849 และ 0.000035 ตามลำดับ

การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด

จากผลการทดลองการอบแห้งขมิ้นชันด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดที่กำลังอินฟราเรด 600 800 และ 1,000 W อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 40 50 และ 60 °C พบว่า แบบจำลอง Midilli et al. จะให้ผลการทำนายดีที่สุดสำหรับกำลังอินฟราเรด 600 W ที่อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 40 50 และ 60 °C โดยที่อุณหภูมิลมร้อน 40 °C ให้ค่า R^2 RMSE และ χ^2 เท่ากับ 0.999556 0.006754 และ 0.000066 ตามลำดับ ในขณะที่อุณหภูมิลมร้อน 50 °C มีค่าเท่ากับ 0.998132 0.013903 และ 0.000322 ตามลำดับ และที่อุณหภูมิลมร้อน 60 °C มีค่าเท่ากับ 0.999012 0.010075 และ 0.000183 ตามลำดับ ในส่วนของการทดลองการอบแห้งที่ กำลังอินฟราเรด 800 W พบว่า แบบจำลอง Midilli et al. จะให้ผลการทำนายดีที่สุดสำหรับอุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 40 และ 50 °C โดยที่อุณหภูมิลมร้อน 40 °C ให้ค่า R^2 RMSE และ χ^2 เท่ากับ 0.999468 0.007498 และ 0.000088 ตามลำดับ และที่อุณหภูมิลมร้อน 60 °C มีค่าเท่ากับ 0.999789 0.004649 และ 0.000036 ตามลำดับ ในขณะที่อุณหภูมิลมร้อน

ลมร้อน 60 °C แบบจำลอง Approximation of diffusion จะให้ผลการทำนายดีที่สุด โดยให้ค่า R² RMSE และ χ^2 เท่ากับ 0.999004 0.009507 และ 0.000136 ตามลำดับ และในส่วนของ การทดลอง การอบแห้งที่กำลังอินฟราเรด 1,000 W พบว่า แบบจำลอง Approximation of diffusion จะให้ผลการทำนายดีที่สุดที่อุณหภูมิลมร้อน 40 °C โดยที่อุณหภูมิลมร้อน 40 °C ให้ค่า R² RMSE และ χ^2 เท่ากับ 0.998965 0.010161 และ 0.000155 ตามลำดับ ในขณะที่อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 50 และ 60 °C แบบจำลอง Midilli et al. จะให้ผลการทำนายดีที่สุด โดยที่อุณหภูมิลมร้อน 50 °C ให้ค่า R² RMSE และ χ^2 เท่ากับ 0.998637 0.012139 และ 0.000295 ตามลำดับ และที่อุณหภูมิลมร้อน 60 °C มีค่าเท่ากับ 0.999548 0.007066 และ 0.000117 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 ผลทางสถิติที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางขมิ้นชันด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 40 °C

แบบจำลอง	ค่าคงที่ของแบบจำลอง	R ²	RMSE	χ ²
Newton	k=0.009431	0.998338	0.010816	0.000119
Page	k=0.012754, n=0.936185	0.997017	0.014110	0.000207
Henderson and Pabis	k=0.009432, a=1.000035	0.998339	0.010812	0.000121
Logarithmic	k=0.010775, a=0.984548, c=0.035710	0.999159	0.007518	0.000060
Modified Page	k=0.097115, n=0.097115	0.998338	0.010816	0.000122
Two Term	k ₀ =0.011031, k ₁ =0.000605, a=0.972941, b=0.049456	0.999183	0.007425	0.000060
Two Term Exponential	k=1.713937, a=0.005463	0.998153	0.011352	0.000134
Wang and Singh	a=-0.004569, b=0.000005	0.890758	0.095658	0.009509
Approximation of diffusion	k=0.010489, a=0.964236, b=0.008704	0.998601	0.009544	0.000097
Midilli et al.	k=0.010661, n=0.988554, a=1.016879, b=0.000060	0.999141	0.007626	0.000063

ตารางที่ 4.2 ผลทางสถิติที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางขมื่นชั้นด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 °C

แบบจำลอง	ค่าคงที่ของแบบจำลอง	R ²	RMSE	χ^2
Newton	k=0.019732	0.992478	0.024079	0.000596
Page	k=0.023605, n=0.952987	0.996209	0.020064	0.000456
Henderson and Pabis	k=0.019833, a=1.003521	0.992536	0.024054	0.000612
Logarithmic	k=0.022242, a=0.989693, c=0.032386	0.997682	0.013000	0.000184
Modified Page	k=0.140472, n=0.140472	0.992478	0.024079	0.000613
Two Term	k ₀ =0.023490, k ₁ =0.002092, a=0.964571, b=0.063094	0.997800	0.012616	0.000178
Two Term Exponential	k=4.430779, a=0.004423	0.992397	0.024150	0.000617
Wang and Singh	a=-0.007290, b=0.000012	0.808440	0.147411	0.022972
Approximation of diffusion	k=0.495706, a=-0.006104, b=0.040156	0.992551	0.024037	0.000629
Midilli et al.	k=0.021594, n=0.989677, a=1.015729, b=0.000083	0.996404	0.016319	0.000299

ตารางที่ 4.3 ผลทางสถิติที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางขมื่นชั้นด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 °C

แบบจำลอง	ค่าคงที่ของแบบจำลอง	R ²	RMSE	χ^2
Newton	k=0.030554	0.996174	0.020096	0.000429
Page	k=0.029708, n=1.008309	0.996209	0.020064	0.000456
Henderson and Pabis	k=0.030766, a=1.005102	0.996236	0.020023	0.000454
Logarithmic	k=0.032987, a=0.991175, c=0.023920	0.997771	0.015094	0.000277
Modified Page	k=0.174796, n=0.174796	0.996174	0.020096	0.000458
Two Term	k ₀ =0.032021, k ₁ =-0.008956, a=1.006312, b=0.006427	0.997951	0.014469	0.000274
Two Term Exponential	k=6.833038, a=0.004444	0.996098	0.020250	0.000465
Wang and Singh	a=-0.017700, b=0.000073	0.926854	0.099508	0.011222
Approximation of diffusion	k=0.168771, a=-0.027541, b=0.186977	0.996369	0.019748	0.000474
Midilli et al.	k=0.022990, n=1.092718, a=0.993057, b=0.000221	0.998738	0.011378	0.000169

ตารางที่ 4.4 ผลทางสถิติที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางขมื่นชั้นด้วยกำลังของรังสีอินฟราเรด 600 W

แบบจำลอง	ค่าคงที่ของแบบจำลอง	R ²	RMSE	χ^2
Newton	k=0.098650	0.967571	0.057328	0.003834
Page	k=0.030403, n=1.473878	0.999935	0.002864	0.000011
Henderson and Pabis	k=0.102644, a=1.048377	0.974654	0.053484	0.004005
Logarithmic	k=0.075565, a=1.175129, c=-0.146829	0.990241	0.034853	0.002126
Modified Page	k=0.314085, n=0.314085	0.967889	0.057046	0.004556
Two Term	k ₀ =0.102644, k ₁ =0.102644, a=0.524189, b=0.524189	0.974654	0.006675	0.053484
Two Term Exponential	k=0.155064, a=2.049095	0.999386	0.008710	0.000106
Wang and Singh	a=-0.071457, b=0.001284	0.996094	0.021726	0.000661
Approximation of diffusion	k=0.231886, a=-3.62937, b=0.783495	0.999701	0.006098	0.000065
Midilli et al.	k=0.030335, n=1.474406, a=1.000496, b=-0.000016	0.999919	0.003190	0.000024

ตารางที่ 4.5 ผลทางสถิติที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางขมื่นชั้นด้วยกำลังของรังสีอินฟราเรด 800 W

แบบจำลอง	ค่าคงที่ของแบบจำลอง	R ²	RMSE	χ^2
Newton	k=0.121479	0.970659	0.056738	0.003863
Page	k=0.039447, n=1.486652	0.999131	0.010688	0.000171
Henderson and Pabis	k=0.124881, a=1.035199	0.974845	0.054650	0.004480
Logarithmic	k=0.090797, a=1.170652, c=-0.152280	0.991629	0.002203	0.033187
Modified Page	k=0.348538, n=0.348538	0.970659	0.056738	0.004829
Two Term	k ₀ =0.124881, k ₁ =0.124881, a=0.517599, b=0.517599	0.974845	0.054650	0.008960
Two Term Exponential	k=0.189593, a=2.059187	0.997566	0.017698	0.000470
Wang and Singh	a=-0.086961, b=0.001885	0.998714	0.012903	0.000250
Approximation of diffusion	k=0.248305, a=-223.336, b=0.995550	0.998225	0.015165	0.000460
Midilli et al.	k=0.040061, n=1.476451, a=0.999132, b=-0.000321	0.999988	0.001268	0.000005

ตารางที่ 4.6 ผลทางสถิติที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางขมื่นชั้นด้วยกำลังของรังสีอินฟราเรด 1,000 W

แบบจำลอง	ค่าคงที่ของแบบจำลอง	R ²	RMSE	χ^2
Newton	k=0.180043	0.991680	0.032700	0.001337
Page	k=0.089990, n=1.346826	0.999712	0.006337	0.000067
Henderson and Pabis	k=0.181514, a=1.011216	0.992083	0.032297	0.001738
Logarithmic	k=0.154377, a=1.070148, c=-0.064720	0.997010	0.020414	0.001042
Modified Page	k=0.424315, n=0.424315	0.991680	0.032700	0.001782
Two Term	k ₀ =0.181514, k ₁ =0.181514, a=0.505608, b=0.505608	0.992083	0.032297	0.005215
Two Term Exponential	k=52.04603, a=0.003449	0.991547	0.032947	0.001809
Wang and Singh	a=-0.122334, b=0.003672	0.997606	0.018508	0.000571
Approximation of diffusion	k=0.101018, a=-19.8440, b=1.026950	0.997839	0.017301	0.000748
Midilli et al.	k=0.092133, n=1.330964, a=0.999795, b=-0.000215	0.999910	0.003534	0.000062

ตารางที่ 4.7 ผลทางสถิติที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางขมิ้นชันด้วยกำลังของรังสีอินฟราเรด 600 W ที่อุณหภูมิ 40 °C

แบบจำลอง	ค่าคงที่ของแบบจำลอง	R ²	RMSE	χ ²
Newton	k=0.014014	0.994758	0.022438	0.000521
Page	k=0.007590, n=1.142546	0.999200	0.009259	0.000092
Henderson and Pabis	k=0.014801, a=1.045334	0.997582	0.015926	0.000272
Logarithmic	k=0.014852, a=1.044692, c=0.001145	0.997553	0.016011	0.000286
Modified Page	k=0.118380, n=0.118380	0.994758	0.022438	0.000541
Two Term	k ₀ =0.014801, k ₁ =0.014801, a=0.522599, b=0.522735	0.997582	0.015926	0.000294
Two Term Exponential	k=6.595353, a=0.002120	0.994494	0.022960	0.000566
Wang and Singh	a=-0.008484, b=0.000017	0.967789	0.063916	0.004388
Approximation of diffusion	k=0.066921, a=-0.169292, b=0.244177	0.999520	0.007175	0.000057
Midilli et al.	k=0.006676, n=1.178896, a=1.000507, b=0.000062	0.999835	0.004192	0.000020

ตารางที่ 4.8 ผลทางสถิติที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางขมิ้นชันด้วยกำลังของรังสีอินฟราเรด 600 W ที่อุณหภูมิ 50 °C

แบบจำลอง	ค่าคงที่ของแบบจำลอง	R ²	RMSE	χ ²
Newton	k=0.042379	0.992608	0.026744	0.000787
Page	k=0.023384, n=1.191492	0.999804	0.004640	0.000026
Henderson and Pabis	k=0.044296, a=1.038189	0.995230	0.022360	0.000611
Logarithmic	k=0.041280, a=1.061328, c=-0.030937	0.996660	0.019044	0.000499
Modified Page	k=0.205862, n=0.205862	0.992608	0.026744	0.000874
Two Term	k ₀ =0.044297, k ₁ =0.044285, a=0.519045, b=0.519045	0.995229	0.022360	0.000786
Two Term Exponential	k=15.21048, a=0.002774	0.992254	0.027335	0.000913
Wang and Singh	a=-0.030529, b=0.000225	0.985960	0.040474	0.002002
Approximation of diffusion	k=0.121294, a=-0.479161, b=0.466314	0.999868	0.003797	0.000020
Midilli et al.	k=0.022204, n=1.211319, a=0.998927, b=0.000113	0.999924	0.002879	0.000013

ตารางที่ 4.9 ผลทางสถิติที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางขมิ้นชันด้วยกำลังของรังสีอินฟราเรด 600 W ที่อุณหภูมิ 60 °C

แบบจำลอง	ค่าคงที่ของแบบจำลอง	R ²	RMSE	χ ²
Newton	k=0.093962	0.961694	0.061761	0.004450
Page	k=0.025791, n=1.512960	0.999944	0.002649	0.000010
Henderson and Pabis	k=0.098215, a=1.053433	0.970425	0.057628	0.004649
Logarithmic	k=0.069952, a=1.201386, c=-0.169920	0.988279	0.038200	0.002554
Modified Page	k=0.306532, n=0.306532	0.961694	0.061761	0.005340
Two Term	k ₀ =0.098215, k ₁ =0.098215, a=0.526717, b=0.526717	0.970425	0.057628	0.007749
Two Term Exponential	k=0.149424, a=2.068810	0.999078	0.010677	0.000160
Wang and Singh	a=-0.068806, b=0.001196	0.994845	0.024787	0.000860
Approximation of diffusion	k=0.197483, a=-198.922, b=0.994871	0.999569	0.007330	0.000094
Midilli et al.	k=0.025293, n=1.523510, a 0.999503, b=0.000153	0.999975	0.001785	0.000007

ตารางที่ 4.10 ผลทางสถิติที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางขมื่นชั้นด้วยกำลังของรังสีอินฟราเรด 800 W ที่อุณหภูมิ 40 °C

แบบจำลอง	ค่าคงที่ของแบบจำลอง	R ²	RMSE	χ ²
Newton	k=0.014115	0.996504	0.000370	0.018867
Page	k=0.009323, n=1.096641	0.998743	0.011760	0.000149
Henderson and Pabis	k=0.014725, a=1.034204	0.998117	0.014319	0.000221
Logarithmic	k=0.015013, a=1.030665, c=0.006283	0.998118	0.014266	0.000229
Modified Page	k=0.118808, n=0.118808	0.996504	0.018867	0.000384
Two Term	k ₀ =0.014686, k ₁ =0.014720, a=0.517017, b=0.517017	0.998115	0.014326	0.000241
Two Term Exponential	k=5.366779, a=0.002625	0.996255	0.019486	0.000410
Wang and Singh	a=-0.008922, b=0.000019	0.973693	0.058222	0.003661
Approximation of diffusion	k=0.085977, a=-0.099130, b=0.181827	0.999139	0.009752	0.000107
Midilli et al.	k=0.007920, n=1.143062, a=1.000402, b=0.000081	0.999701	0.005706	0.000038

ตารางที่ 4.11 ผลทางสถิติที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางขมื่นชั้นด้วยกำลังของรังสีอินฟราเรด 800 W ที่อุณหภูมิ 50 °C

แบบจำลอง	ค่าคงที่ของแบบจำลอง	R ²	RMSE	χ ²
Newton	k=0.051464	0.991758	0.028007	0.000872
Page	k=0.030202, n=1.181281	0.997993	0.014629	0.000268
Henderson and Pabis	k=0.053648, a=1.037528	0.994390	0.024048	0.000723
Logarithmic	k=0.052507, a=1.044660, c=-0.009333	0.994573	0.023778	0.000808
Modified Page	k=0.226856, n=0.226856	0.991758	0.028007	0.000980
Two Term	k ₀ =0.053648, k ₁ =0.053648, a=0.518764, b=0.518764	0.994390	0.024048	0.000964
Two Term Exponential	k=20.13761, a=0.002547	0.991439	0.028510	0.001016
Wang and Singh	a=-0.036824, b=0.000329	0.978475	0.048990	0.003000
Approximation of diffusion	k=0.396459, a=-0.161351, b=0.152355	0.999111	0.009730	0.000135
Midilli et al.	k=0.027361, n=1.228072, a=1.004208, b=0.000414	0.999245	0.008901	0.000132

ตารางที่ 4.12 ผลทางสถิติที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางขมื่นชั้นด้วยกำลังของรังสีอินฟราเรด 800 W ที่อุณหภูมิ 60 °C

แบบจำลอง	ค่าคงที่ของแบบจำลอง	R ²	RMSE	χ ²
Newton	k=0.103439	0.963058	0.061583	0.004551
Page	k=0.030813, n=1.498877	0.998918	0.011749	0.000207
Henderson and Pabis	k=0.107238, a=1.043154	0.969798	0.058564	0.005145
Logarithmic	k=0.069884, a=1.253378, c=-0.233018	0.991203	0.033400	0.002231
Modified Page	k=0.321620, n=0.321620	0.963058	0.061583	0.005689
Two Term	k ₀ =0.107238, k ₁ =0.107238, a=0.521577, b=0.521577	0.969798	0.058564	0.010289
Two Term Exponential	k=0.103439, a=0.999954	0.963058	0.061583	0.005689
Wang and Singh	a=-0.075676, b=0.001441	0.996386	0.021054	0.000665
Approximation of diffusion	k=0.213436, a=-228.600, b=0.995689	0.997777	0.016681	0.000556
Midilli et al.	k=0.033942, n=1.456742, a=0.998986, b=-0.000165	0.999834	0.004578	0.000063

ตารางที่ 4.13 ผลทางสถิติที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางไขมันชั้นด้วยกำลังของรังสีอินฟราเรด 1,000 W ที่อุณหภูมิ 40 °C

แบบจำลอง	ค่าคงที่ของแบบจำลอง	R ²	RMSE	χ ²
Newton	k=0.019771	0.996573	0.019386	0.000396
Page	k=0.012619, n=1.115381	0.999497	0.007762	0.000067
Henderson and Pabis	k=0.020701, a=1.036016	0.998277	0.014225	0.000225
Logarithmic	k=0.020350, a=1.039551, c=-0.005959	0.998356	0.013951	0.000229
Modified Page	k=0.140608, n=0.140608	0.996573	0.019386	0.000418
Two Term	k ₀ =0.020701, k ₁ =0.020701, a=0.518005, b=0.518010	0.998277	0.014225	0.000253
Two Term Exponential	k=9.777697, a=0.002018	0.996380	0.019894	0.000440
Wang and Singh	a=-0.012913, b=0.000040	0.975595	0.057428	0.003664
Approximation of diffusion	k=0.086074, a=-0.149255, b=0.264320	0.999620	0.006737	0.000053
Midilli et al.	k=0.011593, n=1.142791, a=1.000447, b=0.000075	0.999873	0.003876	0.000019

ตารางที่ 4.14 ผลทางสถิติที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางขมึนชั้นด้วยกำลังของรังสีอินฟราเรด 1,000 W ที่อุณหภูมิ 50 °C

แบบจำลอง	ค่าคงที่ของแบบจำลอง	R ²	RMSE	χ^2
Newton	k=0.054685	0.993698	0.023976	0.000647
Page	k=0.033924, n=1.163164	0.999625	0.006169	0.000049
Henderson and Pabis	k=0.056421, a=1.028816	0.995461	0.000569	0.021033
Logarithmic	k=0.050783, a=1.067717, c=-0.048534	0.997727	0.015189	0.000346
Modified Page	k=0.233849, n=0.233849	0.993698	0.023976	0.000739
Two Term	k ₀ =0.056421, k ₁ =0.056421, a=0.514408, b=0.514408	0.995461	0.021033	0.000796
Two Term Exponential	k=19.06302, a=0.002854	0.993381	0.024533	0.000774
Wang and Singh	a=-0.040750, b=0.000415	0.994877	0.023321	0.000699
Approximation of diffusion	k=0.090595, a=-39.8838, b=0.986248	0.999613	0.006268	0.000059
Midilli et al.	k=0.032520, n=1.175279, a=0.999082, b=-0.000014	0.999822	0.004266	0.000033

ตารางที่ 4.15 ผลทางสถิติที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางขมึนชั้นด้วยกำลังของรังสีอินฟราเรด 1,000 W ที่อุณหภูมิ 60 °C

แบบจำลอง	ค่าคงที่ของแบบจำลอง	R ²	RMSE	χ ²
Newton	k=0.113614	0.980731	0.045394	0.002473
Page	k=0.050901, n=1.337638	0.997729	0.016726	0.000420
Henderson and Pabis	k=0.116229, a=1.027325	0.983148	0.043809	0.002879
Logarithmic	k=0.084918, a=1.160217, c=-0.150615	0.996157	0.021852	0.000955
Modified Page	k=0.337067, n=0.337067	0.980731	0.045394	0.003091
Two Term	k ₀ =0.116229, k ₁ =0.116229, a=0.513662, b=0.513662	0.983148	0.043809	0.005758
Two Term Exponential	k=0.164296, a=1.885772	0.996608	0.020257	0.000616
Wang and Singh	a=-0.082331, b=0.001718	0.999811	0.004849	0.000035
Approximation of diffusion	k=0.209485, a=-262.988, b=0.997005	0.997190	0.018498	0.000684
Midilli et al.	k=0.057250, n=1.263103, a=0.998162, b=-0.001243	0.998455	0.013864	0.000577

ตารางที่ 4.16 ผลทางสถิติที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางไขมันชั้นด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 600 W อุณหภูมิ 40 °C

แบบจำลอง	ค่าคงที่ของแบบจำลอง	R ²	RMSE	χ ²
Newton	k=0.039613	0.998949	0.010338	0.000116
Page	k=0.035494, n=1.034615	0.999208	0.009085	0.000098
Henderson and Pabis	k=0.040001, a=1.007787	0.999040	0.009956	0.000117
Logarithmic	k=0.040437, a=1.005027, c=0.004135	0.999071	0.009765	0.000124
Modified Page	k=0.199029, n=0.199029	0.998949	0.010338	0.000126
Two Term	k ₀ =0.040001, k ₁ =0.040001, a=0.503893, b=0.503893	0.999040	0.009956	0.000143
Two Term Exponential	k=6.335809, a=0.006191	0.998799	0.011018	0.000143
Wang and Singh	a=-0.025499, b=0.000152	0.953526	0.076822	0.006975
Approximation of diffusion	k=0.158458, a=-0.053415, b=0.263532	0.999277	0.008685	0.000098
Midilli et al.	k=0.032265, n=1.068342, a=0.996383, b=0.000136	0.999556	0.006754	0.000066

ตารางที่ 4.17 ผลทางสถิติที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางไขมันชั้นด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 600 W อุณหภูมิ 50 °C

แบบจำลอง	ค่าคงที่ของแบบจำลอง	R ²	RMSE	χ ²
Newton	k=0.054668	0.992187	0.027388	0.000833
Page	k=0.034285, n=1.160663	0.996996	0.017834	0.000398
Henderson and Pabis	k=0.056457, a=1.029454	0.993869	0.025025	0.000783
Logarithmic	k=0.055736, a=1.033631, c=-0.005472	0.993957	0.024927	0.000888
Modified Page	k=0.233812, n=0.233812	0.992187	0.027388	0.000938
Two Term	k ₀ =0.056457, k ₁ =0.056457, a=0.514727, b=0.514727	0.993869	0.025025	0.001044
Two Term Exponential	k=17.29731, a=0.003144	0.991881	0.027879	0.000972
Wang and Singh	a=-0.038112, b=0.000347	0.972849	0.055502	0.003851
Approximation of diffusion	k=0.235179, a=-0.214260, b=0.278320	0.997578	0.016005	0.000366
Midilli et al.	k=0.030170, n=1.214903, a=0.998497, b=0.000400	0.998132	0.013903	0.000322

ตารางที่ 4.18 ผลทางสถิติที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางไขมันชั้นด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 600 W อุณหภูมิ 60 °C

แบบจำลอง	ค่าคงที่ของแบบจำลอง	R ²	RMSE	χ ²
Newton	k=0.068652	0.994503	0.023012	0.000596
Page	k=0.046276, n=1.143004	0.998294	0.013356	0.000229
Henderson and Pabis	k=0.070272, a=1.022965	0.995525	0.021282	0.000582
Logarithmic	k=0.068764, a=1.030044, c=-0.009041	0.995695	0.020980	0.000660
Modified Page	k=0.262015, n=0.262015	0.994503	0.023012	0.000681
Two Term	k ₀ =0.070272, k ₁ =0.070272, a=0.511482, b=0.511482	0.995525	0.021282	0.000815
Two Term Exponential	k=12.21513, a=0.005562	0.994062	0.023861	0.000732
Wang and Singh	a=-0.046928, b=0.000526	0.975895	0.052269	0.003513
Approximation of diffusion	k=0.247232, a=-0.229837, b=0.329300	0.998564	0.012243	0.000225
Midilli et al.	k=0.042210, n=1.185766, a=,0.998594 b=0.000406	0.999012	0.010075	0.000183

ตารางที่ 4.19 ผลทางสถิติที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางไขมันชั้นด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 800 W อุณหภูมิ 40 °C

แบบจำลอง	ค่าคงที่ของแบบจำลอง	R ²	RMSE	χ ²
Newton	k=0.053785	0.993468	0.025324	0.000705
Page	k=0.032345, n=1.174485	0.998360	0.013321	0.000217
Henderson and Pabis	k=0.055755, a=1.032908	0.995229	0.022353	0.000611
Logarithmic	k=0.055560, a=1.034006, c=-0.001467	0.995244	0.022342	0.000686
Modified Page	k=0.231916, n=0.231916	0.993468	0.025324	0.000784
Two Term	k ₀ =0.055755, k ₁ =0.055755, a=0.516454, b=0.516454	0.995229	0.022353	0.000785
Two Term Exponential	k=18.37446, a=0.002913	0.993190	0.025826	0.000815
Wang and Singh	a=-0.034808, b=0.000279	0.954311	0.074757	0.006830
Approximation of diffusion	k=0.256329, a=-0.208677, b=0.251657	0.998927	0.010763	0.000159
Midilli et al.	k=0.029598, n=1.213397, a=1.000885, b=0.000293	0.999468	0.007498	0.000088

ตารางที่ 4.20 ผลทางสถิติที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางไขมันชั้นด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 800 W อุณหภูมิ 50 °C

แบบจำลอง	ค่าคงที่ของแบบจำลอง	R ²	RMSE	χ ²
Newton	k=0.060316	0.997184	0.016525	0.000303
Page	k=0.043501, n=1.114327	0.999586	0.006549	0.000054
Henderson and Pabis	k=0.061588, a=1.019600	0.997819	0.014842	0.000275
Logarithmic	k=0.060149, a=1.027064, c=-0.009808	0.998021	0.014229	0.000289
Modified Page	k=0.245594, n=0.245594	0.997184	0.016525	0.000341
Two Term	k ₀ =0.061588, k ₁ =0.061588, a=0.509800, b=0.509800	0.997819	0.014842	0.000367
Two Term Exponential	k=17.82310, a=0.003370	0.996984	0.017081	0.000365
Wang and Singh	a=-0.040003, b=0.000372	0.967043	0.062427	0.004871
Approximation of diffusion	k=0.174092, a=-0.252340, b=0.410117	0.999667	0.005870	0.000049
Midilli et al.	k=0.041320, n=1.135903, a=0.998263, b=0.000162	0.999789	0.004649	0.000036

ตารางที่ 4.21 ผลทางสถิติที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางขมิ้นชันด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 800 W อุณหภูมิ 60 °C

แบบจำลอง	ค่าคงที่ของแบบจำลอง	R ²	RMSE	χ ²
Newton	k=0.074738	0.995904	0.019996	0.000450
Page	k=0.052553, n=1.129404	0.998966	0.010405	0.000139
Henderson and Pabis	k=0.076012, a=1.017181	0.996463	0.018921	0.000460
Logarithmic	k=0.072414, a=1.032831, c=-0.019921	0.997211	0.017002	0.000434
Modified Page	k=0.273383, n=0.273383	0.995904	0.019996	0.000514
Two Term	k ₀ =0.076012, k ₁ =0.076012, a=0.508591, b=0.508591	0.996463	0.018921	0.000644
Two Term Exponential	k=0.074739, a=0.999939	0.995904	0.019996	0.000514
Wang and Singh	a=-0.048955, b=0.000558	0.973611	0.055924	0.004021
Approximation of diffusion	k=0.115507, a=-97.3396, b=0.994999	0.999137	0.009507	0.000136
Midilli et al.	k=0.050707, n=1.143001, a=0.995999, b=0.000084	0.999004	0.010165	0.000186

ตารางที่ 4.22 ผลทางสถิติที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางไขมันชั้นด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 1,000 W อุณหภูมิ 40 °C

แบบจำลอง	ค่าคงที่ของแบบจำลอง	R ²	RMSE	χ ²
Newton	k=0.059866	0.996689	0.017601	0.000349
Page	k=0.045589, n=1.094770	0.998696	0.011386	0.000167
Henderson and Pabis	k=0.060684, a=1.012644	0.997037	0.016890	0.000367
Logarithmic	k=0.056754, a=1.035513, c=-0.029059	0.998047	0.013897	0.000290
Modified Page	k=0.244675, n=0.244675	0.996689	0.017601	0.000398
Two Term	k ₀ =0.060680, k ₁ =0.060688, a=0.506323, b=0.506323	0.997037	0.016890	0.000513
Two Term Exponential	k=14.48028, a=0.004112	0.996497	0.018072	0.000420
Wang and Singh	a=-0.043138, b=0.000457	0.987462	0.036938	0.001754
Approximation of diffusion	k=0.089054, a=-58.3234, b=0.992719	0.998965	0.010161	0.000155
Midilli et al.	k=0.044683, n=1.098347, a=0.994504, b=-0.000049	0.998737	0.011173	0.000225

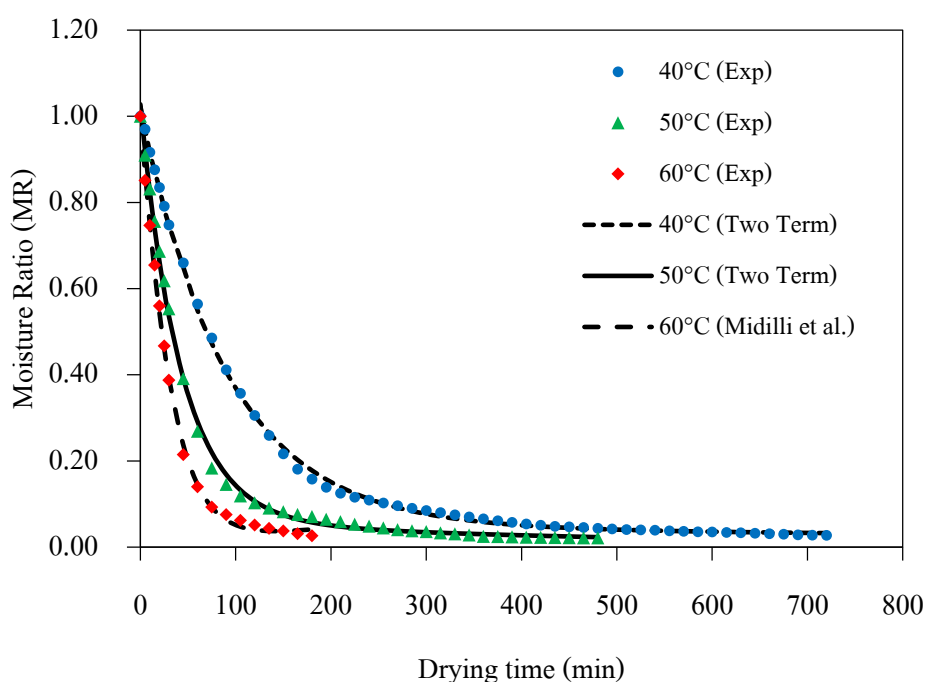
ตารางที่ 4.23 ผลทางสถิติที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางไขมันชั้นด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 1,000 W อุณหภูมิ 50 °C

แบบจำลอง	ค่าคงที่ของแบบจำลอง	R ²	RMSE	χ ²
Newton	k=0.082311	0.990932	0.029772	0.001013
Page	k=0.050055, n=1.186605	0.997701	0.015757	0.000331
Henderson and Pabis	k=0.083996, a=1.021790	0.992080	0.028504	0.001083
Logarithmic	k=0.072901, a=1.071961, c=-0.061385	0.996450	0.019610	0.000615
Modified Page	k=0.286899, n=0.286899	0.990932	0.001182	0.029772
Two Term	k ₀ =0.083996, k ₁ =0.083996, a=0.510895, b=0.510895	0.992080	0.028504	0.001625
Two Term Exponential	k=25.41533, a=0.003228	0.990686	0.030143	0.001211
Wang and Singh	a=-0.056953, b=0.000786	0.994308	0.025763	0.000885
Approximation of diffusion	k=0.134186, a=-156.087, b=0.996333	0.997887	0.015067	0.000363
Midilli et al.	k=0.053229, n=1.160169, a=0.996161, b=-0.000317	0.998637	0.012139	0.000295

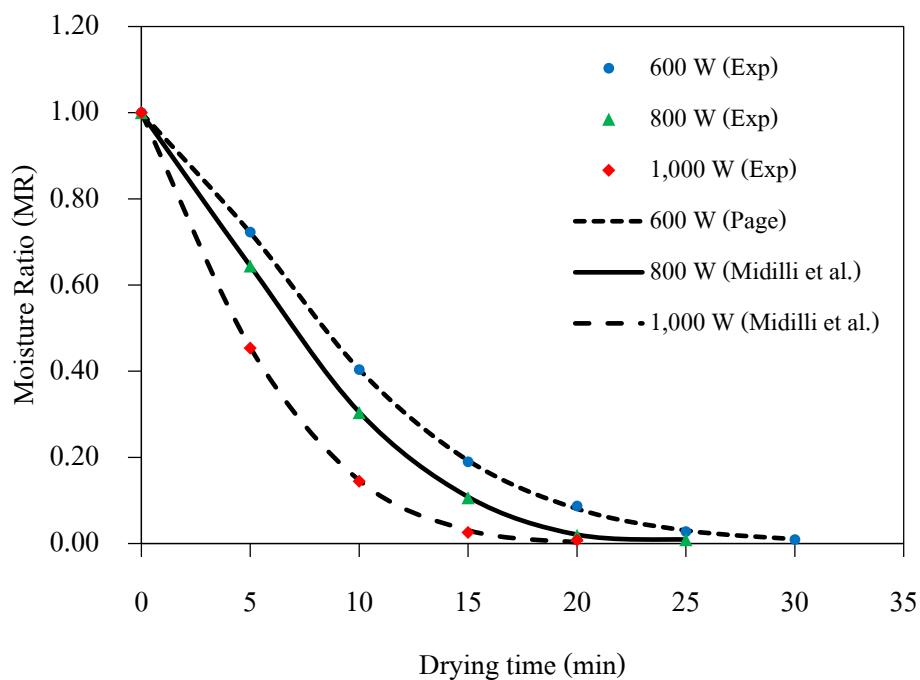
ตารางที่ 4.24 ผลทางสถิติที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางขมึนชั้นด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 1,000 W อุณหภูมิ 60 °C

แบบจำลอง	ค่าคงที่ของแบบจำลอง	R ²	RMSE	χ ²
Newton	k=0.089330	0.988198	0.033940	0.001344
Page	k=0.051895, n=1.208893	0.997150	0.017629	0.000435
Henderson and Pabis	k=0.091158, a=1.022340	0.989641	0.032642	0.001492
Logarithmic	k=0.067339, a=1.145622, c=-0.144578	0.999551	0.000087	0.007047
Modified Page	k=0.298881, n=0.298881	0.988198	0.033940	0.001613
Two Term	k ₀ =0.091158, k ₁ =0.091158, a=0.511170, b=0.511170	0.989641	0.032642	0.002486
Two Term Exponential	k=27.91777, a=0.003188	0.987917	0.034307	0.001648
Wang and Singh	a=-0.065382, b=0.001099	0.998126	0.014617	0.000299
Approximation of diffusion	k=0.148142, a=-185.400, b=0.996749	0.997250	0.017252	0.000521
Midilli et al.	k=0.066823, n=1.058792, a=0.998683, b=-0.002563	0.999548	0.007066	0.000117

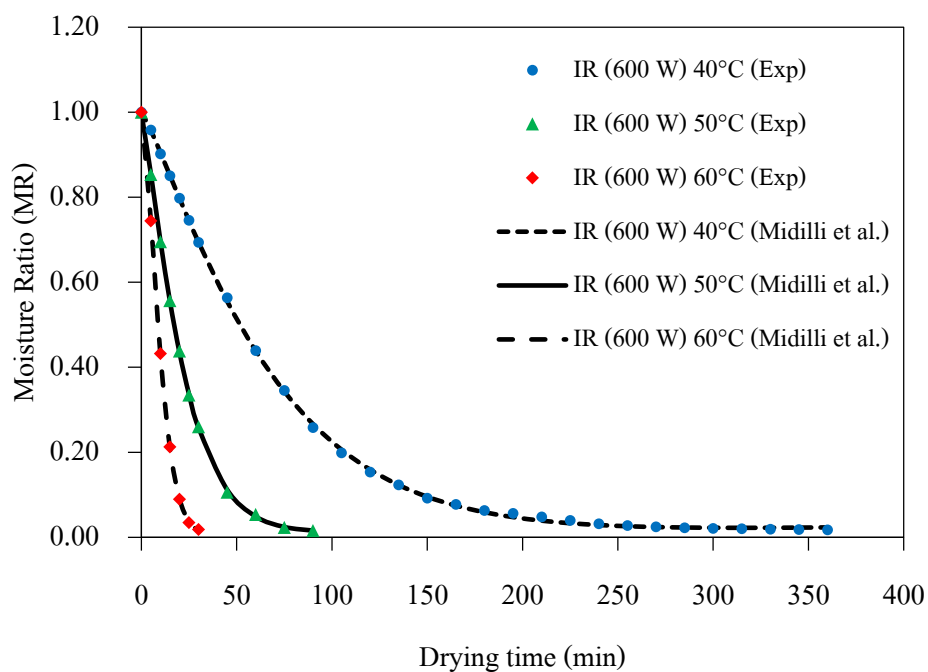
จากค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่าง ๆ เมื่อนำมาเขียนกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลองและค่าอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แสดงดังภาพที่ 4.10-4.13 จะเห็นได้ว่าแบบจำลองที่ให้ผลการทำนายที่ดีที่สุด จะให้ค่าอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าใกล้เคียงกันทุกเงื่อนไขการทดลอง ซึ่งสามารถทำนายผลการทดลองได้ดีที่สุดตลอดช่วงเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง



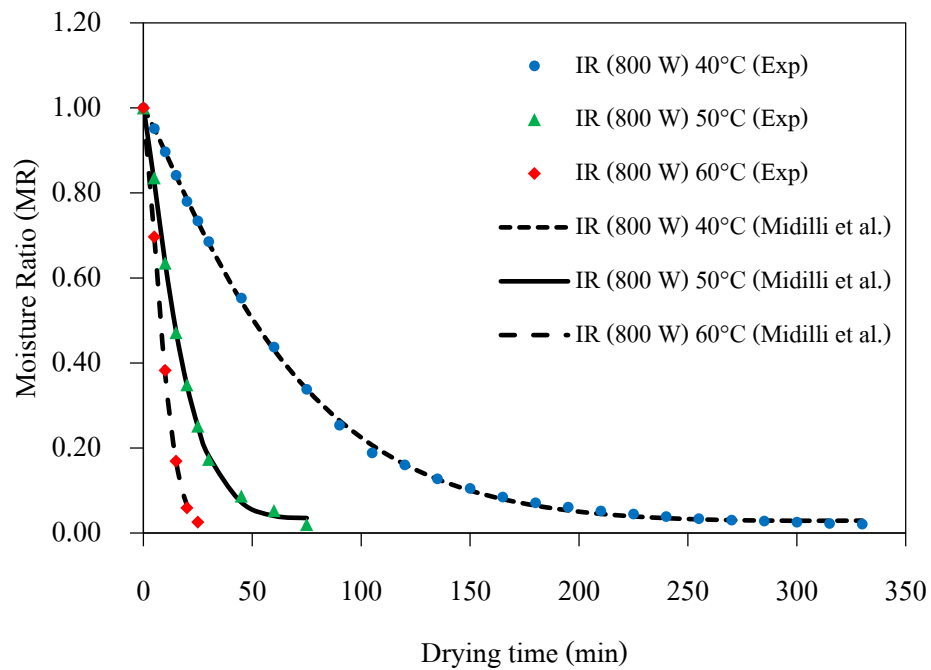
ภาพที่ 4.10 การเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนความชื้นกับเวลาของการอบแห้งขมิ้นชันที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ดีที่สุดสำหรับการอบแห้งขมิ้นชันด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 40 50 และ 60 °C



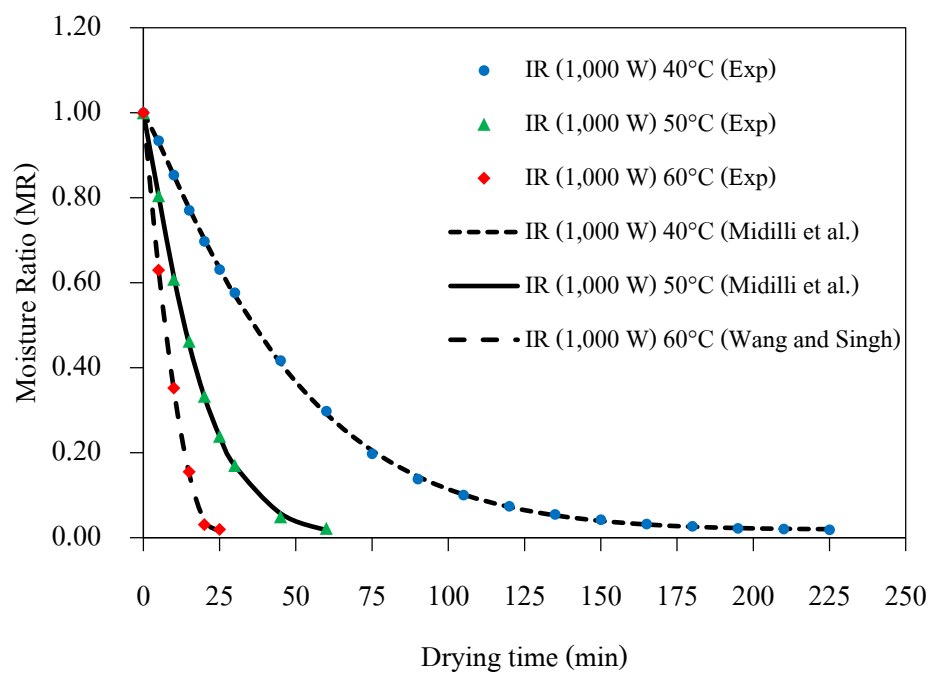
ภาพที่ 4.11 การเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนความชื้นกับเวลาของการอบแห้งขมิ้นชันที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ดีที่สุดสำหรับการอบแห้งขมิ้นชันด้วยกำลังอินฟราเรด 600 800 และ 1,000 W



(ก)

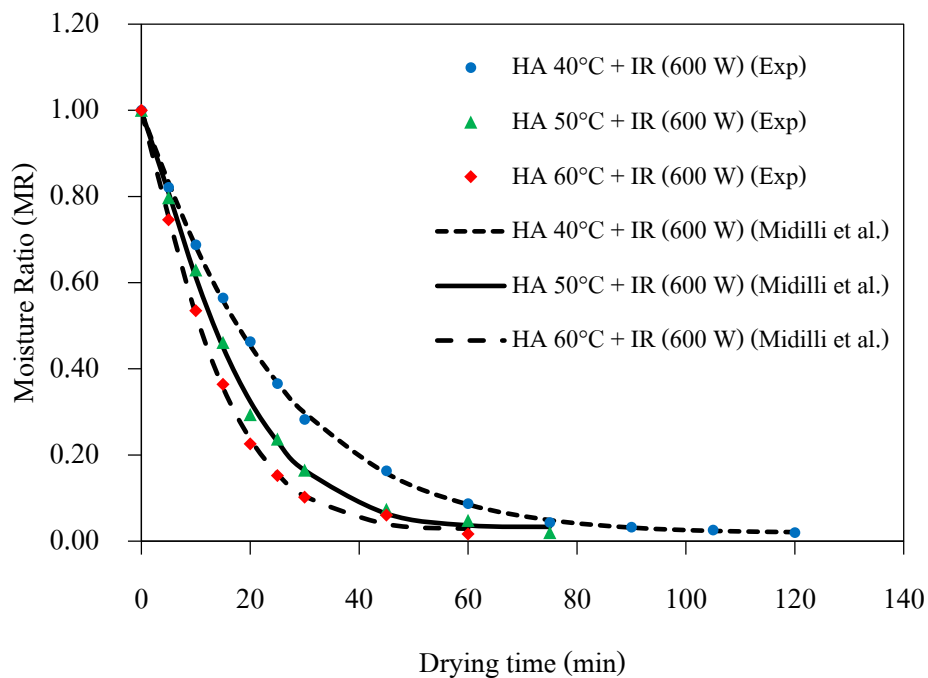


(ข)

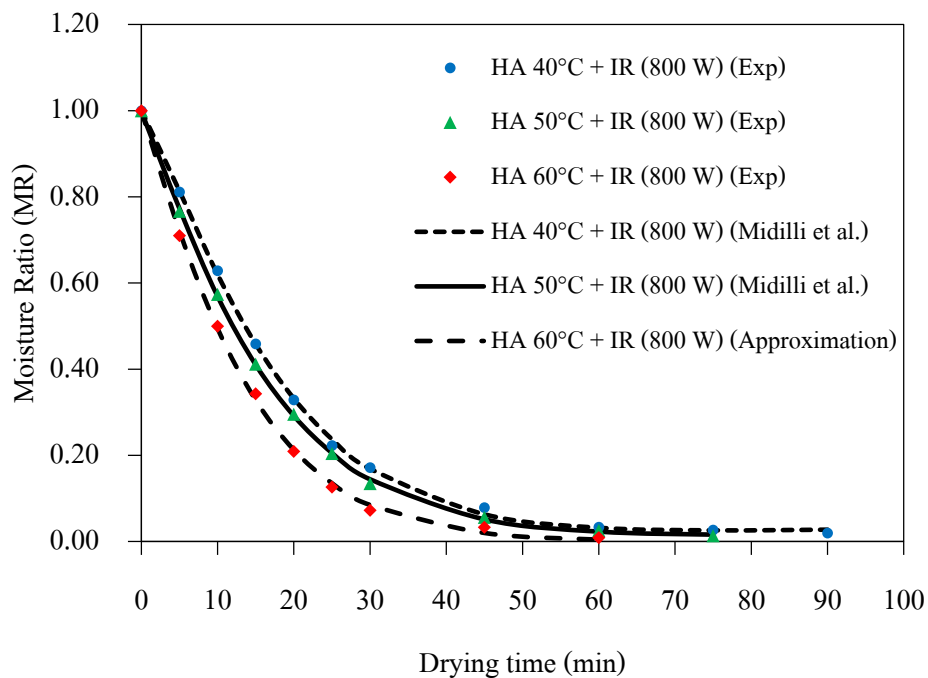


(ค)

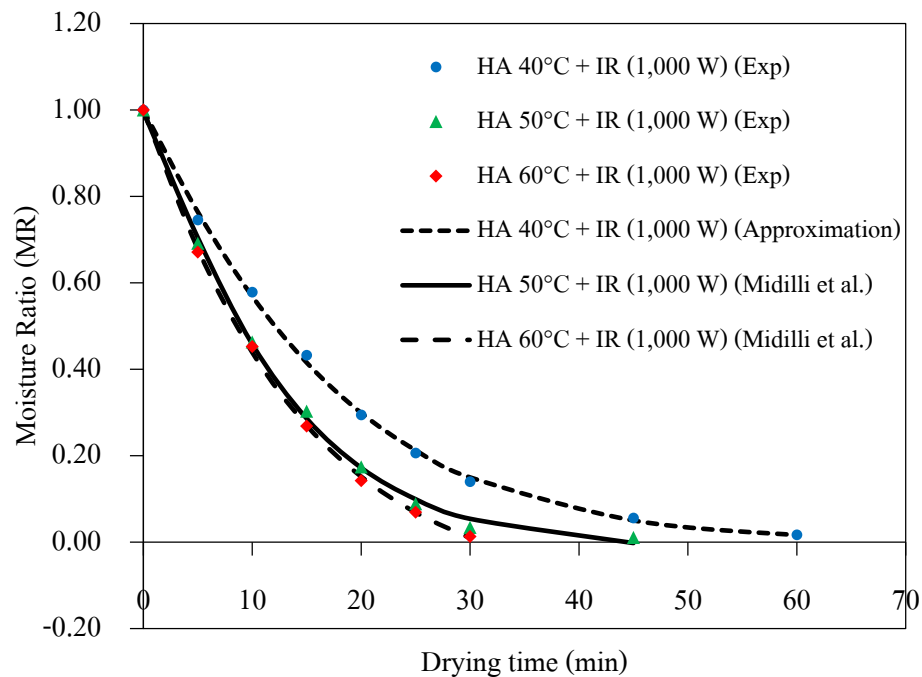
ภาพที่ 4.12 การเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนความชื้นกับเวลาของการอบแห้งขมิ้นชันที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ดีที่สุดสำหรับการอบแห้งขมิ้นชันที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 °C กำลังอินฟราเรด 600 W (ก) 800 W (ข) และ 1,000 W (ค)



(n)



(ñ)



(ค)

ภาพที่ 4.13 การเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนความชื้นกับเวลาของการอบแห้งไขมันชั้นที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ดีที่สุดสำหรับการอบแห้งไขมันชั้นที่อุณหภูมิความร้อน 40 50 และ 60 °C กำลังอินฟราเรด 600 W (ก) 800 W (ข) และ 1,000 W (ค)

ผลการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล

ผลของปัจจัยที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล

จากผลของปัจจัยที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลสำหรับการอบแห้งไขมันชั้นด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 °C และใช้กำลังของรังสีอินฟราเรด 600 800 และ 1,000 W โดยนำผลการทดลองระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาอบแห้งนำมาหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของไขมันชั้นได้ โดยพิจารณาจากสมการในกรณีการแพร่ความชื้นในวัสดุที่มีรูปทรงเป็นแผ่นระนาบ (infinite slab) ดังสมการที่ (2.8) และจากค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลที่อุณหภูมิต่าง ๆ สามารถนำมาหาความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลกับอุณหภูมิตามรูปแบบสมการของ Arrhenius สำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อนในส่วนของการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดโดยไม่ควบคุมอุณหภูมิอากาศอบแห้งจะทำการหาความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลกับอัตราส่วนของน้ำหนักตัวอย่างต่อ

กำลังอินฟราเรดตามรูปแบบสมการของ Arrhenius เช่นเดียวกัน ดังสมการที่ (2.9) และ (2.10) สำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อนและการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ตามลำดับ

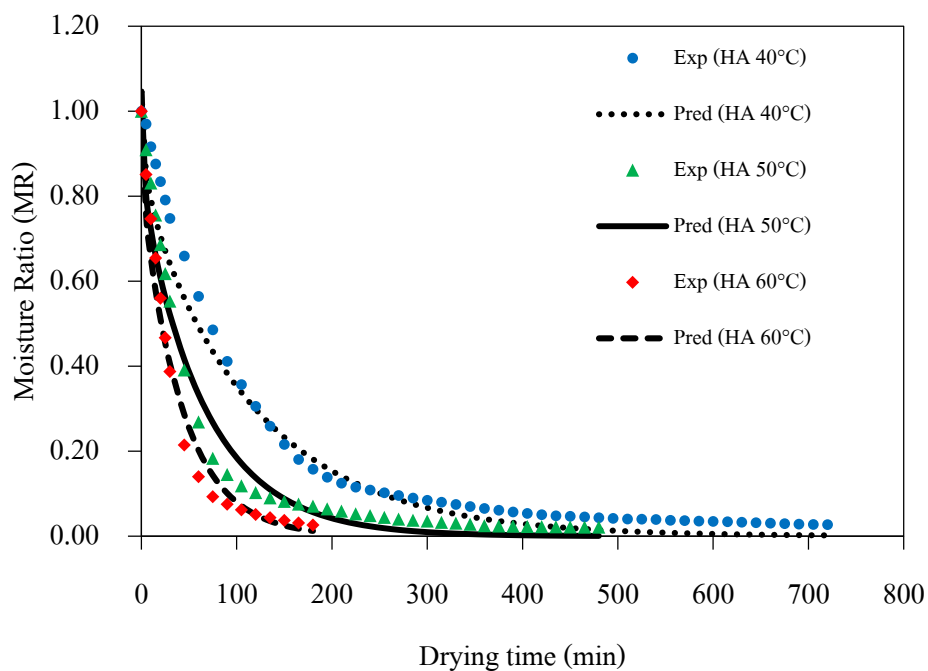
สำหรับการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลที่สภาวะการอบแห้งต่าง ๆ โดยใช้วิธีแก้ปัญหาเชิงคณิตศาสตร์ด้วยสมการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลที่ได้นั้นเป็นค่าที่ได้จากการทดลอง จากนั้นนำค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลที่ได้ไปคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) และค่า Arrhenius factor (D_0) ดังแสดงในตารางที่ 4.25 จากผลการทดลอง พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลที่ได้จากการทดลองสำหรับสภาวะการอบแห้งด้วยลมร้อนมีค่าอยู่ในช่วง $0.3371 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{min}$ ถึง $0.9358 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{min}$ และสำหรับสภาวะการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลที่ได้จากการทดลองอยู่ในช่วง $3.2658 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{min}$ ถึง $6.2510 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{min}$ สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นมีค่าใกล้เคียงกับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลที่ได้จากการทดลองทุกเงื่อนไข การทดลองสำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อนและการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด และจากผลการทดลองสังเกตได้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและกำลังอินฟราเรดเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มกำลังอินฟราเรดและอุณหภูมิส่งผลทำให้ความชื้นสามารถแพร่ออกมาจากวัสดุได้เร็วขึ้น

นอกจากนี้ยังสรุปได้ว่า การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดโดยไม่ควบคุมอุณหภูมิอากาศอบแห้งมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลสูงกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน เนื่องจากคุณสมบัติของรังสีอินฟราเรดนั้นสามารถทะลุทะลวงเข้าไปในเนื้อวัสดุ ทำให้โมเลกุลของน้ำเกิดการสั่นสะเทือนและร้อนขึ้น ส่งผลทำให้เกิดการแพร่ความชื้นไปยังบริเวณผิวของวัสดุอย่างรวดเร็ว ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลมีค่าสูง ซึ่งแตกต่างกับการอบแห้งด้วยลมร้อนจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลมีค่าต่ำ เนื่องจากการอบแห้งด้วยลมร้อนจะเกิดการถ่ายเทความร้อนที่ผิวของวัสดุเท่านั้น ทำให้การแพร่ความชื้นภายในวัสดุไปยังผิวของวัสดุค่อนข้างช้าทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลมีค่าต่ำกว่าการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดโดยไม่ควบคุมอุณหภูมิอากาศอบแห้งทุกเงื่อนไขการทดลอง

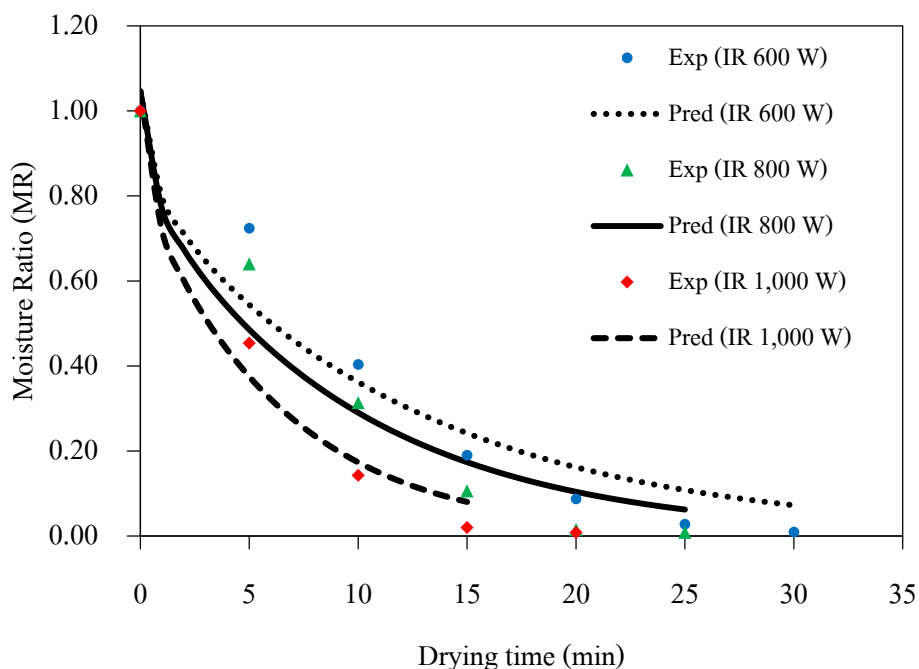
ตารางที่ 4.25 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของสภาวะการอบแห้งขมิ้นชันด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรด

Source	Drying temp. ($^{\circ}\text{C}$)	m (kg)	$D_{\text{eff}} \times 10^{-4}$ (cm^2/min) (Experiment)	$D_{\text{eff}} \times 10^{-4}$ (cm^2/min) (Arrhenius)	Diffusivity Constant, (D_0) (cm^2/min)	Activation Energy, (E_a)	R^2	RMSE	χ^2
HA	40	-	0.3371	0.3401	1270.273	45.3437 (kJ/mol)	0.9965	1.481×10^{-6}	6.578×10^{-12}
	50	-	0.5992	0.5770					
	60	-	0.9358	0.9483					
IR (600 W)	-	0.05742	3.2658	3.0861	1.326×10^{-3}	15.1630 (kW/kg)	0.9298	3.135×10^{-5}	2.950×10^{-9}
IR (800 W)	-	0.05521	4.1876	4.6257					
IR (1,000 W)	-	0.05202	6.2510	5.9850					

นอกจากนี้เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของขมิ้นชันที่ได้จากการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 4.25 แทนค่ากลับในสมการที่ (2.8) ทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของขมิ้นชันจากสมการในกรณีการแพร่ความชื้นในวัสดุที่มีรูปทรงเป็นแผ่นระนาบ (infinite slab) เพื่อหาค่าอัตราส่วนความชื้นที่เวลาใด ๆ จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ หลังจากนั้นเขียนกราฟเพื่อเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งผลการเปรียบเทียบแสดงดังภาพที่ 4.14-4.15 พบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งของขมิ้นชันนั้น สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงความชื้นตามเวลาได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองการอบแห้งขมิ้นชันทุก ๆ เงื่อนไขการทดลอง คือ การอบแห้งด้วยลมร้อน และการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดแบบไม่ควบคุมอุณหภูมิอากาศอบแห้ง



ภาพที่ 4.14 การเปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งขมิ้นชันด้วยลมร้อนที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองการแพร่ความชื้นที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 °C



ภาพที่ 4.15 การเปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งขมิ้นชันด้วยรังสีอินฟราเรดที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองการแพร่ความชื้นที่กำลัง 600 800 และ 1,000 W

ความสัมพันธ์ของพลังงานจำเพาะในการอบแห้งขมิ้นชัน

ความสัมพันธ์ของพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งขมิ้นชันด้วยวิธีการอบแห้งต่าง ๆ พิจารณาจากพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง ซึ่งสามารถคำนวณค่าความสัมพันธ์พลังงานจำเพาะได้จากสมการที่ 2.3 โดยงานวิจัยนี้พิจารณาค่าความสัมพันธ์พลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งขมิ้นชันจากเงื่อนไขการทดลองดังต่อไปนี้

1. การทดลองอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60°C
2. การทดลองอบแห้งด้วยกำลังอินฟราเรด 600 800 และ 1,000 W และทดลองอบแห้งที่กำลังอินฟราเรด 600 800 และ 1,000 W โดยควบคุมอุณหภูมิของอากาศภายในห้องอบแห้งเท่ากับ 50 และ 60°C
3. การทดลองอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดที่ขนาดกำลังอินฟราเรด 600 800 และ 1,000 W อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 40 50 และ 60°C

โดยที่ขมิ้นชันมีความชื้นเริ่มต้นอยู่ในช่วง 480-640 % (d.b.) และกำหนดความชื้นสุดท้ายของการทดลองในช่วง 7-10 % (d.b.) ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.26

ตารางที่ 4.26 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งขมิ้นชัน

Drying Condition			Drying time (min)	Initial moisture %(d.b.)	final moisture %(d.b.)	Ep (kW• h)				Specific Energy Consumption, SEC (MJ/kg of water evaporated)
Source	P (W)	T (°C)				Blower	Heater	Infrared	Total	
Hot Air	-	60	240	510.618	10.496	0.600	8.800	-	9.400	7.522
Infrared	600	-	30	601.356	7.221	-	-	0.300	0.300	0.233
	800	-	25	537.643	7.973	-	-	0.250	0.300	0.193
	1,000	-	15	572.576	9.236	-	-	0.250	0.300	0.189
Infrared	600	50	90	588.768	9.200	-	-	0.450	0.450	0.317
		60	40	531.676	7.579	-	-	0.250	0.250	0.208
	800	50	75	604.048	9.203	-	-	0.350	0.350	0.294
		60	30	569.127	9.506	-	-	0.250	0.250	0.189
	1,000	50	60	621.869	9.755	-	-	0.400	0.400	0.271
		60	20	568.939	7.926	-	-	0.200	0.200	0.121

ตารางที่ 4.26 (ต่อ)

Drying Condition			Drying time (min)	Initial moisture %(d.b.)	final moisture %(d.b.)	Ep (kW• h)				Specific Energy Consumption, SEC (MJ/kg of water evaporated)
Source	P (W)	T (°C)				Blower	Heater	Infrared	Total	
Combined Infrared and Hot Air	600	40	120	515.604	9.731	0.400	0.850	1.200	2.450	1.727
		50	75	486.460	9.176	0.250	2.100	0.750	3.100	2.191
		60	60	495.545	8.821	0.200	2.600	0.600	3.400	2.492
	800	40	90	604.429	10.268	0.300	0.400	1.200	1.900	1.369
		50	75	555.342	7.763	0.250	1.700	1.000	3.050	1.989
		60	55	615.614	10.379	0.200	2.300	0.700	3.400	2.129
	1,000	40	60	517.383	9.279	0.200	0.200	1.000	1.400	1.009
		50	45	588.941	7.688	0.150	1.300	0.800	1.950	1.681
		60	30	634.430	10.208	0.100	1.800	0.500	2.400	1.726

จากผลการทดลองค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งขมิ้นชัน พบว่าการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่กำลังอินฟราเรด 600 800 และ 1,000 W มีค่าอยู่ในช่วง 0.227-0.233 เมกกะจูลต่อกิโลกรัมของน้ำที่ระเหย โดยค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มกำลังอินฟราเรด เนื่องจากการเพิ่มกำลังของรังสีอินฟราเรดทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งลดลงส่งผลทำให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีค่าลดลง สำหรับผลการทดลองการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดโดยควบคุมอุณหภูมิของอากาศในห้องอบแห้งเท่ากับ 50 และ 60 °C พบว่า ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะสำหรับการอบแห้งที่กำลังอินฟราเรด 600 W อุณหภูมิอบแห้งเท่ากับ 50 และ 60 °C มีค่าเท่ากับ 0.317 และ 0.208 เมกกะจูลต่อกิโลกรัมของน้ำที่ระเหย ตามลำดับ ในขณะที่กำลังอินฟราเรด 800 W อุณหภูมิอบแห้งเท่ากับ 50 และ 60 °C มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเท่ากับ 0.294 และ 0.189 เมกกะจูลต่อกิโลกรัมของน้ำที่ระเหย ตามลำดับ และสำหรับที่กำลังอินฟราเรด 1,000 W อุณหภูมิอบแห้งเท่ากับ 50 และ 60 °C มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเท่ากับ 0.271 และ 0.121 เมกกะจูลต่อกิโลกรัมของน้ำที่ระเหย ตามลำดับ จากผลการทดลอง พบว่า กำลังอินฟราเรดเดียวกัน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งทำให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีค่าลดลง ในขณะเดียวกันเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิอบแห้งเดียวกัน พบว่า การเพิ่มกำลังอินฟราเรดทำให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีค่าลดลงเช่นเดียวกัน เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งและกำลังอินฟราเรดส่งผลทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งนั้นลดลง

ในส่วนของการทดลองการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 600 800 และ 1,000 W อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 40 50 และ 60 °C พบว่า ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะสำหรับการอบแห้งที่กำลังอินฟราเรด 600 W มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะอยู่ในช่วง 1.727-2.492 เมกกะจูลต่อกิโลกรัมของน้ำที่ระเหย ในขณะที่กำลังอินฟราเรด 800 W มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะอยู่ในช่วง 1.369-2.129 เมกกะจูลต่อกิโลกรัมของน้ำที่ระเหย และสำหรับกำลังอินฟราเรด 1,000 W มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะอยู่ในช่วง 1.009-1.726 เมกกะจูลต่อกิโลกรัมของน้ำที่ระเหย จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า เมื่อพิจารณาที่กำลังอินฟราเรดเดียวกัน พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนทำให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนส่งผลทำให้ขดลวดความร้อนต้องใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นในการทำให้อุณหภูมิลมร้อนสูงขึ้นจึงทำให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะเดียวกันเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิลมร้อนเดียวกัน พบว่า เมื่อเพิ่มกำลังอินฟราเรดทำให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีค่าลดลง เนื่องจากการเพิ่มกำลังอินฟราเรดทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งลดลง

นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งขมิ้นชันที่สภาวะการอบแห้งต่าง ๆ พบว่า การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดจะให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะน้อยที่สุด รองลงมาคือ การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด และการอบแห้งด้วยลมร้อน ตามลำดับ เนื่องจากการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดจะใช้เวลาในการอบแห้งค่อนข้างน้อยและใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากรังสีอินฟราเรดเพียงอย่างเดียว ในขณะที่การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดถึงแม้ว่าจะใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่าการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดในบางเงื่อนไขการทดลอง แต่ก็มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมากกว่าทุกเงื่อนไขการทดลองเนื่องจากการทดลองอบแห้งนั้นใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากขดลวดความร้อนและรังสีอินฟราเรด ในส่วนของการอบแห้งด้วยลมร้อนนั้นให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งขมิ้นชันที่สภาวะอื่น ๆ ถึงแม้ว่าจะใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากขดลวดความร้อนอย่างเดียวก็ตาม แต่เนื่องจากการอบแห้งด้วยลมร้อนนั้นใช้ระยะเวลาในการอบแห้งยาวนานจึงทำให้ใช้พลังงานไฟฟ้าค่อนข้างมาก

อย่างไรก็ตามปัจจัยที่จะต้องคำนึงถึงต่อไปก็คือ คุณภาพด้านสีของขมิ้นชันภายหลังการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด และการอบแห้งด้วยลมร้อนว่าจะมีความแตกต่างกันหรือไม่เมื่อนำมาเปรียบเทียบกันในแต่ละสภาวะการอบแห้งต่าง ๆ

สีของขมิ้นชันภายหลังการอบแห้ง

สำหรับการทดลองการอบแห้งขมิ้นชันได้ทำการทดสอบสีของขมิ้นชันภายหลังการอบแห้ง ด้วยเครื่องวัดสียี่ห้อ Hunter Lab รุ่น Color Flex โดยสีของขมิ้นชันแสดงในเทอมของค่าความสว่างและมีด (L*) ค่าความเป็นสีแดงหรือสีเขียว (a*) และค่าความเป็นสีเหลืองหรือสีน้ำเงิน (b*) จากเงื่อนไขการทดลองและสภาวะการอบแห้งในแต่ละกรณี พบว่า ปัจจัยจากกระบวนการอบแห้งที่สภาวะต่าง ๆ และระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งนั้นส่งผลต่อคุณภาพสีของขมิ้นชัน อย่างไรก็ตาม ตัวแปรที่สามารถบอกลักษณะคุณภาพด้านสีของขมิ้นชันได้ชัดเจนที่สุดคือ ค่าความเป็นสีแดงหรือสีเขียว (a*) และค่าความเป็นสีเหลืองหรือสีน้ำเงิน (b*) ซึ่งตัวแปรเหล่านี้จะแสดงให้เห็นว่าขมิ้นชันแห้งนั้นมีสีเหลือง-ส้ม สำหรับผลของปัจจัยที่มีต่อสีของขมิ้นชันภายหลังการอบแห้งในแต่ละสภาวะการอบแห้งต่าง ๆ ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.27

ตารางที่ 4.27 ผลการวิเคราะห์ค่าสีของขมิ้นชันภายหลังจากอบแห้งที่สภาวะการอบแห้งต่าง ๆ

Drying Condition			Color of products (CIE Lab)			
Source	P (W)	T (°C)	Lightness (L*)	Redness (a*)	Yellowness (b*)	ΔE*
Fresh turmeric slices			54.36±0.81	44.02±0.64	56.31±0.98	-
Hot Air	-	60	40.10±0.59 ^a	24.20±0.36 ^a	39.23±0.68 ^a	29.84±0.85 ^d
Infrared	600	-	29.52±0.50 ^f	16.86±0.48 ^f	24.77±0.53 ^d	48.49±0.81 ^a
	800	-	34.11±0.68 ^{bcd}	19.89±0.53 ^e	30.96±1.12 ^c	40.54±1.17 ^b
	1,000	-	35.97±0.98 ^b	21.10±0.77 ^{cde}	34.53±1.38 ^b	36.65±1.76 ^c
Infrared	600	50	33.34±0.62 ^e	20.68±0.44 ^{de}	32.21±0.86 ^{bc}	39.65±0.99 ^b
		60	35.32±0.51 ^{bcd}	22.53±0.50 ^{abc}	33.86±0.77 ^b	36.49±0.94 ^c
	800	50	33.95±0.85 ^{cde}	21.26±0.58 ^{cde}	32.59±0.62 ^{bc}	38.75±1.09 ^{bc}
		60	35.48±0.42 ^{bcd}	23.25±0.70 ^{ab}	34.47±0.97 ^b	35.80±0.61 ^c
	1,000	50	33.80±0.76 ^{de}	21.37±0.58 ^{cde}	32.81±0.93 ^{bc}	38.61±1.26 ^{bc}
		60	39.63±0.61 ^a	24.11±0.40 ^a	39.90±0.77 ^a	29.77±0.95 ^d
Combined Infrared and Hot Air	600	40	39.59±0.59 ^a	23.92±0.60 ^a	38.75±0.56 ^a	30.55±0.90 ^d
		50	39.93±0.44 ^a	23.74±0.39 ^a	38.70±1.18 ^a	30.68±0.97 ^d
		60	39.06±0.57 ^a	24.04±0.50 ^a	38.38±0.79 ^a	30.96±0.96 ^d
	800	40	39.69±0.82 ^a	23.59±0.56 ^{ab}	38.86±0.78 ^a	30.67±1.16 ^d
		50	38.57±0.52 ^a	22.67±0.33 ^{abc}	38.69±0.67 ^a	31.92±0.77 ^d
		60	38.12±0.44 ^a	22.13±0.35 ^{bcd}	37.81±0.45 ^a	32.99±0.55 ^d
	1,000	40	39.11±0.55 ^a	23.44±0.45 ^{ab}	38.28±0.77 ^a	31.37±0.94 ^d
		50	39.90±0.55 ^a	24.04±0.40 ^a	38.92±0.45 ^a	30.21±0.71 ^d
		60	39.13±0.53 ^a	23.76±0.50 ^a	38.37±0.56 ^a	31.13±0.73 ^d
commercial dried turmeric			35.83±0.75	15.39±0.32	23.97±0.42	-

หมายเหตุ ค่าของข้อมูลแสดงในรูปของค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน

ตัวอักษรที่เหมือนกันอยู่ในแถวแนวตั้งเดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างกันอย่างมี

นัยสำคัญทางสถิติที่ ($p > 0.05$)

ผลของกำลังอินฟราเรด

จากผลการทดลองตารางที่ 4.27 พบว่า สภาวะการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดแบบไม่ควบคุมอุณหภูมิอากาศภายในห้องอบแห้งให้ค่าความสว่าง (L^*) ค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) และค่าความเป็นสีแดง (a^*) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มกำลังอินฟราเรด โดยที่ค่าความสว่าง (L^*) และค่าความเป็นสีแดง (a^*) มีค่าแตกต่างกันที่กำลังอินฟราเรดต่ำ แต่มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ที่กำลังอินฟราเรดสูง ในขณะที่ค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) มีค่าแตกต่างกันทุก ๆ กำลังอินฟราเรด ในส่วนของสภาวะการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดแบบควบคุมอุณหภูมิอากาศภายในห้องอบแห้งให้ค่าความสว่าง (L^*) ค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) และค่าความเป็นสีแดง (a^*) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มกำลังอินฟราเรดเช่นเดียวกัน และมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ในขณะที่สภาวะการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดให้ค่าความสว่าง (L^*) ค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) และค่าความเป็นสีแดง (a^*) มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มกำลังอินฟราเรดและมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) สำหรับการเปลี่ยนแปลงของสีโดยรวม (ΔE) ของสภาวะการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด พบว่า ค่าการเปลี่ยนแปลงของสีโดยรวม (ΔE) มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มกำลังอินฟราเรดและมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ที่สภาวะการอบแห้งแบบควบคุมอุณหภูมิอากาศภายในห้องอบแห้งและสภาวะการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด

ผลของอุณหภูมิ

จากผลการทดลองตารางที่ 4.27 พบว่า สภาวะการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดแบบควบคุมอุณหภูมิอากาศภายในห้องอบแห้งให้ค่าความสว่าง (L^*) และค่าความเป็นสีแดง (a^*) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิมอบแห้งและมีค่าแตกต่างกัน ในขณะที่ค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันแต่มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ในส่วนของสภาวะการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด พบว่า ค่าความสว่าง (L^*) ค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) และค่าความเป็นสีแดง (a^*) มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนและมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะการอบแห้งด้วยลมร้อน สำหรับการเปลี่ยนแปลงของสีโดยรวม (ΔE) ของสภาวะการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด พบว่า ค่าการเปลี่ยนแปลงของสีโดยรวม (ΔE) มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิมอบแห้งและมีค่าแตกต่างกัน ในขณะที่สภาวะการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดทุกเงื่อนไขการทดลองให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของสีโดยรวม (ΔE) มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) และมีค่าไม่แตกต่างจากสภาวะการอบแห้งด้วยลมร้อนเช่นเดียวกัน

จากผลการวิเคราะห์ค่าสีของขมิ้นชันภายหลังจากอบแห้งด้วยสภาวะการอบแห้งต่าง ๆ สรุปได้ว่า การเปลี่ยนแปลงสีของขมิ้นชันขึ้นอยู่กับสภาวะของการอบแห้ง อุณหภูมิอบแห้ง และระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง อย่างไรก็ตาม ตัวแปรที่สามารถบอกถึงคุณภาพด้านสีของขมิ้นชันได้ชัดเจนที่สุด คือ ค่าความเป็นสีแดงหรือสีเขียว (a^*) และค่าความเป็นสีเหลืองหรือสีน้ำเงิน (b^*) ดังนั้นเมื่อพิจารณาค่าสีดังกล่าวของขมิ้นชันแห้งทางการค้า พบว่า ให้ค่าสีต่ำกว่าขมิ้นชันอบแห้งที่ได้จากสภาวะการอบแห้งต่าง ๆ อย่างไรก็ดี ถ้าพิจารณาสภาวะการอบแห้งที่ทำให้ค่าสีของขมิ้นชันเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าสีจากขมิ้นชันสดได้น้อยที่สุดก็คือ สภาวะการอบแห้งด้วยลมร้อนและสภาวะการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด รองลงมาคือ การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดแบบควบคุมอุณหภูมิอากาศภายในห้องอบแห้ง และการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดแบบไม่ควบคุมอุณหภูมิอากาศภายในห้องอบแห้ง ตามลำดับ

บทที่ 5

อภิปรายและสรุปผล

จากการศึกษาวิจัยของการอบแห้งขมิ้นชันด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด โดยมีสภาวะการอบแห้งต่าง ๆ คือ การอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิเท่ากับ 40 50 และ 60 °C การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดแบบไม่ควบคุมอุณหภูมิอากาศอบแห้งที่กำลังอินฟราเรด 600 800 และ 1,000 W การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดแบบควบคุมอุณหภูมิอากาศอบแห้งที่อุณหภูมิเท่ากับ 40 50 และ 60 °C และการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด 600 800 และ 1,000 W อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 40 50 และ 60 °C โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์และปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้ง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสม เพื่อศึกษาสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น ประสิทธิภาพ เพื่อหาค่าความสัมพันธ์ของพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งขมิ้นชัน และวิเคราะห์หีสของขมิ้นชันภายหลังการอบแห้งที่สภาวะการอบแห้งต่าง ๆ สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1 จลนพลศาสตร์และปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้งขมิ้นชัน

จากการศึกษาผลของกำลังของอินฟราเรดและอุณหภูมิที่มีต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งขมิ้นชัน พบว่า การเพิ่มกำลังของอินฟราเรดและอุณหภูมิจะทำให้อัตราการอบแห้งมีค่าสูงขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบการอบแห้งขมิ้นชันที่สภาวะการอบแห้งต่าง ๆ พบว่า การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดโดยไม่ควบคุมอุณหภูมิอากาศอบแห้งมีอัตราการอบแห้งสูงสุด รองลงมาคือ การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดโดยควบคุมอุณหภูมิอากาศอบแห้ง และการอบแห้งด้วยลมร้อน ตามลำดับ

5.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบเอมพิริคัล

จากผลการทดลองการอบแห้งการอบแห้งขมิ้นชันที่สภาวะการทดลองต่าง ๆ เพื่อเปรียบเทียบหาแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดสำหรับใช้อธิบายพฤติกรรมการอบแห้งชั้นบางขมิ้นชัน ซึ่งแบบจำลองที่อธิบายผลการทดลองได้ดีที่สุดจะต้องพิจารณาจากค่า R^2 ที่สูงสุด ค่า RMSE และ χ^2 ที่ต่ำสุดกว่าแบบจำลองอื่น ๆ โดยที่สภาวะการอบแห้งต่าง ๆ จะให้ผลการวิเคราะห์แบบจำลองที่อธิบายผลการทดลองได้ดีที่สุด ดังต่อไปนี้

การอบแห้งด้วยลมร้อน

จากผลการทดลองการวิเคราะห์หาแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุด พบว่า แบบจำลอง Two Term ให้ผลการทำนายที่ดีที่สุดสำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิเท่ากับ 40 และ 50 °C และที่อุณหภูมิ 60 °C แบบจำลอง Midilli et al. จะให้ผลการทำนายดีที่สุด โดยให้ค่า R^2 มากกว่า ในขณะที่ χ^2 และ RMSE น้อยกว่าแบบจำลองอื่น ๆ

การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด

จากผลการทดลองการวิเคราะห์หาแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุด พบว่า แบบจำลอง Page ให้ผลการทำนายที่ดีที่สุดสำหรับการอบแห้งที่กำลังอินฟราเรด 600 W และกำลังอินฟราเรด 600 และ 800 W พบว่า แบบจำลอง Midilli et al. จะให้ผลการทำนายดีที่สุด โดยให้ค่า R^2 มากกว่า ในขณะที่ χ^2 และ RMSE น้อยกว่าแบบจำลองอื่น ๆ

ในส่วนของการทดลองการอบแห้งด้วยกำลังอินฟราเรด 600 800 และ 1,000 W ที่อุณหภูมิมอบแห้งเท่ากับ 40 50 และ 60 °C พบว่า แบบจำลอง Midilli et al. ให้ผลการทำนายที่ดีที่สุดสำหรับการอบแห้งที่กำลังอินฟราเรด 600 W ที่อุณหภูมิมอบแห้ง 40 50 และ 60 °C ในส่วนของการอบแห้งที่กำลังอินฟราเรด 800 W ที่อุณหภูมิมอบแห้งเท่ากับ 40 50 และ 60 °C พบว่า แบบจำลอง Midilli et al. ให้ผลการทำนายที่ดีที่สุด และในส่วนของการอบแห้งที่กำลังอินฟราเรด 1,000 W ที่อุณหภูมิมอบแห้งเท่ากับ 40 และ 50 °C พบว่า แบบจำลอง Midilli et al. จะให้ผลการทำนายดีที่สุด และที่อุณหภูมิมอบแห้งเท่ากับ 60 °C แบบจำลอง Wang and Singh จะให้ผลการทำนายดีที่สุด โดยให้ค่า R^2 มากกว่า ในขณะที่ χ^2 และ RMSE น้อยกว่าแบบจำลองอื่น ๆ

การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด

จากผลการทดลองการวิเคราะห์หาแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุด พบว่า แบบจำลอง Midilli et al. ให้ผลการทำนายที่ดีที่สุดสำหรับการอบแห้งที่กำลังอินฟราเรด 600 W ที่อุณหภูมิมอบแห้งเท่ากับ 40 50 และ 60 °C ในส่วนของการอบแห้งที่กำลังอินฟราเรด 800 W ที่อุณหภูมิมอบแห้งเท่ากับ 40 และ 50 °C พบว่า แบบจำลอง Midilli et al. จะให้ผลการทำนายดีที่สุด และที่อุณหภูมิมอบแห้ง 60 °C แบบจำลอง Approximation of diffusion จะให้ผลการทำนายดีที่สุด และในส่วนของการอบแห้งที่กำลังอินฟราเรด 1,000 W ที่อุณหภูมิมอบแห้ง 40 °C พบว่า แบบจำลอง Approximation of diffusion จะให้ผลการทำนายดีที่สุดในส่วนของการอบแห้งที่กำลังอินฟราเรด

1,000 W ที่อุณหภูมิอบแห้งเท่ากับ 50 และ 60 °C พบว่า แบบจำลอง Midilli et al. จะให้ผลการทำนายดีที่สุด โดยให้ค่า R^2 มากกว่า ในขณะที่ χ^2 และ RMSE น้อยกว่าแบบจำลองอื่น ๆ

5.3 ผลการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล

จากผลการทดลองการอบแห้งขมิ้นชันด้วยเครื่องอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนที่สภาวะการอบแห้งต่าง ๆ สามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลที่ความชื้นและเวลาในการอบแห้งต่าง ๆ โดยพิจารณาในกรณีการแพร่ความชื้นในวัสดุที่มีรูปทรงเป็นแผ่นระนาบ (infinite slab) พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลขึ้นกับอุณหภูมิสำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อนในรูปแบบความสัมพันธ์เอกซ์โพเนนเชียล สำหรับการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดโดยไม่ควบคุมอุณหภูมิอากาศอบแห้งนั้น ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลจะขึ้นกับอัตราส่วนของน้ำหนักของตัวอย่างต่อกำลังของอินฟราเรด และอยู่ในรูปแบบความสัมพันธ์ในรูปสมการเอกซ์โพเนนเชียล เช่นเดียวกัน

5.4 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งขมิ้นชัน

จากผลการทดลองการวิเคราะห์ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งขมิ้นชันที่สภาวะการทดลองต่าง ๆ พบว่า ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอบแห้งและกำลังของรังสีอินฟราเรด สำหรับการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดเมื่ออุณหภูมิและกำลังอินฟราเรดมีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากใช้ระยะเวลาในการอบแห้งลดลง ในขณะที่การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนนั้นให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มกำลังของอินฟราเรด และเมื่อเปรียบเทียบแต่ละสภาวะการอบแห้ง พบว่า การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งขมิ้นชันน้อยที่สุด รองลงมาคือ การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด และการอบแห้งด้วยลมร้อน ตามลำดับ

5.5 สีของขมิ้นชันภายหลังการอบแห้ง

จากการวิเคราะห์คุณภาพทางด้านสีของขมิ้นชันภายหลังการอบแห้ง พบว่า สภาวะของการอบแห้ง อุณหภูมิอบแห้ง และระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งส่งผลต่อการการเปลี่ยนแปลงสีของขมิ้นชัน โดยที่สภาวะการอบแห้งด้วยลมร้อน และลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดมีค่าการ

เปลี่ยนแปลงของสีโดยรวมน้อยกว่าสภาวะการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดโดยไม่ควบคุมอุณหภูมิอากาศอบแห้งและควบคุมอุณหภูมิอากาศอบแห้ง

สำหรับการเลือกสภาวะเงื่อนไขการทดลองต่าง ๆ ของการอบแห้งขมิ้นชันนั้นขึ้นอยู่กับความต้องการในด้านอัตราการอบแห้งสูงสุดหรือค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้ง หรือต้องการสีของขมิ้นชันภายหลังการอบแห้ง ทั้งนี้ถ้าต้องการอัตราการอบแห้งสูงสุดควรเลือกการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดโดยไม่ควบคุมอุณหภูมิอากาศอบแห้ง หรือถ้าต้องการประหยัดพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งควรเลือกการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดโดยไม่ควบคุมอุณหภูมิอากาศอบแห้งและควบคุมอุณหภูมิอากาศอบแห้ง หรือถ้าต้องการสีของขมิ้นชันภายหลังการอบแห้งควรเลือกการอบแห้งด้วยลมร้อน และลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดทุก ๆ เงื่อนไขการทดลองเนื่องจากแต่ละเงื่อนไขการทดลองมีการเปลี่ยนแปลงค่าสีของขมิ้นชันน้อยกว่าสภาวะการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดเมื่อเปรียบเทียบกับค่าสีของขมิ้นชันสด

5.6 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาปริมาณสารที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพและฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระของขมิ้นชันภายหลังการอบแห้ง
2. ในการทดลองเพื่อให้เปรียบเทียบผลการทดลองได้ดีมากขึ้นควรควบคุมความชื้นเริ่มต้นให้มีค่าใกล้เคียงกัน แต่ความชื้นเริ่มต้นของขมิ้นชันในแต่ละช่วงฤดูกาลมีค่าไม่เท่ากัน
3. ในการทดลองควรใช้ขมิ้นชันที่มีอายุใกล้เคียงกันประมาณ 9-12 เดือน
4. ควรทำการทดลองศึกษาที่ระยะห่างระหว่างแท่งอินฟราเรดกับผิวของวัสดุอบแห้งที่แตกต่างกัน

บรรณานุกรม

- ข้อมูลสมุนไพร คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล. (2553). *ขมิ้นชัน*. เข้าถึงได้จาก http://www.pharmacy.mahidol.ac.th/siri/index.php?page=search_detail&medicinal_id=52
- ชมพู่ ยิ้มโต. (2550). *การถนอมอาหาร*. กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์.
- ช่อผกา เทพรั้งยี. (2553). *การผลิตข้าวขาวเคลือบสารสกัดธรรมชาติจากใบเตยที่อยู่ในสารห่อหุ้ม และทำแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชัน*. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมกระบวนการอาหาร, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ฐานข้อมูลเครื่องยาสมุนไพร คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี. (2554). *ขมิ้นชัน*. เข้าถึงได้จาก <http://www.thaicrudedrug.com/main.php?action=viewpage&pid=34>
- นริศ พัวพันวัฒนะ. (2552). *ผลของความเข้มข้นรังสีอินฟราเรดและเงื่อนไขของอากาศต่อสมการจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งเนื้อลำไย*. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานพลังงาน, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- บทความวิทยาศาสตร์. (2509). *รังสีอินฟราเรดหรือคลื่นรังสีความร้อน*. เข้าถึงได้จาก http://www.neutron.rmutphysics.com/science-news/index.php?option=com_content&task=view&id=1966&Itemid=0
- ประทีป ดุ่มทอง อำไพศักดิ์ ทีบุญมา ประพันธ์พงษ์ สมศिला และชนกร หอมจำปา. (2555). *การศึกษาพฤติกรรมการอบแห้งปลานิลด้วยอากาศร้อน*. *วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร*, 43 (3 พิเศษ), 115-118.
- ภราดร หนูทอง ชีรพงษ์ วุฒิจาม นราวัฒน์ ปันพะสงค์ สีวะ อัจฉริยวิริยะ และอารีย์ อัจฉริยวิริยะ. (2551). *การพัฒนาเครื่องอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนสำหรับใช้ในห้องปฏิบัติการ*. ใน *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 22*, (371-377). เชียงใหม่: ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- เรียวโซ โทเอ. (2525). *อุปกรณ์อบแห้งในอุตสาหกรรม*. โครงการสนับสนุนเทคนิคอุตสาหกรรม สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- วิล รังสาดทอง. (2546). *เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร* (พิมพ์ครั้งที่ 3). กรุงเทพฯ: เท็กซ์ แอนด์ เจอร์นัล พับลิเคชั่น.
- วันเพ็ญ หวานระรื่น ภาณุพงศ์ บุญเพียร และณรงค์ อึ้งกิมบัววน. (2554). *แบบจำลองการอบแห้งพริกไทยด้วยตู้อบลมร้อน*. *วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร*, 42 (3 พิเศษ), 533-536.

- ศรีมา แจ้คำ . (2546). *การอบแห้งผลไม้และสมุนไพรโดยใช้ไมโครเวฟด้วยความร้อนร่วมกับอินฟราเรดไกล*.
 วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน,
 คณะพลังงานและวัสดุ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- สมชาติ โสภณธฤทธิ์. (2540). *การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท* (พิมพ์ครั้งที่ 7).
 กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. (2548). *กรณีขมิ้นชัน*. เข้าถึงได้จาก
http://www.oae.go.th/ewtadmin/ewt/oae_baer/download/article/article_20100819130157.pdf
- สุนทร โม่งปราณีต, Takemi Abe และทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์. (2548). *สภาวะการอบแห้งเนื้อ
 ลำไยที่เหมาะสมด้วยคลื่นอินฟราเรด*. เอกสารหลังการประชุมวิชาการการถ่ายทอดความ
 ร้อนและมวลในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ครั้งที่ 4. เชียงใหม่: ภาควิชา
 วิศวกรรมเครื่องกล, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- Afzal, T.M., & Abe, T. (1998). Diffusion in Potato During Far Infrared Radiation Drying.
Journal of Food Engineering, 37, 353-365.
- Afzal, T.M., Abe, T., & Hikida Y. (1999). Energy and Quality Aspects During Combined FIR-
 Convection Drying of Barley. *Journal of Food Engineering*, 42, 177-182.
- AOAC. (1990). *Official methods of analysis* Arling, VA: Association of Official Analytical
 Chemists.
- Apintanapong, M. (2009). Infrared drying of holy basil leaves and its effect on sensory
 characteristics. *Agricultural Science Journal*, 40 (Suppl. 3), 69-72.
- Doymaz, I. (2015). Infrared drying kinetics and quality characteristics of carrot slices. *Journal of
 Food Processing and Preservation*, 39 (Suppl. 1), 1-8.
- Eetekin, C., & Yaldiz, O. (2004). Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer model.
Journal of Food Engineering, 63, 349-359.
- Hebbar, H.U., Vishwanathan, K.H., & Ramesh, M.N. (2004). Development of combined infrared
 and hot air dryer for vegetables. *Journal of Food Engineering*, 65, 557-563.
- Kanthamoon, W. (2009). Optical property. *Property of Bio Material and Food*.
- Luikov, A. V. (1966). *Heat and Mass Transfer in Capillary Porous Bodies*.
 Oxford: Pergamon Press.

- Madamba, P.S., Driscoll, R.H., & Buckle, K.A. (1996). The thin-layer drying characteristics of garlic slices. *Journal of Food Engineering*, 29, 75-97.
- Mongpraneet, S., Abe, T., & Tsurusaki, T. (2002). Accelerated drying of welsh onion by far infrared radiation under vacuum conditions. *Journal of Food Engineering*, 55, 147-156.
- Nowak, D., & Lewicki, P.P. (2004). Infrared drying of apple slices. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 5, 353-360.
- Nuthong, P., Achariyaviriya, A., Namsanguan, K., & Achariyaviriya, S. (2011). Kinetics and modeling of whole longan with combined infrared and hot air. *Journal of Food Engineering*, 102, 233-239.
- Qilong, S., Yagin, Z., & Ya, Z. (2013). Mathematical modeling on thin-layer heat pump drying of yacon (*Smallanthus sonchifolius*) slices. *Energy Conversion and Management*, 71, 208-216.
- Sharma, G.P., Verma, R.C., & Pathare, P. (2005). Mathematical modeling of infrared radiation thin layer drying of onion slices. *Journal of Food Engineering*, 71, 282-286.
- Toğrul, H. (2005). Simple modeling of infrared drying of fresh apple slices. *Journal of Food Engineering*, 71, 311-323.
- Wanyo, P., Meeso, N., Dondee, S., & Siriamornpun, S. (2009). Feasibility of mulberry tea drying using combination of far-infrared radiation and air convection. *Agricultural Science Journal*, 40 (Suppl. 1), 497-500.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความชื้นจากการทดลองอบแห้งขมิ้นชันที่สภาวะการอบแห้งต่าง ๆ

ตารางภาคผนวก ก.1 ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความชื้นจากการทดลองอบแห้งขมิ้นชันด้วยลมร้อน

Time (min)	40 °C		50 °C		60 °C	
	Mass (g)	M _d %(d.b.)	Mass (g)	M _d %(d.b.)	Mass (g)	M _d %(d.b.)
0	57.87	582.187	55.67	424.453	58.37	432.357
5	56.39	564.740	51.60	386.110	51.31	367.967
10	53.75	533.619	48.07	352.855	46.37	322.913
15	51.74	509.925	44.67	320.825	41.99	282.965
20	49.70	485.877	41.54	291.338	37.51	242.106
25	47.57	460.768	38.47	262.416	33.10	201.885
30	45.42	435.423	35.54	234.813	29.34	167.592
45	41.06	384.026	28.24	166.042	21.15	92.896
60	36.36	328.621	22.73	114.133	17.60	60.519
75	32.47	282.765	18.88	77.864	15.37	40.180
90	28.81	239.620	17.17	61.754	14.53	32.519
105	26.11	207.792	15.97	50.449	13.91	26.865
120	23.59	178.085	15.25	43.666	13.39	22.122
135	21.28	150.854	14.69	38.391	13.03	18.839
150	19.17	125.981	14.32	34.905	12.74	16.194
165	17.42	105.352	14.03	32.173	12.45	13.549
180	16.28	91.913	13.81	30.100	12.22	11.451
195	15.34	80.832	13.52	27.368		
210	14.67	72.934	13.28	25.107		
225	14.20	67.393	13.00	22.470		
240	13.87	63.503	12.80	20.585		
255	13.54	59.613	12.62	18.890		
270	13.23	55.959	12.44	17.194		

ตารางภาคผนวก ก.1 (ต่อ)

Time (min)	40 °C		50 °C		60 °C	
	Mass (g)	M _d %(d.b.)	Mass (g)	M _d %(d.b.)	Mass (g)	M _d %(d.b.)
285	12.94	52.540	12.32	16.064		
300	12.68	49.475	12.23	15.216		
315	12.44	46.646	12.10	13.991		
330	12.19	43.699	12.01	13.143		
345	11.95	40.870	11.89	12.013		
360	11.72	38.159	11.74	10.600		
375	11.51	35.683	11.71	10.317		
390	11.32	33.443	11.68	10.034		
405	11.14	31.321	11.65	9.752		
420	10.99	29.553	11.64	9.657		
435	10.87	28.138	11.62	9.469		
450	10.81	27.431	11.60	9.281		
465	10.74	26.606	11.58	9.092		
480	10.65	25.545	11.59	9.186		
495	10.57	24.602				
510	10.50	23.777				
525	10.47	23.423				
540	10.43	22.952				
555	10.35	22.009				
570	10.30	21.419				
585	10.25	20.830				
600	10.22	20.476				
615	10.17	19.887				

ตารางภาคผนวก ก.1 (ต่อ)

Time (min)	40 °C		50 °C		60 °C	
	Mass (g)	M _d %(d.b.)	Mass (g)	M _d %(d.b.)	Mass (g)	M _d %(d.b.)
630	10.13	19.415				
645	10.07	18.708				
660	10.02	18.118				
675	9.96	17.411				
690	9.90	16.704				
705	9.86	16.232				
720	9.84	15.997				

ตารางภาคผนวก ก.2 ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความชื้นจากการทดลองอบแห้งขมิ้นชันด้วยรังสี
อินฟราเรด

Time (min)	600 W		800 W		1,000 W	
	Mass (g)	M _d %(d.b.)	Mass (g)	M _d %(d.b.)	Mass (g)	M _d %(d.b.)
0	57.42	566.198	55.21	575.693	52.02	529.809
5	43.92	409.568	38.45	370.574	29.73	240.317
10	28.32	228.574	22.49	175.246	15.38	76.054
15	17.89	107.563	13.17	61.182	9.92	13.553
20	12.87	49.320	9.05	10.759	9.12	4.396
25	9.97	15.674	8.58	5.007		
30	9.07	5.232				

ตารางภาคผนวก ก.3 ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความชื้นจากการทดลองอบแห้งขมิ้นชันด้วยรังสีอินฟราเรดที่ 600 W แบบควบคุมอุณหภูมิอบแห้ง

Time (min)	40 °C		50 °C		60 °C	
	Mass (g)	M _d %(d.b.)	Mass (g)	M _d %(d.b.)	Mass (g)	M _d %(d.b.)
0	54.52	535.474	50.85	508.114	47.82	530.239
5	52.61	513.211	44.63	433.729	36.52	381.312
10	50.03	483.139	37.91	353.364	24.98	229.221
15	47.65	455.398	32.02	282.926	16.14	112.715
20	45.24	427.308	26.98	222.653	11.15	46.950
25	42.85	399.451	22.58	170.033	8.94	17.824
30	40.46	371.593	19.41	132.124	8.32	9.653
45	34.48	301.892	12.86	53.792		
60	28.77	235.337	10.65	27.363		
75	24.46	185.101	9.35	11.816		
90	20.44	138.244	9.03	7.989		
105	17.71	106.424				
120	15.63	82.180				
135	14.24	65.978				
150	12.81	49.311				
165	12.14	41.501				
180	11.48	33.808				
195	11.16	30.079				
210	10.79	25.766				
225	10.41	21.337				
240	10.05	17.141				
255	9.85	14.810				

ตารางภาคผนวก ก.3 (ต่อ)

Time (min)	40 °C		50 °C		60 °C	
	Mass (g)	M _d %(d.b.)	Mass (g)	M _d %(d.b.)	Mass (g)	M _d %(d.b.)
270	9.72	13.294				
285	9.61	12.012				
300	9.55	11.313				
315	9.50	10.730				
330	9.45	10.147				
345	9.42	9.798				
360	9.39	9.448				

ตารางภาคผนวก ก.4 ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความชื้นจากการทดลองอบแห้งไขมันชั้นด้วยรังสี
อินฟราเรดที่ 800 W แบบควบคุมอุณหภูมิอบแห้ง

Time (min)	40 °C		50 °C		60 °C	
	Mass (g)	M _d %(d.b.)	Mass (g)	M _d %(d.b.)	Mass (g)	M _d %(d.b.)
0	53.75	535.085	45.05	460.164	58.35	462.412
5	51.55	509.091	38.96	384.439	43.79	322.074
10	49.09	480.025	31.53	292.053	28.77	177.302
15	46.57	450.250	25.49	216.950	18.46	77.928
20	43.79	417.402	20.94	160.374	13.19	27.133
25	41.71	392.826	17.35	115.735	11.60	11.808
30	39.52	366.950	14.45	79.675		
45	33.50	295.821	11.26	40.010		
60	28.28	234.143	9.99	24.218		
75	23.77	180.855	8.78	9.173		
90	19.95	135.720				
105	17.01	100.982				
120	15.72	85.740				
135	14.24	68.253				
150	13.22	56.201				
165	12.29	45.213				
180	11.69	38.124				
195	11.23	32.689				
210	10.81	27.726				
225	10.48	23.827				
240	10.22	20.755				
255	10.00	18.155				

ตารางภาคผนวก ก.4 (ต่อ)

Time (min)	40 °C		50 °C		60 °C	
	Mass (g)	M _d %(d.b.)	Mass (g)	M _d %(d.b.)	Mass (g)	M _d %(d.b.)
270	9.84	16.265				
285	9.73	14.965				
300	9.61	13.547				
315	9.49	12.129				
330	9.42	11.302				

ตารางภาคผนวก ก.5 ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความชื้นจากการทดลองอบแห้งขมิ้นชันด้วยรังสี
อินฟราเรดที่ 1,000 W แบบควบคุมอุณหภูมิอบแห้ง

Time (min)	40 °C		50 °C		60 °C	
	Mass (g)	M _d %(d.b.)	Mass (g)	M _d %(d.b.)	Mass (g)	M _d %(d.b.)
0	57.84	578.218	55.20	531.917	60.63	523.284
5	54.60	540.227	46.13	428.086	41.77	329.401
10	50.60	493.324	36.97	323.224	27.66	184.348
15	46.53	445.600	30.23	246.066	17.63	81.239
20	42.93	403.387	24.20	177.036	11.30	16.165
25	39.66	365.044	19.83	127.009	10.72	10.203
30	36.96	333.384	16.65	90.605		
45	29.08	240.985	11.02	26.154		
60	23.21	172.155	9.77	11.845		
75	18.27	114.230				
90	15.34	79.873				
105	13.49	58.181				
120	12.18	42.820				
135	11.23	31.680				
150	10.62	24.528				
165	10.12	18.665				
180	9.87	15.733				
195	9.63	12.919				
210	9.54	11.864				
225	9.45	10.808				

ตารางภาคผนวก ก.6 ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความชื้นจากการทดลองอบแห้งไขมันชั้นด้วยลมร้อน
ร่วมกับรังสีอินฟราเรดที่ 600 W

Time (min)	40 °C		50 °C		60 °C	
	Mass (g)	M _d %(d.b.)	Mass (g)	M _d %(d.b.)	Mass (g)	M _d %(d.b.)
0	59.67	516.496	53.75	586.882	52.52	628.080
5	50.75	424.337	44.45	468.035	41.02	468.657
10	44.07	355.321	36.75	369.635	31.45	335.989
15	37.92	291.781	29.02	270.852	23.71	228.690
20	32.84	239.295	21.32	172.452	17.45	141.908
25	27.97	188.979	18.71	139.099	14.12	95.744
30	23.81	145.999	15.41	96.927	11.84	64.137
45	17.86	84.525	11.22	43.383	9.96	38.075
60	14.05	45.161	10.05	28.431	7.98	10.626
75	11.85	22.431	8.75	11.818		
90	11.31	16.852				
105	10.98	13.443				
120	10.68	10.343				

ตารางภาคผนวก ก.7 ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความชื้นจากการทดลองอบแห้งขมิ้นชันด้วยลมร้อน
ร่วมกับรังสีอินฟราเรดที่ 800 W

Time (min)	40 °C		50 °C		60 °C	
	Mass (g)	M _d %(d.b.)	Mass (g)	M _d %(d.b.)	Mass (g)	M _d %(d.b.)
0	48.48	548.675	54.55	547.529	54.05	510.534
5	40.75	445.246	43.78	419.685	40.95	362.560
10	33.25	344.894	34.88	314.039	31.45	255.250
15	26.29	251.767	27.42	225.486	24.36	175.164
20	20.96	180.450	22.06	161.860	18.32	106.938
25	16.62	122.380	17.86	112.005	14.57	64.579
30	14.52	94.281	14.63	73.664	12.14	37.130
45	10.71	43.303	11.02	30.811	10.36	17.024
60	8.85	18.415	9.61	14.074	9.26	4.598
75	8.57	14.669	9.05	7.427		
90	8.29	10.922				

ตารางภาคผนวก ก.8 ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความชื้นจากการทดลองอบแห้งขมิ้นชันด้วยลมร้อน
ร่วมกับรังสีอินฟราเรดที่ 1,000 W

Time (min)	40 °C		50 °C		60 °C	
	Mass (g)	M _d %(d.b.)	Mass (g)	M _d %(d.b.)	Mass (g)	M _d %(d.b.)
0	57.26	527.991	52.78	514.819	55.82	606.602
5	45.00	393.531	39.14	355.931	40.05	406.976
10	36.97	305.463	29.06	238.512	29.58	274.441
15	29.94	228.363	21.99	156.155	20.76	162.792
20	23.29	155.430	16.27	89.525	14.71	86.208
25	19.05	108.928	12.51	45.725	11.21	41.903
30	15.85	73.833	10.09	17.536	8.52	7.851
45	11.81	29.525	9.06	5.537		
60	9.93	8.906				

ภาคผนวก ข

ข้อมูลของอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลองและ
จากแบบจำลองการอบแห้งชั้นบางขมึนชั้นที่สภาวะการอบแห้งต่าง ๆ

ตารางภาคผนวก ข.1 ข้อมูลอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางขมึนชั้นด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 40 °C

Time (min)	MR (experiment)	MR (predicted)									
		Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6	Model 7	Model 8	Model 9	Model 10
0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0203	1.0000	1.0224	1.0000	1.0000	1.0000	1.0169
5	0.9700	0.9539	0.9441	0.9540	0.9636	0.9539	0.9700	0.9490	0.9773	0.9507	0.9653
10	0.9166	0.9100	0.8957	0.9100	0.9117	0.9100	0.9155	0.9056	0.9548	0.9040	0.9172
15	0.8759	0.8681	0.8513	0.8681	0.8733	0.8681	0.8736	0.8642	0.9326	0.8596	0.8717
20	0.8346	0.8281	0.8100	0.8281	0.8294	0.8281	0.8324	0.8247	0.9106	0.8175	0.8287
25	0.7914	0.7900	0.7713	0.7900	0.7878	0.7900	0.7872	0.7870	0.8888	0.7775	0.7880
30	0.7479	0.7536	0.7349	0.7536	0.7483	0.7536	0.7474	0.7510	0.8673	0.7396	0.7494
45	0.6596	0.6542	0.6375	0.6542	0.6420	0.6542	0.6504	0.6526	0.8042	0.6371	0.6451
60	0.5645	0.5679	0.5547	0.5679	0.5515	0.5679	0.5496	0.5670	0.7433	0.5495	0.5559
75	0.4857	0.4929	0.4838	0.4929	0.4745	0.4929	0.4727	0.4927	0.6846	0.4746	0.4796
90	0.4116	0.4279	0.4226	0.4279	0.4090	0.4279	0.4074	0.4282	0.6281	0.4106	0.4142
105	0.3569	0.3715	0.3697	0.3715	0.3533	0.3715	0.3520	0.3721	0.5737	0.3560	0.3581
120	0.3059	0.3225	0.3238	0.3225	0.3059	0.3225	0.3049	0.3233	0.5216	0.3092	0.3101

ตารางภาคผนวก ข.1 (ต่อ)

Time (min)	MR (experiment)	MR (predicted)									
		Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6	Model 7	Model 8	Model 9	Model 10
135	0.2591	0.2799	0.2839	0.2799	0.2656	0.2799	0.2650	0.2809	0.4716	0.2693	0.2689
150	0.2164	0.2430	0.2492	0.2430	0.2313	0.2430	0.2312	0.2441	0.4238	0.2352	0.2336
165	0.1810	0.2109	0.2189	0.2109	0.2021	0.2109	0.2024	0.2121	0.3781	0.2061	0.2034
180	0.1579	0.1831	0.1924	0.1831	0.1773	0.1831	0.1779	0.1843	0.3347	0.1811	0.1775
195	0.1388	0.1590	0.1693	0.1589	0.1561	0.1590	0.1572	0.1602	0.2934	0.1598	0.1553
210	0.1253	0.1380	0.1490	0.1380	0.1382	0.1380	0.1395	0.1392	0.2544	0.1416	0.1364
225	0.1158	0.1198	0.1312	0.1198	0.1229	0.1198	0.1245	0.1209	0.2175	0.1261	0.1202
240	0.1091	0.1040	0.1156	0.1040	0.1099	0.1040	0.1117	0.1051	0.1827	0.1128	0.1063
255	0.1024	0.0903	0.1019	0.0903	0.0988	0.0903	0.1008	0.0913	0.1502	0.1014	0.0945
270	0.0961	0.0784	0.0899	0.0783	0.0894	0.0784	0.0915	0.0794	0.1198	0.0917	0.0845
285	0.0902	0.0680	0.0793	0.0680	0.0814	0.0680	0.0836	0.0690	0.0917	0.0834	0.0760
300	0.0850	0.0590	0.0700	0.0590	0.0746	0.0590	0.0768	0.0599	0.0657	0.0763	0.0688
315	0.0801	0.0513	0.0619	0.0513	0.0688	0.0513	0.0710	0.0521	0.0419	0.0702	0.0627

ตารางภาคผนวก ข.1 (ต่อ)

Time (min)	MR (experiment)	MR (predicted)									
		Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6	Model 7	Model 8	Model 9	Model 10
330	0.0751	0.0445	0.0546	0.0445	0.0638	0.0445	0.0660	0.0452	0.0202	0.0650	0.0575
345	0.0702	0.0386	0.0483	0.0386	0.0596	0.0386	0.0618	0.0393	0.0008	0.0605	0.0532
360	0.0655	0.0335	0.0427	0.0335	0.0561	0.0335	0.0581	0.0342	-0.0165	0.0567	0.0497
375	0.0613	0.0291	0.0378	0.0291	0.0530	0.0291	0.0550	0.0297	-0.0316	0.0534	0.0467
390	0.0574	0.0253	0.0334	0.0253	0.0504	0.0253	0.0522	0.0258	-0.0445	0.0506	0.0443
405	0.0538	0.0219	0.0296	0.0219	0.0482	0.0219	0.0499	0.0224	-0.0552	0.0482	0.0423
420	0.0508	0.0190	0.0262	0.0190	0.0464	0.0190	0.0478	0.0195	-0.0638	0.0462	0.0407
435	0.0483	0.0165	0.0232	0.0165	0.0448	0.0165	0.0460	0.0169	-0.0701	0.0444	0.0395
450	0.0471	0.0143	0.0205	0.0143	0.0434	0.0143	0.0445	0.0147	-0.0743	0.0429	0.0385
465	0.0457	0.0125	0.0182	0.0125	0.0423	0.0125	0.0431	0.0128	-0.0763	0.0416	0.0378
480	0.0439	0.0108	0.0161	0.0108	0.0413	0.0108	0.0419	0.0111	-0.0761	0.0405	0.0374
495	0.0423	0.0094	0.0143	0.0094	0.0405	0.0094	0.0408	0.0097	-0.0738	0.0395	0.0371

ตารางภาคผนวก ข.1 (ต่อ)

Time (min)	MR (experiment)	MR (predicted)									
		Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6	Model 7	Model 8	Model 9	Model 10
510	0.0408	0.0081	0.0127	0.0081	0.0398	0.0081	0.0398	0.0084	-0.0692	0.0387	0.0370
525	0.0402	0.0071	0.0112	0.0071	0.0392	0.0071	0.0390	0.0073	-0.0625	0.0380	0.0370
540	0.0394	0.0061	0.0100	0.0061	0.0386	0.0061	0.0382	0.0063	-0.0536	0.0374	0.0371
555	0.0378	0.0053	0.0088	0.0053	0.0382	0.0053	0.0375	0.0055	-0.0425	0.0369	0.0374
570	0.0368	0.0046	0.0078	0.0046	0.0378	0.0046	0.0368	0.0048	-0.0292	0.0364	0.0377
585	0.0358	0.0040	0.0070	0.0040	0.0375	0.0040	0.0362	0.0042	-0.0138	0.0360	0.0381
600	0.0352	0.0035	0.0062	0.0035	0.0372	0.0035	0.0357	0.0036	0.0039	0.0356	0.0386
615	0.0342	0.0030	0.0055	0.0030	0.0370	0.0030	0.0352	0.0031	0.0237	0.0353	0.0391
630	0.0333	0.0026	0.0049	0.0026	0.0368	0.0026	0.0347	0.0027	0.0457	0.0351	0.0397
645	0.0321	0.0023	0.0043	0.0023	0.0367	0.0023	0.0343	0.0024	0.0698	0.0348	0.0403
660	0.0311	0.0020	0.0038	0.0020	0.0365	0.0020	0.0338	0.0021	0.0962	0.0346	0.0410
675	0.0299	0.0017	0.0034	0.0017	0.0364	0.0017	0.0334	0.0018	0.1247	0.0344	0.0417
690	0.0287	0.0015	0.0030	0.0015	0.0363	0.0015	0.0331	0.0016	0.1555	0.0343	0.0424

ตารางภาคผนวก ข.1 (ต่อ)

Time (min)	MR (experiment)	MR (predicted)									
		Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6	Model 7	Model 8	Model 9	Model 10
705	0.0279	0.0013	0.0027	0.0013	0.0362	0.0013	0.0327	0.0014	0.1884	0.0341	0.0431
720	0.0275	0.0011	0.0024	0.0011	0.0361	0.0011	0.0323	0.0012	0.2234	0.0340	0.0439

ตารางภาคผนวก ข.2 ข้อมูลอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางขมึนชั้นด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 °C

Time (min)	MR (experiment)	MR (predicted)									
		Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6	Model 7	Model 8	Model 9	Model 10
0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0035	1.0221	1.0000	1.0277	1.0000	1.0000	1.0000	1.0157
5	0.9097	0.9060	0.8963	0.9088	0.9179	0.9060	0.9201	0.9027	0.9638	0.9103	0.9138
10	0.8313	0.8209	0.8091	0.8230	0.8247	0.8209	0.8244	0.8184	0.9283	0.8245	0.8235
15	0.7559	0.7438	0.7322	0.7453	0.7413	0.7438	0.7393	0.7420	0.8933	0.7464	0.7425
20	0.6864	0.6739	0.6636	0.6749	0.6667	0.6739	0.6635	0.6728	0.8590	0.6757	0.6699
25	0.6182	0.6106	0.6021	0.6112	0.5999	0.6106	0.5960	0.6100	0.8252	0.6117	0.6046
30	0.5532	0.5532	0.5469	0.5535	0.5402	0.5532	0.5360	0.5531	0.7920	0.5537	0.5459
45	0.3912	0.4115	0.4114	0.4111	0.3962	0.4115	0.3926	0.4122	0.6961	0.4108	0.4028
60	0.2689	0.3061	0.3109	0.3053	0.2930	0.3061	0.2913	0.3072	0.6055	0.3048	0.2983
75	0.1834	0.2277	0.2357	0.2267	0.2190	0.2277	0.2196	0.2290	0.5202	0.2261	0.2220
90	0.1455	0.1693	0.1792	0.1684	0.1661	0.1693	0.1687	0.1707	0.4404	0.1677	0.1663
105	0.1189	0.1259	0.1365	0.1251	0.1282	0.1259	0.1325	0.1272	0.3658	0.1244	0.1257
120	0.1029	0.0937	0.1042	0.0929	0.1010	0.0937	0.1067	0.0948	0.2967	0.0923	0.0962

ตารางภาคผนวก ข.2 (ต่อ)

Time (min)	MR (experiment)	MR (predicted)									
		Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6	Model 7	Model 8	Model 9	Model 10
135	0.0904	0.0697	0.0796	0.0690	0.0815	0.0697	0.0880	0.0707	0.2329	0.0685	0.0748
150	0.0822	0.0518	0.0610	0.0512	0.0676	0.0518	0.0746	0.0527	0.1745	0.0508	0.0593
165	0.0758	0.0385	0.0467	0.0380	0.0576	0.0385	0.0647	0.0393	0.1214	0.0377	0.0483
180	0.0709	0.0287	0.0358	0.0283	0.0504	0.0287	0.0574	0.0293	0.0737	0.0280	0.0405
195	0.0645	0.0213	0.0275	0.0210	0.0453	0.0213	0.0518	0.0218	0.0313	0.0207	0.0350
210	0.0592	0.0159	0.0212	0.0156	0.0417	0.0159	0.0476	0.0163	-0.0057	0.0154	0.0313
225	0.0529	0.0118	0.0163	0.0116	0.0390	0.0118	0.0443	0.0121	-0.0373	0.0114	0.0289
240	0.0485	0.0088	0.0125	0.0086	0.0371	0.0088	0.0416	0.0090	-0.0636	0.0085	0.0275
255	0.0445	0.0065	0.0097	0.0064	0.0358	0.0065	0.0394	0.0067	-0.0845	0.0063	0.0268
270	0.0405	0.0049	0.0075	0.0047	0.0348	0.0049	0.0376	0.0050	-0.1000	0.0047	0.0266
285	0.0378	0.0036	0.0058	0.0035	0.0341	0.0036	0.0360	0.0037	-0.1102	0.0035	0.0267
300	0.0358	0.0027	0.0044	0.0026	0.0336	0.0027	0.0345	0.0028	-0.1151	0.0026	0.0272
315	0.0330	0.0020	0.0034	0.0019	0.0333	0.0020	0.0332	0.0021	-0.1145	0.0019	0.0278

ตารางภาคผนวก ข.2 (ต่อ)

Time (min)	MR (experiment)	MR (predicted)									
		Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6	Model 7	Model 8	Model 9	Model 10
330	0.0310	0.0015	0.0027	0.0014	0.0330	0.0015	0.0320	0.0015	-0.1087	0.0014	0.0286
345	0.0283	0.0011	0.0021	0.0011	0.0328	0.0011	0.0309	0.0012	-0.0974	0.0010	0.0296
360	0.0250	0.0008	0.0016	0.0008	0.0327	0.0008	0.0299	0.0009	-0.0808	0.0008	0.0306
375	0.0243	0.0006	0.0012	0.0006	0.0326	0.0006	0.0289	0.0006	-0.0588	0.0006	0.0316
390	0.0236	0.0005	0.0010	0.0004	0.0326	0.0005	0.0280	0.0005	-0.0315	0.0004	0.0327
405	0.0230	0.0003	0.0007	0.0003	0.0325	0.0003	0.0271	0.0004	0.0012	0.0003	0.0339
420	0.0228	0.0003	0.0006	0.0002	0.0325	0.0003	0.0263	0.0003	0.0392	0.0002	0.0351
435	0.0223	0.0002	0.0004	0.0002	0.0324	0.0002	0.0254	0.0002	0.0826	0.0002	0.0363
450	0.0219	0.0001	0.0003	0.0001	0.0324	0.0001	0.0246	0.0001	0.1314	0.0001	0.0375
465	0.0214	0.0001	0.0003	0.0001	0.0324	0.0001	0.0239	0.0001	0.1855	0.0001	0.0387
480	0.0216	0.0001	0.0002	0.0001	0.0324	0.0001	0.0231	0.0001	0.2450	0.0001	0.0399

ตารางภาคผนวก ข.3 ข้อมูลอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางขมึนชั้นด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 °C

Time (min)	MR (experiment)	MR (predicted)									
		Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6	Model 7	Model 8	Model 9	Model 10
0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0051	1.0151	1.0000	1.0127	1.0000	1.0000	1.0000	0.9931
5	0.8511	0.8583	0.8602	0.8618	0.8644	0.8583	0.8642	0.8553	0.9133	0.8657	0.8701
10	0.7469	0.7367	0.7387	0.7389	0.7366	0.7367	0.7376	0.7348	0.8303	0.7444	0.7493
15	0.6545	0.6324	0.6340	0.6336	0.6282	0.6324	0.6298	0.6313	0.7509	0.6379	0.6408
20	0.5600	0.5428	0.5438	0.5432	0.5363	0.5428	0.5381	0.5424	0.6752	0.5457	0.5456
25	0.4669	0.4659	0.4663	0.4658	0.4584	0.4659	0.4600	0.4660	0.6031	0.4664	0.4632
30	0.3876	0.3999	0.3998	0.3994	0.3924	0.3999	0.3935	0.4003	0.5347	0.3985	0.3925
45	0.2149	0.2529	0.2516	0.2517	0.2486	0.2529	0.2478	0.2539	0.3513	0.2483	0.2377
60	0.1400	0.1599	0.1582	0.1587	0.1609	0.1599	0.1583	0.1610	0.2008	0.1547	0.1455
75	0.0929	0.1011	0.0993	0.1000	0.1074	0.1011	0.1037	0.1021	0.0832	0.0964	0.0924
90	0.0752	0.0639	0.0623	0.0631	0.0748	0.0639	0.0708	0.0647	-0.0016	0.0600	0.0629
105	0.0621	0.0404	0.0391	0.0397	0.0550	0.0404	0.0513	0.0410	-0.0536	0.0374	0.0474
120	0.0512	0.0256	0.0245	0.0251	0.0428	0.0256	0.0404	0.0260	-0.0727	0.0233	0.0400

ตารางภาคผนวก ข.3 (ต่อ)

Time (min)	MR (experiment)	MR (predicted)									
		Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6	Model 7	Model 8	Model 9	Model 10
135	0.0436	0.0162	0.0153	0.0158	0.0355	0.0162	0.0349	0.0165	-0.0589	0.0145	0.0373
150	0.0375	0.0102	0.0096	0.0100	0.0310	0.0102	0.0329	0.0105	-0.0123	0.0090	0.0373
165	0.0313	0.0065	0.0060	0.0063	0.0282	0.0065	0.0333	0.0066	0.0672	0.0056	0.0388
180	0.0265	0.0041	0.0038	0.0040	0.0265	0.0041	0.0354	0.0042	0.1795	0.0035	0.0411

หมายเหตุ

Model 1* Newton model

Model 2* Page model

Model 3* Henderson and Pabis model

Model 4* Logarithmic model

Model 5* Modified Page model

Model 6* Two term model,

Model 7* Two term exponential model

Model 8* Wang and Singh model

Model 9* Approximation and diffusion model

Model 10* Midilli et al. model

ตารางภาคผนวก ข.4 ข้อมูลอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางขมึนชั้นด้วยกำลังอินฟราเรด 600 W

Time (min)	MR (experiment)	MR (predicted)									
		Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6	Model 7	Model 8	Model 9	Model 10
0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0484	1.0283	1.0000	1.0484	1.0000	1.0000	1.0000	1.0005
5	0.7230	0.6106	0.7219	0.6275	0.6585	0.6106	0.6275	0.7295	0.6748	0.7280	0.7225
10	0.4037	0.3729	0.4044	0.3756	0.4051	0.3729	0.3756	0.3909	0.4138	0.3954	0.4048
15	0.1900	0.2277	0.1929	0.2248	0.2315	0.2277	0.2248	0.1912	0.2171	0.1914	0.1930
20	0.0871	0.1390	0.0809	0.1346	0.1124	0.1390	0.1346	0.0904	0.0845	0.0872	0.0797
25	0.0277	0.0849	0.0304	0.0806	0.0309	0.0849	0.0806	0.0421	0.0161	0.0383	0.0300
30	0.0092	0.0518	0.0103	0.0482	-0.0251	0.0518	0.0482	0.0195	0.0119	0.0164	0.0099

ตารางภาคผนวก ข.5 ข้อมูลอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางขมึนชั้นด้วยกำลังอินฟราเรด 800 W

Time (min)	MR (experiment)	MR (predicted)									
		Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6	Model 7	Model 8	Model 9	Model 10
0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0352	1.0184	1.0000	1.0352	1.0000	1.0000	1.0000	0.9990
5	0.6441	0.5448	0.6494	0.5544	0.5912	0.5448	0.5544	0.6476	0.6123	0.6480	0.6443
10	0.3038	0.2968	0.2983	0.2969	0.3199	0.2968	0.2969	0.2879	0.3189	0.2916	0.3051
15	0.1063	0.1617	0.1097	0.1590	0.1476	0.1617	0.1590	0.1168	0.1198	0.1146	0.1083
20	0.0191	0.0881	0.0337	0.0852	0.0382	0.0881	0.0852	0.0460	0.0149	0.0419	0.0207
25	0.0087	0.0480	0.0089	0.0456	-0.0313	0.0480	0.0456	0.0179	0.0043	0.0147	0.0091

ตารางภาคผนวก ข.6 ข้อมูลอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางไขมันชั้นด้วยกำลังอินฟราเรด 1,000 W

Time (min)	MR (experiment)	MR (predicted)									
		Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6	Model 7	Model 8	Model 9	Model 10
0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0112	1.0054	1.0000	1.0112	1.0000	1.0000	1.0000	0.9998
5	0.4536	0.4065	0.4555	0.4080	0.4298	0.4065	0.4080	0.4061	0.4801	0.4334	0.4551
10	0.1445	0.1652	0.1353	0.1646	0.1638	0.1652	0.1646	0.1655	0.1439	0.1603	0.1467
15	0.0257	0.0672	0.0317	0.0664	0.0409	0.0672	0.0664	0.0675	-0.0087	0.0365	0.0306
20	0.0083	0.0273	0.0062	0.0268	-0.0159	0.0273	0.0268	0.0275	0.0223	-0.0139	0.0027

หมายเหตุ

Model 1* Newton model

Model 2* Page model

Model 3* Henderson and Pabis model

Model 4* Logarithmic model

Model 5* Modified Page model

Model 6* Two term model,

Model 7* Two term exponential model

Model 8* Wang and Singh model

Model 9* Approximation and diffusion model

Model 10* Midilli et al. model

ตารางภาคผนวก ข.7 ข้อมูลอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางขมึนชั้นด้วยกำลังอินฟราเรด 600 W ที่อุณหภูมิ 40 °C

Time (min)	MR (experiment)	MR (predicted)									
		Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6	Model 7	Model 8	Model 9	Model 10
0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0453	1.0458	1.0000	1.0453	1.0000	1.0000	1.0000	1.0005
5	0.9584	0.9323	0.9534	0.9708	0.9711	0.9323	0.9708	0.9305	0.9580	0.9564	0.9573
10	0.9023	0.8692	0.9000	0.9015	0.9016	0.8692	0.9015	0.8677	0.9169	0.9063	0.9052
15	0.8505	0.8104	0.8458	0.8372	0.8372	0.8104	0.8372	0.8091	0.8766	0.8531	0.8513
20	0.7980	0.7556	0.7924	0.7775	0.7774	0.7556	0.7775	0.7544	0.8371	0.7989	0.7976
25	0.7460	0.7044	0.7406	0.7220	0.7218	0.7044	0.7220	0.7035	0.7985	0.7454	0.7451
30	0.6940	0.6568	0.6909	0.6705	0.6702	0.6568	0.6705	0.6560	0.7608	0.6934	0.6943
45	0.5638	0.5323	0.5556	0.5370	0.5366	0.5323	0.5370	0.5319	0.6527	0.5522	0.5554
60	0.4395	0.4314	0.4421	0.4301	0.4297	0.4314	0.4301	0.4312	0.5522	0.4356	0.4386
75	0.3457	0.3496	0.3488	0.3445	0.3441	0.3496	0.3445	0.3496	0.4594	0.3422	0.3431
90	0.2582	0.2833	0.2733	0.2759	0.2756	0.2833	0.2759	0.2835	0.3743	0.2683	0.2665
105	0.1987	0.2296	0.2128	0.2210	0.2208	0.2296	0.2210	0.2298	0.2968	0.2101	0.2061
120	0.1535	0.1861	0.1649	0.1770	0.1769	0.1861	0.1770	0.1864	0.2270	0.1645	0.1591

ตารางภาคผนวก ข.7 (ต่อ)

Time (min)	MR (experiment)	MR (predicted)									
		Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6	Model 7	Model 8	Model 9	Model 10
135	0.1232	0.1508	0.1272	0.1417	0.1418	0.1508	0.1417	0.1511	0.1648	0.1288	0.1228
150	0.0921	0.1222	0.0977	0.1135	0.1137	0.1222	0.1135	0.1225	0.1103	0.1008	0.0952
165	0.0775	0.0990	0.0748	0.0909	0.0912	0.0990	0.0909	0.0993	0.0635	0.0789	0.0744
180	0.0631	0.0803	0.0570	0.0728	0.0732	0.0803	0.0728	0.0805	0.0243	0.0617	0.0588
195	0.0562	0.0650	0.0434	0.0583	0.0588	0.0650	0.0583	0.0653	-0.0073	0.0483	0.0473
210	0.0481	0.0527	0.0329	0.0467	0.0473	0.0527	0.0467	0.0529	-0.0311	0.0378	0.0390
225	0.0398	0.0427	0.0248	0.0374	0.0381	0.0427	0.0374	0.0429	-0.0474	0.0296	0.0330
240	0.0320	0.0346	0.0187	0.0300	0.0307	0.0346	0.0300	0.0348	-0.0559	0.0232	0.0287
255	0.0277	0.0281	0.0141	0.0240	0.0248	0.0281	0.0240	0.0282	-0.0568	0.0181	0.0259
270	0.0248	0.0227	0.0105	0.0192	0.0201	0.0227	0.0192	0.0229	-0.0501	0.0142	0.0240
285	0.0224	0.0184	0.0079	0.0154	0.0163	0.0184	0.0154	0.0186	-0.0357	0.0111	0.0229
300	0.0211	0.0149	0.0059	0.0123	0.0133	0.0149	0.0123	0.0150	-0.0136	0.0087	0.0223
315	0.0200	0.0121	0.0044	0.0099	0.0109	0.0121	0.0099	0.0122	0.0161	0.0068	0.0222

ตารางภาคผนวก ข.7 (ต่อ)

Time (min)	MR (experiment)	MR (predicted)									
		Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6	Model 7	Model 8	Model 9	Model 10
330	0.0190	0.0098	0.0033	0.0079	0.0089	0.0098	0.0079	0.0099	0.0535	0.0053	0.0223
345	0.0183	0.0079	0.0024	0.0063	0.0074	0.0079	0.0063	0.0080	0.0985	0.0042	0.0227
360	0.0176	0.0064	0.0018	0.0051	0.0061	0.0064	0.0051	0.0065	0.1512	0.0033	0.0232

ตารางภาคผนวก ข.8 ข้อมูลอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางขมึนชั้นด้วยกำลังอินฟราเรด 600 W ที่อุณหภูมิ 50 °C

Time (min)	MR (experiment)	MR (predicted)									
		Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6	Model 7	Model 8	Model 9	Model 10
0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0382	1.0304	1.0000	1.0381	1.0000	1.0000	1.0000	0.9989
5	0.8536	0.8090	0.8529	0.8319	0.8325	0.8090	0.8319	0.8076	0.8530	0.8535	0.8552
10	0.6954	0.6546	0.6953	0.6667	0.6714	0.6546	0.6666	0.6540	0.7172	0.6977	0.6972
15	0.5568	0.5296	0.5548	0.5342	0.5405	0.5296	0.5342	0.5296	0.5928	0.5555	0.5553
20	0.4382	0.4284	0.4360	0.4281	0.4339	0.4284	0.4281	0.4289	0.4795	0.4349	0.4351
25	0.3346	0.3466	0.3386	0.3430	0.3472	0.3466	0.3430	0.3473	0.3776	0.3366	0.3367
30	0.2600	0.2804	0.2604	0.2749	0.2767	0.2804	0.2749	0.2812	0.2869	0.2585	0.2580
45	0.1059	0.1485	0.1129	0.1414	0.1347	0.1485	0.1415	0.1494	0.0824	0.1140	0.1121
60	0.0539	0.0786	0.0463	0.0728	0.0582	0.0786	0.0728	0.0793	-0.0208	0.0493	0.0489
75	0.0233	0.0417	0.0182	0.0375	0.0171	0.0417	0.0375	0.0421	-0.0226	0.0212	0.0242
90	0.0157	0.0221	0.0069	0.0193	-0.0051	0.0221	0.0193	0.0224	0.0770	0.0091	0.0158

ตารางภาคผนวก ข.9 ข้อมูลอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางไขมันชั้นด้วยกำลังอินฟราเรด 600 W ที่อุณหภูมิ 60 °C

Time (min)	MR (experiment)	MR (predicted)									
		Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6	Model 7	Model 8	Model 9	Model 10
0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0534	1.0315	1.0000	1.0534	1.0000	1.0000	1.0000	0.9995
5	0.7445	0.6251	0.7450	0.6447	0.6769	0.6251	0.6447	0.7522	0.6748	0.7507	0.7459
10	0.4323	0.3908	0.4316	0.3945	0.4270	0.3908	0.3945	0.4157	0.4138	0.4213	0.4312
15	0.2126	0.2443	0.2119	0.2414	0.2508	0.2443	0.2414	0.2096	0.2171	0.2100	0.2111
20	0.0893	0.1527	0.0909	0.1478	0.1266	0.1527	0.1478	0.1020	0.0845	0.0981	0.0913
25	0.0344	0.0955	0.0347	0.0904	0.0391	0.0955	0.0904	0.0489	0.0161	0.0440	0.0369
30	0.0182	0.0597	0.0119	0.0553	-0.0226	0.0597	0.0553	0.0233	0.0119	0.0192	0.0157

ตารางภาคผนวก ข.10 ข้อมูลอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางขมื่นชั้นด้วยกำลังอินฟราเรด 800 W ที่อุณหภูมิ 40 °C

Time (min)	MR (experiment)	MR (predicted)									
		Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6	Model 7	Model 8	Model 9	Model 10
0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0342	1.0369	1.0000	1.0340	1.0000	1.0000	1.0000	1.0004
5	0.9514	0.9319	0.9470	0.9608	0.9624	0.9319	0.9607	0.9295	0.9559	0.9520	0.9522
10	0.8971	0.8684	0.8901	0.8926	0.8933	0.8684	0.8926	0.8663	0.9127	0.8981	0.8969
15	0.8415	0.8092	0.8339	0.8292	0.8291	0.8092	0.8294	0.8074	0.8705	0.8421	0.8410
20	0.7801	0.7540	0.7795	0.7704	0.7696	0.7540	0.7706	0.7525	0.8292	0.7863	0.7861
25	0.7341	0.7027	0.7275	0.7157	0.7144	0.7027	0.7160	0.7013	0.7889	0.7320	0.7330
30	0.6858	0.6548	0.6780	0.6649	0.6632	0.6548	0.6652	0.6536	0.7496	0.6801	0.6821
45	0.5528	0.5298	0.5455	0.5331	0.5308	0.5298	0.5336	0.5291	0.6373	0.5418	0.5448
60	0.4376	0.4287	0.4356	0.4275	0.4250	0.4287	0.4280	0.4284	0.5337	0.4297	0.4309
75	0.3380	0.3469	0.3460	0.3428	0.3406	0.3469	0.3433	0.3468	0.4387	0.3401	0.3385
90	0.2536	0.2807	0.2736	0.2748	0.2732	0.2807	0.2753	0.2807	0.3523	0.2691	0.2649
105	0.1887	0.2272	0.2155	0.2204	0.2194	0.2272	0.2208	0.2273	0.2745	0.2129	0.2068
120	0.1602	0.1838	0.1691	0.1767	0.1764	0.1838	0.1771	0.1840	0.2054	0.1684	0.1616

ตารางภาคผนวก ข.10 (ต่อ)

Time (min)	MR (experiment)	MR (predicted)									
		Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6	Model 7	Model 8	Model 9	Model 10
135	0.1276	0.1487	0.1324	0.1417	0.1421	0.1487	0.1421	0.1489	0.1448	0.1332	0.1267
150	0.1050	0.1204	0.1033	0.1136	0.1147	0.1204	0.1140	0.1206	0.0930	0.1054	0.1000
165	0.0845	0.0974	0.0805	0.0911	0.0928	0.0974	0.0914	0.0976	0.0497	0.0833	0.0797
180	0.0712	0.0788	0.0625	0.0730	0.0754	0.0788	0.0733	0.0790	0.0150	0.0659	0.0645
195	0.0611	0.0638	0.0485	0.0586	0.0615	0.0638	0.0588	0.0640	-0.0110	0.0521	0.0533
210	0.0518	0.0516	0.0375	0.0470	0.0503	0.0516	0.0472	0.0518	-0.0284	0.0412	0.0450
225	0.0445	0.0418	0.0290	0.0376	0.0414	0.0418	0.0378	0.0419	-0.0371	0.0326	0.0391
240	0.0388	0.0338	0.0224	0.0302	0.0344	0.0338	0.0303	0.0339	-0.0373	0.0258	0.0350
255	0.0339	0.0273	0.0172	0.0242	0.0287	0.0273	0.0243	0.0275	-0.0288	0.0204	0.0322
270	0.0304	0.0221	0.0132	0.0194	0.0242	0.0221	0.0195	0.0222	-0.0117	0.0161	0.0304
285	0.0280	0.0179	0.0102	0.0156	0.0206	0.0179	0.0157	0.0180	0.0141	0.0128	0.0293
300	0.0253	0.0145	0.0078	0.0125	0.0177	0.0145	0.0126	0.0146	0.0485	0.0101	0.0289
315	0.0227	0.0117	0.0060	0.0100	0.0154	0.0117	0.0101	0.0118	0.0914	0.0080	0.0289

ตารางภาคผนวก ข.10 (ต่อ)

Time (min)	MR (experiment)	MR (predicted)									
		Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6	Model 7	Model 8	Model 9	Model 10
330	0.0211	0.0095	0.0046	0.0080	0.0136	0.0095	0.0081	0.0096	0.1431	0.0063	0.0292

ตารางภาคผนวก ข.11 ข้อมูลอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางขมมันชั้นด้วยกำลังอินฟราเรด 800 W ที่อุณหภูมิ 50 °C

Time (min)	MR (experiment)	MR (predicted)									
		Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6	Model 7	Model 8	Model 9	Model 10
0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0375	1.0353	1.0000	1.0375	1.0000	1.0000	1.0000	1.0042
5	0.8354	0.7731	0.8170	0.7934	0.7941	0.7731	0.7934	0.7718	0.8241	0.8364	0.8263
10	0.6347	0.5977	0.6322	0.6067	0.6086	0.5977	0.6067	0.5972	0.6646	0.6317	0.6364
15	0.4715	0.4621	0.4770	0.4640	0.4659	0.4621	0.4640	0.4621	0.5216	0.4689	0.4753
20	0.3485	0.3573	0.3536	0.3548	0.3562	0.3573	0.3548	0.3576	0.3950	0.3469	0.3481
25	0.2515	0.2762	0.2584	0.2713	0.2718	0.2762	0.2713	0.2767	0.2848	0.2565	0.2518
30	0.1731	0.2135	0.1867	0.2075	0.2069	0.2135	0.2075	0.2141	0.1910	0.1897	0.1813
45	0.0869	0.0987	0.0665	0.0928	0.0890	0.0987	0.0928	0.0992	0.0083	0.0766	0.0721
60	0.0526	0.0456	0.0222	0.0415	0.0354	0.0456	0.0415	0.0460	-0.0265	0.0310	0.0402
75	0.0199	0.0211	0.0071	0.0186	0.0110	0.0211	0.0186	0.0213	0.0865	0.0125	0.0352

ตารางภาคผนวก ข.12 ข้อมูลอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางขมื่นชั้นด้วยกำลังอินฟราเรด 800 W ที่อุณหภูมิ 60 °C

Time (min)	MR (experiment)	MR (predicted)									
		Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6	Model 7	Model 8	Model 9	Model 10
0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0432	1.0204	1.0000	1.0432	1.0000	1.0000	1.0000	0.9990
5	0.6965	0.5962	0.7090	0.6102	0.6507	0.5962	0.6102	0.5962	0.6577	0.7082	0.7004
10	0.3825	0.3554	0.3784	0.3570	0.3901	0.3554	0.3570	0.3554	0.3874	0.3695	0.3764
15	0.1691	0.2119	0.1679	0.2088	0.2064	0.2119	0.2088	0.2119	0.1892	0.1706	0.1705
20	0.0591	0.1263	0.0641	0.1221	0.0768	0.1263	0.1221	0.1263	0.0630	0.0737	0.0661
25	0.0255	0.0753	0.0215	0.0715	-0.0146	0.0753	0.0715	0.0753	0.0090	0.0305	0.0208

ตารางภาคผนวก ข.13 ข้อมูลอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางขมื่นชั้นด้วยกำลังอินฟราเรด 1,000 W ที่อุณหภูมิ 40 °C

Time (min)	MR (experiment)	MR (predicted)									
		Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6	Model 7	Model 8	Model 9	Model 10
0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0360	1.0336	1.0000	1.0360	1.0000	1.0000	1.0000	1.0004
5	0.9343	0.9059	0.9268	0.9341	0.9330	0.9059	0.9341	0.9042	0.9364	0.9286	0.9304
10	0.8532	0.8206	0.8482	0.8423	0.8422	0.8206	0.8423	0.8193	0.8749	0.8523	0.8524
15	0.7706	0.7434	0.7720	0.7595	0.7601	0.7434	0.7595	0.7423	0.8153	0.7759	0.7756
20	0.6976	0.6734	0.7001	0.6848	0.6860	0.6734	0.6848	0.6726	0.7578	0.7024	0.7025
25	0.6313	0.6100	0.6329	0.6175	0.6191	0.6100	0.6175	0.6094	0.7022	0.6334	0.6341
30	0.5766	0.5526	0.5709	0.5567	0.5586	0.5526	0.5567	0.5521	0.6487	0.5695	0.5707
45	0.4168	0.4108	0.4144	0.4081	0.4101	0.4108	0.4081	0.4107	0.5001	0.4097	0.4108
60	0.2977	0.3054	0.2969	0.2992	0.3006	0.3054	0.2992	0.3055	0.3695	0.2926	0.2917
75	0.1976	0.2270	0.2107	0.2193	0.2200	0.2270	0.2193	0.2272	0.2570	0.2084	0.2054
90	0.1381	0.1687	0.1483	0.1608	0.1605	0.1687	0.1608	0.1690	0.1626	0.1482	0.1443
105	0.1006	0.1254	0.1036	0.1179	0.1167	0.1254	0.1179	0.1257	0.0862	0.1054	0.1017
120	0.0741	0.0932	0.0720	0.0864	0.0845	0.0932	0.0864	0.0935	0.0278	0.0749	0.0725

ตารางภาคผนวก ข.13 (ต่อ)

Time (min)	MR (experiment)	MR (predicted)									
		Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6	Model 7	Model 8	Model 9	Model 10
135	0.0548	0.0693	0.0498	0.0633	0.0607	0.0693	0.0633	0.0696	-0.0126	0.0533	0.0528
150	0.0424	0.0515	0.0342	0.0464	0.0432	0.0515	0.0464	0.0517	-0.0349	0.0379	0.0398
165	0.0323	0.0383	0.0234	0.0340	0.0302	0.0383	0.0340	0.0385	-0.0391	0.0269	0.0313
180	0.0272	0.0285	0.0160	0.0250	0.0207	0.0285	0.0250	0.0286	-0.0253	0.0191	0.0260
195	0.0223	0.0212	0.0109	0.0183	0.0137	0.0212	0.0183	0.0213	0.0065	0.0136	0.0228
210	0.0205	0.0157	0.0074	0.0134	0.0085	0.0157	0.0134	0.0158	0.0564	0.0097	0.0211
225	0.0187	0.0117	0.0050	0.0098	0.0047	0.0117	0.0098	0.0118	0.1243	0.0069	0.0203

ตารางภาคผนวก ข.14 ข้อมูลอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางขมื่นชั้นด้วยกำลังอินฟราเรด 1,000 W ที่อุณหภูมิ 50 °C

Time (min)	MR (experiment)	MR (predicted)									
		Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6	Model 7	Model 8	Model 9	Model 10
0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0288	1.0192	1.0000	1.0288	1.0000	1.0000	1.0000	0.9991
5	0.8048	0.7608	0.8021	0.7759	0.7798	0.7608	0.7759	0.7596	0.8066	0.7981	0.8053
10	0.6082	0.5788	0.6102	0.5852	0.5940	0.5788	0.5852	0.5787	0.6339	0.6113	0.6138
15	0.4626	0.4403	0.4531	0.4414	0.4499	0.4403	0.4414	0.4408	0.4820	0.4551	0.4559
20	0.3328	0.3350	0.3308	0.3329	0.3382	0.3350	0.3329	0.3358	0.3508	0.3318	0.3324
25	0.2388	0.2548	0.2384	0.2510	0.2514	0.2548	0.2510	0.2558	0.2403	0.2382	0.2389
30	0.1703	0.1939	0.1699	0.1893	0.1842	0.1939	0.1893	0.1949	0.1506	0.1688	0.1696
45	0.0492	0.0854	0.0584	0.0812	0.0601	0.0854	0.0812	0.0862	0.0056	0.0570	0.0571
60	0.0223	0.0376	0.0189	0.0348	0.0022	0.0376	0.0348	0.0381	0.0472	0.0182	0.0175

ตารางภาคผนวก ข.15 ข้อมูลอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางขมึนชั้นด้วยกำลังอินฟราเรด 1,000 W ที่อุณหภูมิ 60 °C

Time (min)	MR (experiment)	MR (predicted)									
		Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6	Model 7	Model 8	Model 9	Model 10
0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0273	1.0096	1.0000	1.0273	1.0000	1.0000	1.0000	0.9982
5	0.6295	0.5666	0.6452	0.5745	0.6082	0.5666	0.5745	0.6412	0.6313	0.6418	0.6385
10	0.3523	0.3211	0.3304	0.3213	0.3457	0.3211	0.3213	0.3247	0.3485	0.3276	0.3371
15	0.1552	0.1819	0.1488	0.1797	0.1740	0.1819	0.1797	0.1519	0.1515	0.1510	0.1546
20	0.0309	0.1031	0.0609	0.1005	0.0617	0.1031	0.1005	0.0687	0.0404	0.0656	0.0556
25	0.0195	0.0584	0.0230	0.0562	-0.0118	0.0584	0.0562	0.0306	0.0153	0.0275	0.0044

หมายเหตุ

Model 1* Newton model

Model 2* Page model

Model 3* Henderson and Pabis model

Model 4* Logarithmic model

Model 5* Modified Page model

Model 6* Two term model,

Model 7* Two term exponential model

Model 8* Wang and Singh model

Model 9* Approximation and diffusion model

Model 10* Midilli et al. model

ตารางภาคผนวก ข.16 ข้อมูลอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางขมึ้นชั้นด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดที่ 600 W อุณหภูมิ 40 °C

Time (min)	MR (experiment)	MR (predicted)									
		Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6	Model 7	Model 8	Model 9	Model 10
0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0078	1.0092	1.0000	1.0078	1.0000	1.0000	1.0000	0.9964
5	0.8216	0.8203	0.8289	0.8251	0.8252	0.8203	0.8251	0.8168	0.8763	0.8307	0.8329
10	0.6879	0.6729	0.6809	0.6755	0.6749	0.6729	0.6755	0.6713	0.7602	0.6829	0.6844
15	0.5649	0.5520	0.5573	0.5531	0.5521	0.5520	0.5531	0.5518	0.6518	0.5581	0.5586
20	0.4633	0.4528	0.4550	0.4528	0.4518	0.4528	0.4528	0.4535	0.5509	0.4547	0.4541
25	0.3659	0.3715	0.3709	0.3707	0.3699	0.3715	0.3707	0.3727	0.4577	0.3698	0.3681
30	0.2827	0.3047	0.3018	0.3035	0.3029	0.3047	0.3035	0.3063	0.3721	0.3005	0.2979
45	0.1637	0.1682	0.1617	0.1666	0.1670	0.1682	0.1666	0.1701	0.1610	0.1608	0.1576
60	0.0874	0.0929	0.0860	0.0914	0.0930	0.0929	0.0914	0.0944	0.0184	0.0860	0.0851
75	0.0434	0.0513	0.0454	0.0502	0.0526	0.0513	0.0502	0.0524	-0.0556	0.0460	0.0488
90	0.0326	0.0283	0.0239	0.0275	0.0305	0.0283	0.0275	0.0291	-0.0611	0.0246	0.0314
105	0.0260	0.0156	0.0125	0.0151	0.0185	0.0156	0.0151	0.0162	0.0019	0.0131	0.0237
120	0.0200	0.0086	0.0066	0.0083	0.0120	0.0086	0.0083	0.0090	0.1335	0.0070	0.0209

ตารางภาคผนวก ข.17 ข้อมูลอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางขมึ้นชั้นด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดที่ 600 W อุณหภูมิ 50 °C

Time (min)	MR (experiment)	MR (predicted)									
		Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6	Model 7	Model 8	Model 9	Model 10
0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0295	1.0282	1.0000	1.0295	1.0000	1.0000	1.0000	0.9985
5	0.7975	0.7608	0.8009	0.7763	0.7768	0.7608	0.7763	0.7595	0.8181	0.8092	0.8088
10	0.6298	0.5789	0.6088	0.5854	0.5865	0.5789	0.5854	0.5787	0.6536	0.6106	0.6127
15	0.4615	0.4404	0.4518	0.4414	0.4425	0.4404	0.4414	0.4409	0.5064	0.4486	0.4502
20	0.2938	0.3351	0.3297	0.3328	0.3336	0.3351	0.3328	0.3359	0.3766	0.3260	0.3246
25	0.2370	0.2549	0.2375	0.2510	0.2511	0.2549	0.2510	0.2559	0.2641	0.2358	0.2314
30	0.1652	0.1940	0.1692	0.1893	0.1887	0.1940	0.1893	0.1950	0.1690	0.1702	0.1644
45	0.0739	0.0854	0.0582	0.0811	0.0787	0.0854	0.0811	0.0862	-0.0122	0.0638	0.0640
60	0.0484	0.0376	0.0188	0.0348	0.0310	0.0376	0.0348	0.0381	-0.0371	0.0239	0.0367
75	0.0201	0.0166	0.0058	0.0149	0.0103	0.0166	0.0149	0.0169	0.0941	0.0090	0.0332

ตารางภาคผนวก ข.18 ข้อมูลอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางขมึนชั้นด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดที่ 600 W อุณหภูมิ 60 °C

Time (min)	MR (experiment)	MR (predicted)									
		Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6	Model 7	Model 8	Model 9	Model 10
0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0230	1.0210	1.0000	1.0230	1.0000	1.0000	1.0000	0.9986
5	0.7462	0.7095	0.7473	0.7199	0.7213	0.7095	0.7199	0.7080	0.7785	0.7518	0.7533
10	0.5349	0.5033	0.5256	0.5066	0.5088	0.5033	0.5066	0.5041	0.5833	0.5255	0.5267
15	0.3641	0.3571	0.3597	0.3565	0.3582	0.3571	0.3565	0.3589	0.4143	0.3570	0.3566
20	0.2259	0.2533	0.2416	0.2509	0.2513	0.2533	0.2509	0.2555	0.2717	0.2397	0.2371
25	0.1524	0.1797	0.1599	0.1766	0.1756	0.1797	0.1766	0.1819	0.1553	0.1602	0.1567
30	0.1021	0.1275	0.1046	0.1243	0.1219	0.1275	0.1243	0.1295	0.0652	0.1068	0.1044
45	0.0606	0.0455	0.0276	0.0433	0.0376	0.0455	0.0433	0.0467	-0.0474	0.0315	0.0395
60	0.0169	0.0163	0.0068	0.0151	0.0076	0.0163	0.0151	0.0169	0.0766	0.0093	0.0288

ตารางภาคผนวก ข.19 ข้อมูลอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางขมึ้นชั้นด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดที่ 800 W อุณหภูมิ 40 °C

Time (min)	MR (experiment)	MR (predicted)									
		Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6	Model 7	Model 8	Model 9	Model 10
0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0329	1.0325	1.0000	1.0329	1.0000	1.0000	1.0000	1.0009
5	0.8115	0.7642	0.8072	0.7816	0.7817	0.7642	0.7816	0.7630	0.8329	0.8175	0.8139
10	0.6286	0.5840	0.6167	0.5915	0.5918	0.5840	0.5915	0.5838	0.6798	0.6180	0.6199
15	0.4589	0.4463	0.4592	0.4476	0.4479	0.4463	0.4476	0.4467	0.5406	0.4548	0.4581
20	0.3289	0.3411	0.3359	0.3387	0.3389	0.3411	0.3387	0.3418	0.4153	0.3314	0.3318
25	0.2230	0.2606	0.2422	0.2563	0.2563	0.2606	0.2563	0.2616	0.3040	0.2406	0.2373
30	0.1718	0.1992	0.1726	0.1939	0.1938	0.1992	0.1939	0.2002	0.2065	0.1744	0.1686
45	0.0789	0.0889	0.0591	0.0840	0.0834	0.0889	0.0840	0.0897	-0.0021	0.0663	0.0630
60	0.0336	0.0397	0.0190	0.0364	0.0354	0.0397	0.0364	0.0402	-0.0854	0.0252	0.0318
75	0.0267	0.0177	0.0058	0.0158	0.0146	0.0177	0.0158	0.0180	-0.0432	0.0096	0.0258
90	0.0199	0.0079	0.0017	0.0068	0.0055	0.0079	0.0068	0.0081	0.1243	0.0036	0.0273

ตารางภาคผนวก ข.20 ข้อมูลอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางขมึนชั้นด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดที่ 800 W อุณหภูมิ 50 °C

Time (min)	MR (experiment)	MR (predicted)									
		Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6	Model 7	Model 8	Model 9	Model 10
0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0196	1.0173	1.0000	1.0196	1.0000	1.0000	1.0000	0.9983
5	0.7665	0.7396	0.7699	0.7494	0.7505	0.7396	0.7494	0.7381	0.8093	0.7707	0.7728
10	0.5736	0.5471	0.5678	0.5508	0.5530	0.5471	0.5508	0.5466	0.6372	0.5690	0.5690
15	0.4118	0.4046	0.4109	0.4048	0.4068	0.4046	0.4048	0.4048	0.4837	0.4106	0.4101
20	0.2956	0.2993	0.2936	0.2975	0.2986	0.2993	0.2975	0.2998	0.3489	0.2925	0.2917
25	0.2046	0.2214	0.2078	0.2186	0.2185	0.2214	0.2186	0.2220	0.2326	0.2069	0.2056
30	0.1345	0.1637	0.1458	0.1607	0.1592	0.1637	0.1607	0.1644	0.1350	0.1457	0.1444
45	0.0563	0.0663	0.0486	0.0638	0.0588	0.0663	0.0638	0.0668	-0.0462	0.0503	0.0514
60	0.0257	0.0268	0.0155	0.0253	0.0180	0.0268	0.0253	0.0271	-0.0599	0.0173	0.0230
75	0.0136	0.0108	0.0048	0.0101	0.0015	0.0108	0.0101	0.0110	0.0940	0.0059	0.0160

ตารางภาคผนวก ข.21 ข้อมูลอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางขมึนชั้นด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดที่ 800 W อุณหภูมิ 60 °C

Time (min)	MR (experiment)	MR (predicted)									
		Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6	Model 7	Model 8	Model 9	Model 10
0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0172	1.0129	1.0000	1.0172	1.0000	1.0000	1.0000	0.9960
5	0.7102	0.6882	0.7235	0.6956	0.6992	0.6882	0.6956	0.6882	0.7692	0.7209	0.7243
10	0.5000	0.4736	0.4927	0.4756	0.4807	0.4736	0.4756	0.4736	0.5662	0.4945	0.4931
15	0.3431	0.3259	0.3266	0.3253	0.3287	0.3259	0.3253	0.3259	0.3911	0.3281	0.3261
20	0.2095	0.2243	0.2125	0.2224	0.2228	0.2243	0.2224	0.2243	0.2440	0.2127	0.2117
25	0.1265	0.1544	0.1363	0.1521	0.1490	0.1544	0.1521	0.1544	0.1247	0.1354	0.1357
30	0.0727	0.1062	0.0864	0.1040	0.0977	0.1062	0.1040	0.1062	0.0332	0.0850	0.0864
45	0.0333	0.0346	0.0209	0.0333	0.0198	0.0346	0.0333	0.0346	-0.0737	0.0198	0.0233
60	0.0090	0.0113	0.0047	0.0106	-0.0065	0.0113	0.0106	0.0113	0.0703	0.0044	0.0093

ตารางภาคผนวก ข.22 ข้อมูลอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางขมึ้นชั้นด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดที่ 1,000 W อุณหภูมิ 40 °C

Time (min)	MR (experiment)	MR (predicted)									
		Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6	Model 7	Model 8	Model 9	Model 10
0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0126	1.0065	1.0000	1.0126	1.0000	1.0000	1.0000	0.9945
5	0.7453	0.7413	0.7668	0.7476	0.7506	0.7413	0.7476	0.7395	0.7957	0.7641	0.7652
10	0.5785	0.5495	0.5672	0.5520	0.5580	0.5495	0.5520	0.5491	0.6143	0.5688	0.5674
15	0.4325	0.4074	0.4132	0.4075	0.4130	0.4074	0.4075	0.4077	0.4558	0.4154	0.4139
20	0.2944	0.3020	0.2979	0.3009	0.3037	0.3020	0.3009	0.3027	0.3200	0.2989	0.2986
25	0.2063	0.2239	0.2130	0.2221	0.2215	0.2239	0.2221	0.2248	0.2072	0.2125	0.2135
30	0.1398	0.1660	0.1514	0.1640	0.1596	0.1660	0.1640	0.1669	0.1172	0.1497	0.1514
45	0.0559	0.0676	0.0527	0.0660	0.0515	0.0676	0.0660	0.0683	-0.0157	0.0501	0.0512
60	0.0169	0.0275	0.0177	0.0266	0.0053	0.0275	0.0266	0.0280	0.0570	0.0160	0.0151

ตารางภาคผนวก ข.23 ข้อมูลอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางขมึนชั้นด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดที่ 1,000 W อุณหภูมิ 50 °C

Time (min)	MR (experiment)	MR (predicted)									
		Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6	Model 7	Model 8	Model 9	Model 10
0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0218	1.0106	1.0000	1.0218	1.0000	1.0000	1.0000	0.9962
5	0.6914	0.6626	0.7132	0.6714	0.6831	0.6626	0.6714	0.6614	0.7349	0.7091	0.7043
10	0.4630	0.4391	0.4634	0.4411	0.4557	0.4391	0.4411	0.4389	0.5091	0.4639	0.4582
15	0.3031	0.2909	0.2881	0.2899	0.2978	0.2909	0.2899	0.2912	0.3226	0.2891	0.2858
20	0.1739	0.1928	0.1736	0.1904	0.1881	0.1928	0.1904	0.1932	0.1754	0.1744	0.1720
25	0.0888	0.1277	0.1021	0.1251	0.1119	0.1277	0.1251	0.1282	0.0676	0.1028	0.0994
30	0.0341	0.0846	0.0589	0.0822	0.0589	0.0846	0.0822	0.0851	-0.0010	0.0596	0.0539
45	0.0108	0.0246	0.0102	0.0233	-0.0211	0.0246	0.0233	0.0249	0.0292	0.0108	-0.0021

ตารางภาคผนวก ข.24 ข้อมูลอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางขมื่นชั้นด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดที่ 1,000 W อุณหภูมิ 60 °C

Time (min)	MR (experiment)	MR (predicted)									
		Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6	Model 7	Model 8	Model 9	Model 10
0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0223	1.0010	1.0000	1.0223	1.0000	1.0000	1.0000	0.9987
5	0.6709	0.6398	0.6955	0.6481	0.6735	0.6398	0.6481	0.6387	0.7006	0.6911	0.6789
10	0.4524	0.4093	0.4319	0.4109	0.4397	0.4093	0.4109	0.4093	0.4561	0.4319	0.4390
15	0.2684	0.2619	0.2540	0.2605	0.2726	0.2619	0.2605	0.2623	0.2666	0.2549	0.2699
20	0.1421	0.1675	0.1436	0.1651	0.1534	0.1675	0.1651	0.1680	0.1321	0.1449	0.1516
25	0.0691	0.1072	0.0788	0.1047	0.0682	0.1072	0.1047	0.1077	0.0526	0.0803	0.0686
30	0.0129	0.0686	0.0421	0.0664	0.0074	0.0686	0.0664	0.0690	0.0280	0.0436	0.0094

หมายเหตุ

Model 1* Newton model

Model 2* Page model

Model 3* Henderson and Pabis model

Model 4* Logarithmic model

Model 5* Modified Page model

Model 6* Two term model,

Model 7* Two term exponential model

Model 8* Wang and Singh model

Model 9* Approximation and diffusion model

Model 10* Midilli et al. model