



รายงานการวิจัย
เรื่อง

การอบแห้งรังไหมโดยใช้การแผ่รังสีอินฟราเรดร่วมกับการพาอากาศร้อน
Cocoon Drying Using Combined Infrared Radiation and Hot Air

กลยุทธ์ ดิจริง
พงศธร กองแก้ว

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม

2561

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม

(งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากงบประมาณแผ่นดินด้านการวิจัย ปีงบประมาณ 2560)



รายงานการวิจัย
เรื่อง

การอบแห้งรังไหมโดยใช้การแผ่รังสีอินฟราเรดร่วมกับการพาอากาศร้อน
Cocoon Drying Using Combined Infrared Radiation and Hot Air

กลยุทธ์ ดิจริง
พงศธร กองแก้ว

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม

2561

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม

(งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากงบประมาณแผ่นดินด้านการวิจัย ปีงบประมาณ 2560)

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม ที่กรุณาให้ทุนสนับสนุนการวิจัยนี้

ขอขอบคุณ ศูนย์หม่อนไหมเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดนครราชสีมา ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือในการทดสอบคุณภาพรังไหม

ขอขอบคุณ หลักสูตรฟิสิกส์ หลักสูตรฟิสิกส์ประยุกต์ และศูนย์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่และเครื่องมือในการทำวิจัย

ขอขอบคุณ อาจารย์ เจ้าหน้าที่ และนักศึกษาทุกท่านที่เกี่ยวข้อง ที่มีส่วนช่วยให้การวิจัยครั้งนี้ สำเร็จลุล่วงด้วยดี

คณะผู้วิจัย

2561

หัวข้อวิจัย	การอบแห้งรังไหมโดยใช้การแผ่รังสีอินฟราเรดร่วมกับการพาอากาศร้อน
ผู้ดำเนินการวิจัย	นายกลยุทธิ์ ดีจริง และ นายพงศธร กองแก้ว
ที่ปรึกษา	ดร. กมล พลคำ
หน่วยงาน	หลักสูตรฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
ปี พ.ศ.	2561

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการอบแห้งรังไหมด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับอากาศร้อน โดยใช้กำลังรังสีอินฟราเรดเท่ากับ 600, 700 และ 800 อนุหภูมิอากาศร้อนเท่ากับ 60, 70 และ 80°C ความชื้นรังไหมจากความชื้นเริ่มต้นประมาณ 210 %dry basis (db) อบแห้งจนเหลือความชื้นสุดท้าย 12 %db ผลการทดลองพบว่า ทุกเงื่อนไขการอบแห้งช่วงเริ่มต้นอบแห้งรังไหมมีอัตราเพิ่มขึ้นเป็นเวลานับๆ หลังจากนั้นเป็นช่วงอัตราการอบแห้งลดลง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 6 รูปแบบ นำมาทำนายผลการทดลอง ซึ่งแบบจำลอง Midilli Kucuk สามารถอธิบายลักษณะการอบแห้งได้ดีที่สุด ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ และอัตราการอบแห้ง มีค่าเท่ากับ 1.847×10^{-9} ถึง 4.339×10^{-9} m^2/s และ 0.333 ถึง 0.852 kg_{water}/h ตามลำดับ ซึ่งเพิ่มขึ้นตามกำลังรังสีอินฟราเรดและอนุหภูมิอากาศที่เพิ่มขึ้น ผลการทดสอบการสาวรังไหม พบว่า รังไหมอบแห้งมีค่าการสาวง่ายสูงกว่ารังไหมสด และเส้นไหมดิบมีขนาดเท่ากับ 19.30 - 19.89 den นอกจากนี้ ค่าความเหนียวและการยืดตัวของเส้นไหมดิบจากรังไหมอบแห้งมีค่าเท่ากับ 3.60 - 3.62 g/den และ 24.35-25.69 % ตามลำดับ การอบแห้งที่ กำลังอินฟราเรด 800 W มีอัตราการอบแห้งสูงสุด และความสิ้นเปลืองพลังงานต่ำสุดเท่ากับ 0.852 kg_{water}/h และ 6.59 MJ/kg_{water} ตามลำดับ

Research Title	Cocoon Drying Using Combined Infrared Radiation and Hot Air
Researcher	Mr. Konlayut Deejing and Mr. Pongsathorn Kongkeaw
Research Consultants	Dr. Kamon Ponkham
Organization	Program of Physics, Faculty of Science and Technology, Rajabhat Maha Sarakham University
Year	2018

ABSTRACT

The objective of this research was to study drying of cocoon by infrared radiation (IR) combine hot air (HA). The experiments were carried out at infrared powers of 600, 700 and 800 W and drying air temperatures of 60, 70 and 80 °C. The samples with initial moisture content of approximately 210% %dry basis (db) were dried until attaining a final moisture content of 12 %db. The results show that the drying had a short accelerating rate period at the start followed by a falling rate period in all cases. Six mathematical models were fitted into the experimental data and the Midilli and Kucuk model best described the drying curves. It was found that the overall effective diffusion coefficient and drying rate varied from 1.847×10^{-9} to 4.339×10^{-9} m²/s and 0.333 To 0.852 kg_{water}/h respectively. Both parameters increased with increasing infrared power and air temperature. Also, the experiment of reeling showed that the reelability score of dried cocoons were greater than that of fresh cocoons and size of raw silk was 19.30 - 19.89 den. Besides this, the tenacity and elongation of the raw silk obtained from dried cocoon were 3.60-3.62 g/den and 24.35-25.69 %, respectively. The maximum drying rate and minimum specific energy consumption were 0.852 kg_{water}/h and 6.59 MJ/kg_{water}, respectively, at IR drying with power of 800 W.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
ความเป็นมาและความสำคัญ	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
ขอบเขตการวิจัย	2
คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 แนวคิด ทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
การเลี้ยงไหม	3
ไหมพันธุ์รับรองของกรมวิชาการเกษตร	4
การคัดเลือกรังไหม	9
องค์ประกอบเส้นไหม	11
การผลิตเส้นไหม	13
วิธีชักตัวอย่างและทดสอบเส้นไหมสาวด้วยเครื่องจักร	14
พื้นฐานการอบแห้ง	17
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบาง	18
ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นและพลังงานกระตุ้น	20
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	21
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	24
เครื่องมือในการวิจัย	24
การประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับอากาศร้อน	24
การศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งรังไหม	25
การศึกษาคุณภาพเส้นไหมที่ได้จากการอบแห้งรังไหม	25
การศึกษาทางเศรษฐศาสตร์ของการอบแห้งรังไหม	27

บทที่ 4 ผลการวิจัย	28
การประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้งโดยใช้รังสีอินฟราเรดร่วมกับอากาศร้อน ในการอบแห้งรังไหม	28
การศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งรังไหมด้วยรังสีอินฟราเรด ร่วมกับอากาศร้อน	31
การศึกษาคุณภาพรังไหมหลังการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับอากาศร้อน ..	43
การศึกษาทางเศรษฐศาสตร์ของการอบแห้งรังไหม	46
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	47
สรุปผลการวิจัย	47
อภิปรายผล	47
ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้	48
ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยครั้งต่อไป	48
บรรณานุกรม	49
บรรณานุกรมภาษาไทย	49
บรรณานุกรมภาษาต่างประเทศ	50
ภาคผนวก	52
ภาคผนวก ก ข้อมูลการอบแห้งรังไหม	53
ภาคผนวก ข ผลการทดสอบคุณภาพรังไหม	59
ภาคผนวก ค เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย	63
ประวัติผู้วิจัย	69

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 จำนวนรอบในการกรอเชื้อดใหม่ตัวอย่างทดสอบ	16
2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบาง.....	19
4.1 รายละเอียดส่วนประกอบหลักของเครื่องอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับอากาศร้อน	28
4.2 ค่าทางสถิติของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งรังไหมด้วยรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 600, 700 และ 800 W ร่วมกับอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 60 °C	36
4.3 ค่าทางสถิติของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งรังไหมด้วยรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 600, 700 และ 800 W ร่วมกับอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 70 °C	37
4.4 ค่าทางสถิติของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งรังไหมด้วยรังสีอินฟราเรดที่ กำลัง 600, 700 และ 800 W ร่วมกับอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 80 °C	38
4.5 แสดงค่าคงที่แบบจำลอง Midilli Kucuk รูปแบบสมการทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นรังระหว่าง การอบแห้ง	41
4.6 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นรังไหมระหว่างการอบแห้ง	43
4.7 ผลวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานของการอบแห้งรังไหม.....	46
ก-1 ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความชื้นรังไหมระหว่างการอบแห้งด้วยกำลังอินฟราเรด 600 W อุณหภูมิอากาศ 60 °C.....	54
ก-2 ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความชื้นรังไหมระหว่างการอบแห้งด้วยกำลังอินฟราเรด 600 W อุณหภูมิอากาศ 70 °C.....	54
ก-3 ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความชื้นรังไหมระหว่างการอบแห้งด้วยกำลังอินฟราเรด 600 W อุณหภูมิอากาศ 80 °C.....	55
ก-4 ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความชื้นรังไหมระหว่างการอบแห้งด้วยกำลังอินฟราเรด 700 W อุณหภูมิอากาศ 60 °C.....	55
ก-5 ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความชื้นรังไหมระหว่างการอบแห้งด้วยกำลังอินฟราเรด 700 W อุณหภูมิอากาศ 70 °C.....	56
ก-6 ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความชื้นรังไหมระหว่างการอบแห้งด้วยกำลังอินฟราเรด 700 W อุณหภูมิอากาศ 80 °C.....	56
ก-7 ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความชื้นรังไหมระหว่างการอบแห้งด้วยกำลังอินฟราเรด 800 W อุณหภูมิอากาศ 60 °C.....	57
ก-8 ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความชื้นรังไหมระหว่างการอบแห้งด้วยกำลังอินฟราเรด 800 W อุณหภูมิอากาศ 70 °C.....	57
ก-9 ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความชื้นรังไหมระหว่างการอบแห้งด้วยกำลังอินฟราเรด 800 W อุณหภูมิอากาศ 80 °C.....	58

ก-10 ข้อมูลการใช้พลังงานในอบแห้งรังไหม	58
ข-1 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนค่าเปอร์เซ็นต์การสาวง่าย ขนาดเส้นไหม ความเหนียว การยืดตัว และแรงดึงสูงสุด	60
ข-2 ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การสาวง่าย	61
ข-3 ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยขนาดเส้นไหม	61
ข-4 ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความเหนียว	62
ข-5 ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยการยืดตัว	62

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1	วงจรชีวิตหนอนไหม..... 4
2.2	แสดงลักษณะรังไหมพันธุ์ไทยพื้นบ้านพันธุ์ต่าง ๆ..... 9
2.3	แสดงลักษณะรังไหมเสีย..... 12
2.4	ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของรังไหมสายพันธุ์ <i>Bombyxmori</i> 12
2.5	ลักษณะเส้นโค้งอัตราการอบแห้ง..... 18
4.1	อัตราการอบแห้งรังไหม..... 29
4.2	ปริมาณไฟฟ้าที่ใช้อบแห้งรังไหม..... 30
4.3	ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้งรังไหม..... 30
4.4	ค่าอัตราส่วนความชื้นรังไหมกับระยะเวลาในการอบแห้งด้วยรังฮีอินฟราเรดที่กำลัง 600, 700 และ 800 W ที่อุณหภูมิอากาศ (a) 60, (b) 70 และ (c) 80 °C..... 31
4.5	ค่าอัตราส่วนความชื้นรังไหมกับระยะเวลาในการอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 60, 70 และ 80 °C ร่วมกับรังฮีอินฟราเรดที่กำลัง (a) 600, (b) 700 และ (c) 800 W..... 32
4.6	ค่าอัตราส่วนความชื้นรังไหมกับระยะเวลาในการอบแห้งด้วยอากาศที่อุณหภูมิ 60, 70 และ 80 °C..... 33
4.7	อัตราการอบแห้งกับอัตราส่วนความชื้นในการอบแห้งรังไหมด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ร่วมกับรังฮีอินฟราเรดกำลัง (a) 600, (b) 700 และ (c) 800 W..... 34
4.8	เปรียบเทียบค่าอัตราส่วนความชื้นจากการทำนายด้วยแบบจำลอง Midilli Kucuk กับค่าจากการทดลองที่กำลังรังฮีอินฟราเรด 600, 700 และ 800 W อุณหภูมิอากาศอบแห้ง (a) 60, (b) 70 และ (c) 80 °C..... 39
4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนความชื้นจากการทำนายด้วยแบบจำลอง Midilli Kucuk กับค่าจากการทดลองที่กำลังรังฮีอินฟราเรด 600, 700 และ 800 W อุณหภูมิอากาศอบแห้ง (a) 60, (b) 70 และ (c) 80 °C..... 40
4.10	ความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมธรรมชาติของอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งด้วยรังฮีอินฟราเรดที่กำลังต่าง ๆ ร่วมกับอากาศอบแห้งที่อุณหภูมิ (a) 60, (b) 70 และ (c) 80 °C..... 42
4.11	ค่าเปอร์เซ็นต์การสวยงาม..... 44
4.12	ขนาดเส้นไหมดิบที่สาวได้จากรังไหมสดและรังไหมอบแห้ง..... 44
4.13	ความเหนียวเส้นไหมดิบที่สาวได้จากรังไหมสดและรังไหมอบแห้ง..... 45
4.14	การยืดตัวของเส้นไหมดิบที่สาวได้จากรังไหมสดและรังไหมอบแห้ง..... 45
ค-1	เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล..... 64
ค-2	เครื่องวิเคราะห์ความชื้น..... 64
ค-3	เครื่องบันทึกพลังงานไฟฟ้า..... 64

ค-4 หม้อแปลงปรับแรงดันไฟฟ้า.....	64
ค-5 เครื่องสาวไหมอัตโนมัติ	65
ค-6 เหล่งใจไหม	65
ค-7 เครื่องกรอไหมเข้าหลอด	66
ค-8 เครื่องกรอทำเช็ดไหมทดสอบ	66
ค-9 เครื่องทดสอบแรงดึง	67
ค-10 ตัวอย่างรังไหมอบแห้งสำหรับนำไปสาวทดสอบ	67
ค-11 การต้มรังไหมก่อนนำไปสาวด้วยเครื่องสาวไหม.....	67
ค-12 การทำไฟไหม	68
ค-13 การนำเส้นไหมเข้าเครื่องกรอไหมเข้าหลอด.....	68
ค-14 การทำเช็ดไหมทดสอบ.....	68

บทที่ 1 บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญ

เกษตรกรไทยประกอบอาชีพการเลี้ยงไหมมาเป็นเวลานานโดยเฉพาะการเลี้ยงแบบพื้นบ้าน กระบวนการผลิตผ้าไหมของเกษตรกรมีปัญหาและอุปสรรคหลายอย่าง หนึ่งในปัญหาที่เกษตรกรประสบนั้นคือ การสาวไหมซึ่งเกษตรกรไม่สามารถนำรังไหมที่ผลิตได้จำนวนมากไปสาวได้ทันทีในแต่ละวัน และจะต้องรีบสาวไหมให้เสร็จก่อนที่ดักแต่ในรังไหมกลายเป็นผีเสื้อแล้วจะเจาะรังไหมออกมา ซึ่งเป็นเหตุให้รังไหมเสียหายไม่สามารถสาวเป็นเส้นไหมได้ เกษตรกรจึงได้นำรังไหมมาตากแดดเพื่อให้ดักแต่ในรังไหมตายเป็นการป้องกันการเจาะรังไหม การใช้เทคโนโลยีการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นอีกหนึ่งแนวทางที่ช่วยให้การอบแห้งรังไหมที่มีประสิทธิภาพดีกว่าวิธีการตากแดด และเป็นการประหยัดพลังงาน จากรายงานวิจัยของ Singh (2011) ได้อบรังไหมด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดไหลเวียนอากาศโดยการบังคับ ภายในห้องอบแห้งที่ป้องกันรังไหมได้รับรังสีดวงอาทิตย์โดยตรง อุณหภูมิอบแห้งอยู่ในช่วง 50 ถึง 75 °C พบว่า ระยะเวลาอบแห้ง 16-19 h ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่ารังสีอาทิตย์ อย่างไรก็ตามวิธีการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์มีข้อดีคือ ความไม่แน่นอนของสภาพภูมิอากาศโดยเฉพาะในฤดูฝนที่สภาพอากาศไม่เอื้ออำนวย และบางช่วงเวลาที่แสงแดดไม่เพียงพอ การอบรังไหมด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อน ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิขณะอบแห้งได้อย่างสม่ำเสมอ ในการอบรังไหมอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 60-80 °C (Singh, 2011) นอกเหนือจากการอบแห้งด้วยวิธีการพาอากาศร้อนแล้วยังมีอีกเทคนิคหนึ่ง ซึ่งมีจุดเด่นที่น่าสนใจ คือ การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด โดยพลังงานจากรังสีอินฟราเรดจะถูกแผ่ไปยังวัสดุ ทำให้เกิดความร้อนภายในวัสดุอย่างรวดเร็ว ซึ่งไม่ต้องอาศัยอากาศในการส่งถ่ายความร้อน การอบแห้งด้วยการแผ่รังสีอินฟราเรดสามารถลดเวลาอบแห้งประหยัดพลังงาน และลดค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน เมื่อเปรียบกับการอบแห้งด้วยอากาศร้อน (Nowak & Lewicki, 2004; Supmoon & Noomhorm, 2013) นอกจากนี้ การประยุกต์ใช้ความร้อนอินฟราเรดร่วมกับการพาอากาศร้อนในกระบวนการอบแห้งสามารถประหยัดเวลาได้ 20 % และลดความสิ้นเปลืองพลังงานได้ เมื่อเปรียบเทียบกับ การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดเพียงอย่างเดียว (Sun et al., 2007; Hebbar, Vishwanathan, & Ramesh, 2004) แต่อย่างไรก็ตาม วิธีการใช้ความร้อนร่วมนี้ส่งผลให้มีความสิ้นเปลืองพลังงานเพิ่มขึ้นได้เช่นกัน (Lechtanska et al., 2015)

จากที่มาและความสำคัญของปัญหาข้างต้น ดังนั้นคณะผู้วิจัยมีความสนใจศึกษาการอบรังไหมโดยใช้วิธีการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับอากาศร้อน เป็นการนำความรู้ทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอบแห้งมาประยุกต์ต่อยอดภูมิปัญญาพื้นบ้าน ซึ่งมีจุดมุ่งหมายในการศึกษา จลนพลศาสตร์การอบแห้ง คุณภาพรังไหม ความสิ้นเปลืองพลังงาน และค่าใช้จ่ายในการอบแห้ง

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้งโดยใช้รังสีอินฟราเรดร่วมกับอากาศร้อน
2. เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งรังไหมด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับอากาศร้อน
3. เพื่อศึกษาคุณภาพรังไหมหลังการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับอากาศร้อน
4. เพื่อศึกษาทางเศรษฐศาสตร์สำหรับการอบแห้งรังไหมด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับอากาศร้อน

ขอบเขตการวิจัย

1. รังไหมที่ใช้ศึกษาคือไหมพันธุ์เหลืองโพโรจน์ จากกลุ่มผู้เลี้ยงหม่อนไหม อำเภอสามชัย จังหวัดกาฬสินธุ์
2. การศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งรังไหมได้แก่ คุณลักษณะการอบแห้ง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้ง และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อน
3. การศึกษาคุณภาพรังไหมโดยทำการศึกษาได้แก่ เปอร์เซ็นต์การสาวง่าย ความเหนียวของเส้นไหม และการยืดตัวของเส้นไหม
4. การศึกษาสมรรถนะเครื่องอบแห้งได้แก่ อัตราการอบแห้ง และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย

กำลังรังสีอินฟราเรดในการศึกษานี้ หมายถึง กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแท่งอินฟราเรด

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ทราบสมรรถนะการอบแห้งรังไหมด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับอากาศร้อน
2. ได้ทราบคุณลักษณะการอบแห้ง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำนายการอบแห้ง และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อน ของการอบแห้งรังไหมด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับอากาศร้อน
3. ได้ทราบคุณภาพรังไหมที่ผ่านการอบแห้ง
4. ได้ทราบค่าใช้จ่ายในการดำเนินการอบแห้งรังไหมด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับอากาศร้อน
5. ได้ทราบแนวทางการอบแห้งรังไหมด้วยเครื่องอบแห้งโดยใช้รังสีอินฟราเรดร่วมกับอากาศร้อน

บทที่ 2

แนวคิด ทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การเลี้ยงไหม

ไหม (silkworm) ที่กินใบหม่อนเป็นอาหารมีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Bombyx mori* อยู่ในวงศ์ Bombycidae ไหมเป็นแมลงมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบสมบูรณ์ (completely metamorphosis insect) แบ่งระยะการเจริญเติบโตออกเป็น 4 ระยะ ได้แก่ ระยะไข่ ตัวหนอน ดักแด้ และผีเสื้อ มีเพียงระยะตัวหนอนเท่านั้นที่กินอาหารและอาหารของหนอนไหมก็คือใบหม่อน หนอนไหมจะนำสารอาหารชนิดต่างๆ จากใบหม่อนไปสร้างความเจริญเติบโตโดยผ่านการย่อยและดูดซึมเป็นปริมาณ 1 ใน 3 ของสารอาหารทั้งหมด ครึ่งหนึ่งของโปรตีนที่ดูดซึมจากใบหม่อนจะถูกนำไปใช้ผลิตสารไหม เมื่อถึงวัย 5 วันแรก ต่อมไหม (silk gland) จะหนักเพียง 6.36% ของน้ำหนักตัวไหม เมื่อไหมสุกก่อนเข้าทำรัง ต่อมไหมจะหนักถึง 41.97% จะเห็นว่าปลายวัยที่ 5 สารอาหารโดยเฉพาะ โปรตีนเกือบทั้งหมดถูกเปลี่ยนไปเป็นสารที่ใช้ชักใยทำรังหรือเส้นไหมนั่นเอง พันธุ์ไหมที่ใช้เลี้ยงมีทั้งไหมพันธุ์ไทย (native thai variety : polyvoltine) พันธุ์ไทยลูกผสม (thai hybrid variety) และพันธุ์ลูกผสมต่างประเทศ (foreign hybrid variety : bivoltine) การเลี้ยงไหมโดยทั่วไปไหมจะมี 5 วัย วัย 1-3 เรียกว่าไหมวัยอ่อน (Young silkworm) และวัย 4-5 เรียกว่าไหมวัยแก่ (grown silkworm) เมื่อไหมสุกจะทำรังโดยการพันเส้นใยห่อหุ้มคือ เส้นใยที่พันออกมาจากปากของตัวหนอนไหมที่โตเต็มวัยเพื่อกันตัวป้องกันศัตรูทางธรรมชาติในขณะที่หนอนไหมลอกคราบจากหนอนไหมเป็นตัวดักแด้ และไม่สามารถเคลื่อนที่ได้

หนอนไหมเป็นแมลงชนิดหนึ่งซึ่งมีการเจริญเติบโตจากไข่ไหม และเป็นตัวหนอนไหม ในขณะที่เป็นตัวหนอนไหมจะเจริญเติบโตโดยการลอกคราบประมาณ 3-4 ครั้ง ในระยะเวลาประมาณ 20-22 วัน และจะมีน้ำหนักตัวเพิ่มขึ้น 10,000 เท่า โดยการกินอาหารเพียงอย่างเดียว คือใบหม่อน เมื่อเจริญเติบโตเต็มที่แล้ว จะหยุดกินอาหารแล้วพันเส้นใยออกมาห่อหุ้มตัวเอง ที่เราเรียกว่ารังไหม (cocoon) ซึ่งมีลักษณะกลมรีคล้ายเมล็ดถั่ว เกษตรกรผู้เลี้ยงไหมไทยจะเก็บรังไหมไว้แล้วรีบสาวเส้นไหมให้เสร็จภายใน 10 วัน ก่อนที่ดักแด้ไหมจะกลายเป็นผีเสื้อ และเจาะออกมาจากรังไหมทำให้รังไหมเสียหายเมื่อนำไปสาวจะได้เส้นไหมที่มีคุณภาพต่ำ ผลผลิตรังไหมที่ได้ของเกษตรกรมีสีเหลือง ส่วนใหญ่ได้มาจากพันธุ์พื้นเมืองและพันธุ์ไทยลูกผสม (ศิริพร บุญชู และคณะ, 2557)



ภาพที่ 2.1 วงจรชีวิตหอนอนไหม
ที่มา: ศิริพร บุญชู และคณะ (2557)

ไหมพันธุ์รับรองของกรมวิชาการเกษตร

กรมหม่อนไหม (2556) ได้รวบรวมพันธุ์ไหมที่ผ่านการรับรองพันธุ์ของกรมวิชาการเกษตร มีดังนี้

ไหมพันธุ์แท้จำแนกได้ตามสายพันธุ์ดังต่อไปนี้

1. นครราชสีมา 60-1 (K13) ได้จากการคัดเลือก และปรับปรุงพันธุ์ไหมลูกผสมช่วงแรก ระหว่าง K19 กับ K1 เริ่มทำการผสม และคัดเลือกพันธุ์ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2517 จนมีรูปร่างและลักษณะเป็นพันธุ์แท้สายพันธุ์ญี่ปุ่น ลักษณะเด่น มีความเหมาะสมในการใช้เป็นพ่อ หรือแม่พันธุ์ในการผลิตพันธุ์ไหมลูกผสมสามารถเลี้ยงได้ทุกฤดูกาล ลักษณะประจำพันธุ์ ไหมชนิดฟักออกในสภาพธรรมชาติปีละ 2 ครั้ง ลำตัวหอนอนมีลายดำที่ส่วนนอกและท้อง สีผิวเป็นสีขาวขุ่นอมเหลือง รังคอดเป็นรูปฝักถั่วลิสง เปลือกรังสีขาว ขนาดรังประมาณ 1.6 x 3.0 cm ผลผลิตรังสด 505 กรัมต่อแม่ อายุหอนอนไหมตั้งแต่ฟักออกเป็นตัวจนถึงทำรัง 20-21 วัน ผ่านการรับรองพันธุ์จากกรมวิชาการเกษตร เมื่อวันที่ 9 ธันวาคม พ.ศ. 2530

2. นครราชสีมา 60-2 (K6) ได้จากการคัดเลือกและปรับปรุงพันธุ์ไหม C132 ในปี พ.ศ. 2518 จนได้ลักษณะตามแบบพันธุ์แท้สายพันธุ์จีน เหมาะกับการใช้เป็นพันธุ์แท้เพื่อการผลิตไหมลูกผสมลักษณะเด่น เส้นใยยาวกว่า 1,000 m ลักษณะประจำพันธุ์ ไหมชนิดฟักออกในสภาพ

ธรรมชาติปีละ 2 ครั้ง ลำตัวหนอนสีเขียวปลอด สีผิวขาวขุ่นเมื่อแก่เต็มที่ (ใกล้สุก) ลำตัวค่อนข้างอ้วน สั้น รังเป็นรูปไข่ค่อนข้างกลม สีขาว ขนาด 2.0×3.3 cm เปลือกรัง 18.9% อายุหนอนใหม่ตั้งแต่ฟัก ออกถึงทำรัง 19-20 วัน ผ่านการรับรองพันธุ์จากกรมวิชาการเกษตร เมื่อวันที่ 9 ธันวาคม พ.ศ. 2530

3. อุบลราชธานี 60 ได้จากการคัดเลือกพันธุ์ลูกผสมกวางนองเบอร์ 3 (Guang Nong no.3) ที่ได้รับพระราชทานจากสมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี เมื่อปี พ.ศ. 2524 มา การคัดเลือกพันธุ์จนมีลักษณะเป็นไหมพันธุ์แท้สายพันธุ์ญี่ปุ่น ลักษณะเด่น มีความแข็งแรง เลี้ยงง่าย ทุกฤดูกาล ระยะเวลาเลี้ยงค่อนข้างสั้น ผลผลิตสูงกว่าพันธุ์พื้นเมือง 30% มีประสิทธิภาพในการให้ ลูกผสม เหมาะสำหรับใช้เป็นพ่อ หรือแม่พันธุ์ในการผลิตไขไหมลูกผสม ลักษณะประจำพันธุ์ ไหมชนิด ฟักออกในสภาพธรรมชาติปีละ 2 ครั้ง ลำตัวหนอนใหม่มีสีเขียวปลอด รูปร่างรังไหมคอดกลาง เปลือก รังสีขาว ขนาดรัง 1.4×3.0 cm เปลือกรัง 18% อายุหนอนใหม่ 18-19 วัน ผ่านการรับรองพันธุ์จาก กรมวิชาการเกษตรเมื่อวันที่ 18 กรกฎาคม พ.ศ. 2531

4. นางน้อยศรีสะเกษ-1 เป็นพันธุ์ไหมพื้นเมืองพันธุ์แท้ที่มีลักษณะอยู่ตัว ลักษณะเด่น จำนวนไขไหมสูง 348 ฟองต่อแม่ ลักษณะประจำพันธุ์ หนอนใหม่มีลำตัวสีขาวนวล อายุหนอนใหม่ 20 วัน รังไหมสีเหลืองหัวปานท้ายแหลม ดักแต่สมบูรณ์ 76.0% เปลือกรัง 13% ความยาวเส้นไหม 282 m ขนาดเส้นไหม 2.5 den ผ่านการรับรองพันธุ์จากกรมวิชาการเกษตร เมื่อวันที่ 19 ธันวาคม พ.ศ. 2531

5. นางน้อยสกลนคร (SP1) เป็นพันธุ์ไหมที่ได้จากการปรับปรุงพันธุ์โดยวิธีผสมกลับ จำนวน 6 ครั้ง ระหว่างพันธุ์นางน้อยศรีสะเกษ-1 ซึ่งเป็นตัวรับกับพันธุ์ บร.7 ที่สามารถแยกเพศได้ใน ระยะหนอนใหม่เป็นตัวได้ ลักษณะเด่น และลักษณะประจำพันธุ์ เป็นพันธุ์ไหมพื้นบ้านที่สามารถคัด แยกเพศได้ในระยะหนอนใหม่ โดยหนอนเพศเมียมีลำตัวลาย และหนอนใหม่เพศผู้มีลำตัวเรียบ (ไม่มีลาย) ผลผลิตรังไหมสูง 15 - 20 กิโลกรัมต่อแผ่น ผ่านการรับรองพันธุ์จากกรมวิชาการเกษตรเป็น พันธุ์แนะนำเมื่อวันที่ 2 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2547

ไหมลูกผสมจำแนกได้ตามสายพันธุ์ดังต่อไปนี้

1. นครราชสีมาลูกผสม 1 (K1 x K8) เป็นไหมลูกผสมระหว่างพันธุ์โคราช 1 กับ โคราช 8 กำเนิดการคัดเลือก และเปรียบเทียบพันธุ์ตั้งแต่ปี พ.ศ.2518 จนได้พันธุ์ที่มีความแข็งแรง และสามารถให้ผลผลิตที่มีคุณภาพดี นำออกสู่เกษตรกรปี พ.ศ. 2521 ลักษณะเด่น ไหมลูกผสมรังสีขาวให้ ผลผลิตเฉลี่ยประมาณ 25 กิโลกรัมต่อกล่อง สามารถนำไปเป็นวัตถุดิบในการผลิตไหมยีนได้เป็น อย่าง ดี ความยาวเส้นใยประมาณ 1,100 m มีความสามารถในการสาวออกสูง ลักษณะประจำพันธุ์ ไหม ชนิดฟักออกตามธรรมชาติปีละ 2 ครั้ง ลำตัวหนอนสีเขียวอมเทา มีจุดหรือแต้มบนลำตัวเห็นได้ชัด 3 จุด รังไหมมีลักษณะรูปไข่ สีขาว เนื้อรังแน่น ขนาดรังเฉลี่ย 2.0×4.5 cm เปลือกรัง 20% อายุหนอน ใหม่สั้นประมาณ 20 วัน ผ่านการรับรองพันธุ์จากกรมวิชาการเกษตร เมื่อวันที่ 29 ธันวาคม พ.ศ. 2529

2. นครราชสีมาลูกผสม 60 (เหลืองโคราช) เป็นไหมลูกผสมสามทาง ได้จากการผสม ระหว่างลูกผสมเดี่ยว K1 x K15 (สายพันธุ์ญี่ปุ่น - รังสีขาว) กับไหมพันธุ์แท้ KYP (สายพันธุ์จีน - รังสี เหลือง) โดยได้ดำเนินการทดสอบสมรรถนะการผสม (combining ability) ตลอดจนทดสอบในภาค

เกษตรกรตั้งแต่ปี พ.ศ. 2524 ถึงปี 2526 นอกจากนี้ขั้นตอนของการทดสอบในช่วงหลังยังครอบคลุมไปถึงการทดสอบคุณภาพเส้นใย และคุณภาพในด้านการทอเป็นผืนผ้าอีกด้วย ซึ่งหมั้นนครราชสีมา ลูกผสม 60 นี้ ได้เข้าสู่กระบวนการผลิตไหมออกให้เกษตรกรทำการเลี้ยงตั้งแต่ปี พ.ศ. 2527 เป็นต้นมา ลักษณะเด่น รังไหมสีเหลือง สามารถนำไปสาวเส้นพุ่งและเส้นยืนได้ เพราะมีลักษณะเส้นสีเหลืองเช่นเดียวกับพันธุ์พื้นเมือง ลักษณะประจำพันธุ์ไหมชนิดฟักออก ในสภาพธรรมชาติปีละ 2 ครั้ง ลำตัวหนอน สีค่อนข้างคล้ำ มีจุดประกระจายทั่วไป ในระยะแรกของวัย 4 โคนขาของส่วนท้องเป็น สีเหลือง ลักษณะรังเป็นทรงกระบอก หัวท้ายมน เนื้อรังแน่น สีเหลือง ขนาดเฉลี่ย 2.0 x 4.4 cm เปลือกรัง 19.6% อายุหนอนไหม 20-25 วัน ผ่านการรับรองพันธุ์จากกรมวิชาการเกษตร เมื่อวันที่ 9 ธันวาคม พ.ศ. 2530

3. ไหมลูกผสมอุบลราชธานี 60-35 การพัฒนาพันธุ์ไหมให้มีความแข็งแรง เลี้ยงง่าย เหมาะกับสภาพแวดล้อมของประเทศไทย เป็นปัจจัยสำคัญยิ่งในการเพิ่มผลผลิตรังไหม เส้นไหมให้เพียงพอสำหรับใช้ในประเทศ สถานีทดลองหม่อนไหมอุบลราชธานี ได้ดำเนินการปรับปรุงพันธุ์ไหมไทยลูกผสม โดยผสมพันธุ์ไหมอุบลราชธานี 60 กับนางน้อยศรีสะเกษ-1 ทำการทดสอบตามขั้นตอนของการปรับปรุงพันธุ์ จนกระทั่งได้พันธุ์ไหมไทยลูกผสมที่มีความแข็งแรง ขนาดลำตัวปานกลาง ลักษณะเด่นผลผลิตสูงกว่าพันธุ์พื้นเมืองที่ใช้เป็นพ่อ - แม่พันธุ์ ถึง 30% อายุหนอนไหมสั้น ทำให้ลดต้นทุนการผลิต และลดความเสี่ยงต่อการเกิดโรค สามารถเลี้ยงได้ตลอดปี ลักษณะประจำพันธุ์ รังไหมสีเหลือง หัวท้ายปานค่อนข้างกลม ขนาด 1.5 x 3.2 cm จำนวนไข่ไหมต่อแม่ 388 ฟอง อายุหนอนไหม 18 วัน เปอร์เซ็นต์ดักแด้สมบูรณ์ 94.9% น้ำหนักรังสด 1.40 กรัม น้ำหนักเปลือกรัง 22.5 cm เปลือกรัง 16.1% ความยาวเส้นใยต่อรัง 519 m ขนาดเส้นไหม 2.4 den การสาวง่าย 63% ผลผลิตรังสดต่อแผ่น 13-18 kg ผ่านการรับรองพันธุ์จากกรมวิชาการเกษตร เป็นพันธุ์รับรองในเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2535 และเพื่อเป็นการเฉลิมพระเกียรติ 60 พรรษา สมเด็จพระนางเจ้าฯ พระบรมราชินีนาถ ในปี พ.ศ. 2535 จึงได้ตั้งชื่อว่า "ไหมไทยลูกผสมอุบลราชธานี 60-35" หรืออีกชื่อหนึ่งว่า "ดอกบัว"

4. ไหมลูกผสมอุดรธานี เป็นไหมลูกผสมเดียวที่เกิดจากไหมพันธุ์ SKN1 ที่เป็นพันธุ์ไหมชนิดฟักออกปีละ 2 ครั้งในสภาพธรรมชาติ สายพันธุ์จีน รังสีขาว กับไหมพันธุ์เขี้ยวสกทที่เป็นไหมพันธุ์พื้นเมือง รังสีเหลือง ดำเนินการปรับปรุงพันธุ์ที่ศูนย์วิจัยหม่อนไหมอุดรธานี และสถานีทดลองเครือข่าย จนได้พันธุ์ไหมไทยลูกผสมที่เลี้ยงง่ายปรับตัวเข้ากับสภาพแวดล้อมได้ดี และเลี้ยงได้ผลตลอดปีในเขตจังหวัดอุดรธานี หนองบัวลำภู หนองคาย และเลย ลักษณะเด่นอายุของหนอนไหมพ่อ และแม่พันธุ์เท่ากัน ทำให้สะดวกในการผสมพันธุ์และผลิตไข่ไหม จำนวนไข่ไหม และน้ำหนักหนอนไหมโตเต็มที่สูงกว่ามาตรฐาน (ไหมไทยลูกผสมอุบลราชธานี 60-35) มีความต้านทานต่อโรคแกรสเซอร์ (nuclear polyhedrosis virus) และมีอัตราการเลี้ยงรอดของระยะหนอนไหมวัยอ่อนค่อนข้างสูง ลักษณะประจำพันธุ์สีของไข่ไหมสีขาวอมเหลือง สีของลำตัวหนอนไหมสีเหลืองอ่อนขนาดลำตัวหนอนไหม 1.50 x 8.00 cm รูปร่างรังไหมยาวรี ขนาดรังไหม 1.75 x 3.65 cm รังไหมและเส้นไหมมีสีเหลือง จำนวนไข่ไหมต่อแม่ 495 ฟอง ระยะหนอนไหม 19 วัน ดักแด้สมบูรณ์ 91.12% เปลือกรัง 17.12% ขนาดเส้นไหม 2.27 den ความยาวเส้นใยต่อรัง 677 m การสาวง่าย 66% ผ่านการรับรองพันธุ์จากกรมวิชาการเกษตร เป็นพันธุ์แนะนำ เมื่อวันที่ 29 มีนาคม พ.ศ. 2542

5. ไหมไทยลูกผสมสกนกร 1 เป็นไหมลูกผสมเดี่ยวที่เกิดจากผสมพันธุ์ระหว่างไหมพันธุ์ไทย SP1 กับไหมพันธุ์ลูกผสมรังสีขาว SB2 ที่ปรับปรุงพันธุ์โดยสถานีทดลองหม่อนไหมสกนกร เพื่อให้ได้พันธุ์ไหมที่มีความแข็งแรง และให้ผลผลิตสูงแนะนำให้เกษตรกรในเขตพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนบน เช่น จังหวัดสกนกร นครพนม และมุกดาหาร ลักษณะเด่น คือ มีพ่อแม่พันธุ์ที่สามารถคัดแยกพันธุ์ได้ในระยะหนอนไหม ทำให้การผลิตไหมสะดวกมากขึ้น และเป็นการลดต้นทุนการผลิตไหมโดยประหยัดแรงงานในการคัดแยกเพศ นอกจากนี้ไหมไทยลูกผสมสกนกรยังมีความแข็งแรง เลี้ยงได้ตลอดปีให้ผลผลิตสูงกว่าพันธุ์ไหมไทยลูกผสมอุบลราชธานี 60-35 จำนวนไขไหมต่อแม่ และน้ำหนักรังสดสูงกว่าความยาวเส้นใยยาว และสาวง่ายกว่า ลักษณะประจำพันธุ์สีของลำตัวหนอนไหม เพศเมียมีลาย เพศผู้ขาวปลอด ขนาดลำตัวหนอนไหม 0.90-7.00 cm รูปร่างรังไหม ยาวรี ขนาดรังไหม 4.8 x 3.5 cm รังไหม และเส้นไหมสีเหลือง ลักษณะทางการเกษตรจำนวนไขไหมต่อแม่ 540 ฟอง อายุหนอนไหม 19.09 วัน การเลี้ยงรอดวัยอ่อน 90.55% ดักแด้สมบูรณ์ 92.07% น้ำหนักรังสดเฉลี่ย 1 รัง 1.75 g น้ำหนักเปลือกรังเฉลี่ย 1 รัง 28.33 cm เปลือกรัง 16.01% ขนาดเส้นไหม 2.45 den ความยาวเส้นใยต่อรัง 865 m การสาวง่าย 71.50% ผลผลิตรังสดต่อแผ่น 21.40 kg ผ่านการรับรองพันธุ์จากกรมวิชาการเกษตรเป็นพันธุ์แนะนำ เมื่อวันที่ 29 มีนาคม พ.ศ. 2542

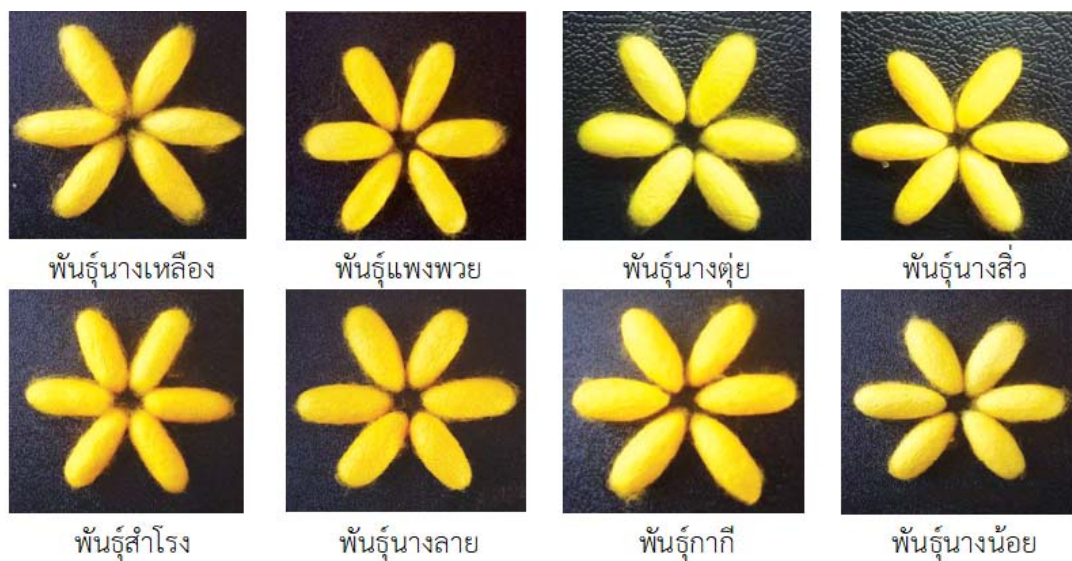
6. ไหมไทยลูกผสมสกนกร 2 เป็นไหมลูกผสมเดี่ยวที่เกิดจากการผสมพันธุ์ระหว่างไหมไทยพันธุ์ SP1 กับไหมลูกผสมรังสีขาว SB7 ดำเนินการปรับปรุงพันธุ์ที่สถานีทดลองหม่อนไหมสกนกร เพื่อให้ได้พันธุ์ไหมที่มีความแข็งแรง และต้านทานต่อเชื้อโรคแกรสเซอร์ และให้ผลผลิตสูงแนะนำให้เกษตรกรในเขตพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนบน จังหวัดสกนกร นครพนม มุกดาหาร และกาฬสินธุ์ ลักษณะเด่น คือ เป็นพันธุ์ไหมที่มีความแข็งแรง และต้านทานต่อเชื้อโรคแกรสเซอร์ มีเส้นใยยาว และสาวง่าย ให้ผลผลิตต่อแผ่นไขไหม 25-30 kg ลักษณะประจำพันธุ์ หนอนไหมเพศเมียลำตัวลาย หนอนไหมเพศผู้มีลำตัวเรียบ ลักษณะทางการเกษตร มีจำนวนไขไหมต่อแม่สูง (530 ฟอง) มีเส้นใยยาว (1,046 m) และสาวง่าย (77%) ผ่านการรับรองพันธุ์จากกรมวิชาการเกษตรเป็นพันธุ์แนะนำ เมื่อวันที่ 23 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2547

7. ไหมไทยลูกผสมพันธุ์เหลืองไฟโรจน์ ซึ่งเกิดจากการนำไหมญี่ปุ่นพันธุ์ J108 ผสมกับไหมไทยแท้ “พันธุ์นางลาย” และตั้งชื่อเพื่อเป็นเกียรติแก่อธิบดีกรมหม่อนไหมคนแรก คือ นายไฟโรจน์ ลิมจำรูญ ทั้งนี้ พบว่าไหมไทยพันธุ์เหลืองไฟโรจน์ มีความเหมาะสมที่จะนำไปส่งเสริมให้เกษตรกรเลี้ยง เนื่องจากเลี้ยงง่าย มีความแข็งแรง ให้ผลผลิตรังที่ดี และรังมีคุณภาพ เมื่อเปรียบเทียบกับไหมพันธุ์ที่เกษตรกรนิยมเลี้ยง คือ พันธุ์ดอกบัว โดยรังไหม 1 รัง ได้เส้นไหมยาวประมาณ 700-800 m ดังนั้นจึงเป็นพันธุ์ไหม ที่เหมาะสมส่งเสริมให้นำไปใช้ได้ระดับหัตถอุตสาหกรรมและอุตสาหกรรมได้

ไหมพันธุ์ไทยพื้นบ้านเป็นพันธุ์ไหมชนิดฟักออกตลอดปีในสภาพธรรมชาติ เป็นแหล่งวัตถุดิบสำคัญในการผลิตผ้าไหมไทยจนได้รับความนิยมไปทั่วโลก ปัจจุบันพันธุ์ไหมดังกล่าวกำลังลดจำนวนลง เพราะเกษตรกรบางส่วนนิยมเลี้ยงไหมพันธุ์ลูกผสมรังสีขาวที่ให้ผลตอบแทนสูงกว่า หรือซื้อ และใช้เส้นไหมกลอบมาทอเป็นผืนผ้า ทำให้ผ้าไหมไทยมีคุณภาพลดลง และขาดเอกลักษณ์ของความเป็นผ้าไหมไทยที่แท้จริง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องดำเนินการเก็บรวบรวมละศึกษาพันธุ์ไหมไทยพื้นบ้านเพื่อ

อนุรักษ์ และเป็นแหล่งรวบรวมเชื้อพันธุกรรมไว้ไม่ให้สูญหายไปจากประเทศไทย พันธุ์ใหม่ที่ได้รวบรวมพันธุ์ไว้มีดังนี้

1. นางเหลือง เป็นพันธุ์ใหม่ที่ให้ไขใหม่ 358 ฟองต่อแม่ หนองใหม่มีลำตัวสีเหลือง อายุ หนองใหม่ 19 วัน รังสีเหลือง หัวบ้านท้ายแหลม ดักแต่สมบูรณ์ 88.8% เปลือกรัง 13% ความยาวเส้นไหม 250 m ขนาดเส้นไหม 2.4 den
2. นางลาย เป็นพันธุ์ใหม่ที่ให้ไขใหม่ 331 ฟองต่อแม่ หนองใหม่มีลายขาวดำตลอด ลำตัว อายุหนองใหม่ 20 วัน รังไหมสีเหลือง หัวบ้านท้ายแหลม ดักแต่สมบูรณ์ 84.0% เปลือกรัง 12% ความยาวเส้นไหม 258 ขนาดเส้นไหม 2.9 den
3. ชย.1 เป็นพันธุ์ใหม่ที่ให้ไขใหม่ 325 ฟองต่อแม่ หนองใหม่มีลำตัวสีขาว อายุหนองใหม่ 22 วัน รังไหมสีเหลือง หัวบ้านท้ายแหลม ดักแต่สมบูรณ์ 84.4% เปลือกรัง 12%
4. ชย.2 เป็นพันธุ์ใหม่ที่ให้ไขใหม่ 350 ฟองต่อแม่ หนองใหม่มีลำตัวสีขาว อายุหนองใหม่ 23 วัน รังสีเหลือง หัวบ้านท้ายแหลม ดักแต่สมบูรณ์ 83.8% เปลือกรัง 12%
5. ชย.3 เป็นพันธุ์ใหม่ที่ให้ไขใหม่ 341 ฟองต่อแม่ หนองใหม่มีลำตัวสีขาว อายุหนองใหม่ 20 วัน รังไหมสีเหลือง หัวบ้านท้ายแหลม ดักแต่สมบูรณ์ 89.9% เปลือกรัง 14%
6. แพงพวย เป็นพันธุ์ใหม่ที่ให้ไขใหม่ 302 ฟองต่อแม่ หนองใหม่มีลำตัวขาวปลอด อายุ หนองใหม่ 20 วัน รังไหมสีเหลือง หัวบ้านท้ายแหลม ดักแต่สมบูรณ์ 94.0% เปลือกรัง 12%
7. นางไหม เป็นพันธุ์ใหม่ที่ให้ไขใหม่ 317 ฟองต่อแม่ หนองใหม่มีลำตัวสีขาว มีจุดประ อายุหนองใหม่ 20 วัน รังไหมสีเหลือง หัวบ้านท้ายบ้าน ดักแต่สมบูรณ์ 95.8% เปลือกรัง 12%
8. สำโรง 1 เป็นพันธุ์ใหม่ที่ให้ไขใหม่ 309 ฟองต่อแม่ หนองใหม่มีลำตัวสีขาว รังไหมสีเหลือง หัวบ้านท้ายแหลม ดักแต่สมบูรณ์ 91.2% เปลือกรัง 11%
9. โนนภาชี เป็นพันธุ์ใหม่ที่มีจำนวนไขใหม่ 383 ฟองต่อแม่ หนองใหม่มีลำตัวสีขาว อายุ หนองใหม่ 20 วัน รังไหมสีเหลือง หัวบ้านท้ายแหลม ดักแต่สมบูรณ์ 91.2% เปลือกรัง 13%
10. เขียวสกล เป็นพันธุ์ใหม่ที่มีจำนวนไขใหม่ 380 ฟองต่อแม่ หนองใหม่มีลำตัวสีเขียว อายุหนองใหม่ 22 วัน รังไหมสีเหลือง หัวบ้านท้ายแหลม ดักแต่สมบูรณ์ 95.2% เปลือกรัง 13%
11. กากี เป็นพันธุ์ใหม่ที่มีจำนวนไขใหม่ 380 ฟองต่อแม่ หนองใหม่มีลำตัวสีขาว อายุ หนองใหม่ 20 วัน รังไหมสีเหลือง หัวบ้านท้ายแหลม ดักแต่สมบูรณ์ 92.3% เปลือกรัง 13%
12. เนื้อสีตุ่น เป็นพันธุ์ใหม่ที่มีจำนวนไขใหม่ 293 ฟองต่อแม่ หนองใหม่มีลำตัวสีขาวนวล อายุหนองใหม่ 21 วัน รังไหมสีจำปา หัวบ้านท้ายแหลม ดักแต่สมบูรณ์ 89.0% เปลือกรัง 11%
13. เป็ยหัวแดง เป็นพันธุ์ใหม่ที่มีจำนวนไขใหม่ 335 ฟองต่อแม่ หนองใหม่มีลำตัวขาวปลอด อายุหนองใหม่ 21 วัน รังไหมสีเหลือง หัวบ้านท้ายแหลม ดักแต่สมบูรณ์ 82.8% เปลือกรัง 12%



ภาพที่ 2.2 แสดงลักษณะรังไหมพันธุ์ไทยพื้นบ้านพันธุ์ต่าง ๆ
ที่มา: ดัดแปลงจาก ศิริพร บุญชู และคณะ (2557)

การคัดเลือกรังไหม

การสาวไหมให้ได้เส้นไหมคุณภาพดี เกษตรกรจะต้องทำการตรวจสอบคุณภาพรังไหมพันธุ์ไทยพื้นบ้านเพื่อพิจารณาลักษณะรังไหมที่ไม่สมบูรณ์หรือรังเสียและรังดี ดำเนินการคัดเลือกรังไหมโดยแยกรังดีออกจากรังเสีย และนำรังไหมดีไปทำการสาวเพื่อให้ได้เส้นไหมที่มีคุณลักษณะเส้นกลม ขนาดสม่ำเสมอ เรียบ มีคุณภาพที่ดี กรมหม่อนไหม (2554) กล่าวถึงลักษณะรังไหมที่ควรคัดออกมี 11 ลักษณะ ดังนี้

1. รังไหมเปื้อนภายนอก (outer soiled cocoon) เกิดจากสารขับถ่ายของหนอนไหมครั้งสุดท้ายก่อนรังสารขับถ่ายทิ้งของเหลว บางคนเรียก ปัสสาวะ และมูลไหม เปื้อนรังไหมปกติที่อยู่ในจ่อเดียวกันส่วนใหญ่เป็น เพราะเก็บหนอนไหมที่สุกไม่เท่ากันเข้าจ่อ หนอนที่รังภายหลังจะขับถ่ายออกมาเปื้อนรังที่จ่อ ก่อน บางครั้งเกิดจากการจับหนอนไหมที่อ่อนแอเข้าจ่อ การสาวไหมจากรังประเภทนี้ให้เส้นไหมคุณภาพไม่ดีกรณีรังไหมเปื้อนส่วนนอกสุดเพียงเล็กน้อยอาจมีผลกระทบต่อเส้นไหมไม่มาก แต่ถ้าสารขับถ่ายซึมเปื้อนมาก หรือเป็นเวลานานจะให้สาวดึงเส้นยากรัง และเส้นไหมเปื้อนง่ายเวลาต้มสาวไหม เนื่องจากสารขับถ่ายจากหนอนไหมมีฤทธิ์เป็นด่าง

2. รังไหมเปื้อนภายใน (inner soiled cocoon) เกิดจากหนอนไหมตายขณะรัง หรือตายหลังจากรังเสร็จซึ่งอาจเกิดจากดักแด้ได้รับการกระทบกระแทกตายขณะขนส่ง ส่วนใหญ่ พบว่ารังไหมดังกล่าวมีความหนาของเปลือกน้อยกว่ารังปกติของเหลวจากหนอนไหม และดักแด้ที่ตายเปื้อนติดภายในรังมีสีน้ำตาลถึงน้ำตาลเข้มเกือบดำนอกจากมีผลให้เส้นไหมที่สาวได้มีสีคล้ำดำเส้นสกปรกแล้วยังมีผลต่อโปรตีนไหม ดังนั้นเมื่อนำรังไหมประเภทนี้ไปต้มสาวเส้น ให้ประสิทธิภาพในการรวมตัวต่ำสาวออกยาก เส้นไหมรวมตัวไม่ดี เกิดหวั่ง และมีเศษไหมมากนอกจากนี้ความเหนียว และความยืดหยุ่นของเส้นไหมลดลงด้วย

3. รังไหมบาง (thin shell cocoon) สาเหตุส่วนใหญ่เกิดจากหนอนไหมเป็นโรค อ่อนแอ ให้รังได้ไม่สมบูรณ์ คือ พนใยรังได้เพียงเล็กน้อยแล้วก็ตาย ลักษณะรังบางมักพบร่วมกับการที่หนอนไหมไม่สามารถพัฒนาเป็นดักแด้สมบูรณ์ และเกิดรังเปื้อนภายในได้ด้วยอีกสาเหตุหนึ่งของการเกิดรังบางคือคุณภาพ คือ การจับไหมเข้าจ่อเข้าเกินไป หนอนไหมเริ่มพ่นใยไปแล้ว จนเหลือปริมาณสารไหมน้อยเมื่อจับเข้าจ่อจึงสร้างรังได้บาง รังที่บางมีผลให้สาวเส้นไหมได้น้อย และเมื่อนำมาต้มสาวไหมร่วมกับรังปกติ รังบางจะนิ่มเร็วกว่าจึงเป็นอุปสรรคในการสาวไหม นอกจากนี้รังบางยังเป็นปัจจัยให้เกิดรังบุบได้ง่ายด้วย เส้นไหมที่สาวได้จึงต่อคุณภาพลง มีรูปร่างผิดปกติมีกาว และปนจากการต่อเส้นมาก

4. รังไหมติดข้างจ่อ (frame printed cocoon) สาเหตุส่วนใหญ่เกิดจากการใช้จ่อไม่เหมาะสมมีพื้นที่ในการรังแคบ หรือจับหนอนไหมใส่จ่อมากเกินไปให้รังเบียดกัน กาวเซริซินจึงกดทับติดกัน หรือติดกับข้างจ่อ กระจาดรองจ่อ ผู้เลี้ยงส่วนหนึ่งสังเกต พบว่ารังประเภทนี้มีมากขึ้น ถ้าช่วงแรกของการรังเป็นช่วงที่อากาศมีอุณหภูมิและความชื้นสูง การที่รังไหมมีส่วนใดส่วนหนึ่งของเส้นไหมแห้งแข็งเนื่องจากการเบียดทับกัน ให้สาวเส้นออกได้ไม่ดีเมื่อเทียบกับรังปกติ จึงเป็นอุปสรรคในการสาวไหม

5. รังไหมผิดรูปร่าง (malformed cocoon หรือ Deformed cocoon) เป็นรังไหมที่มีรูปร่างบิดเบี้ยวไม่สมส่วน ลักษณะไม่ตรงตามพันธุ์ อาจเนื่องมาจากลักษณะจ่อที่ไม่เหมาะสม หรือหนอนไหมอ่อนแอรังได้ไม่สมบูรณ์ หรืออาจเป็นลักษณะประจำของพันธุ์ไหม เมื่อนำรังผิดรูปร่างไปต้มสาวไหม รังมักจะสุกอ่อนตัวไม่สม่ำเสมอ และไม่พร้อมกับการที่สาวรวมกัน อย่างไรก็ตามรังผิดรูปร่างมีผลกระทบต่อสาวไหม และคุณภาพเส้นน้อยกว่าการสาวจากรังติดข้างจ่อ

6. รังไหมบางหัวท้าย (thin end cocoon) อาจเป็นลักษณะประจำของพันธุ์ไหม หรือเกิดจากอุณหภูมิ และความชื้นไม่เหมาะสมในช่วงเลี้ยงไหม เช่น อากาศเย็นเกินไประหว่างหนอนไหมรัง เมื่อนำมาสาวไหมมักพบปัญหา คือ ส่วนหัวท้ายของรังที่บางจะนิ่มเร็วกว่าส่วนอื่น ๆ เส้นไหมมักจะขาดหลุดให้สาวยาก และได้เส้นไหมไม่เรียบ

7. รังไหมหลวม หรือรังหลวมฟู (flossy cocoon) บางครั้งหมายถึงรังไหมที่เปลือกรังหลวม และมีหลายชั้น หรือ loose shell cocoon รังเหล่านี้เมื่อจับดูจะรู้สึกเนื้อรังฟู นิ่มผิดปกติ เมื่อผ่าดูอาจพบมีเปลือกรังหลายชั้นไม่ติดกัน ดังนั้นในบางครั้งเรียกรังชนิดนี้ว่า double layer cocoon เกิดจากสภาพแวดล้อมระหว่างรังไม่เหมาะสม ส่วนใหญ่เป็น เพราะอุณหภูมิสูง และแห้ง หรืออุณหภูมิและความชื้นเปลี่ยนแปลงกะทันหันเป็นช่วง ๆ หรืออาจเพราะมีลมแรงระหว่างรัง นอกจากนี้อาจเป็นลักษณะพันธุ์ไหมก็ได้ เมื่อนำรังหลวมไปต้มสาวไหม พบว่ารังนิ่มได้ง่าย และเส้นไหมมักจะขาดหลุดบ่อย ๆ จากการที่เปลือกรังไหมแยกเป็นชั้น ๆ

8. รังไหมแฝด (double cocoon) เป็นรังไหมที่เกิดจากหนอนไหมตั้งแต่ 2 ตัวทำรังร่วมกัน อาจเนื่องจากลักษณะประจำพันธุ์ หรือเกิดจากลักษณะจ่อไม่เหมาะสม จ่อไม่เพียงพอ ส่วนใหญ่เกิดจากการจับไหมเข้าจ่อมากเกินไป นอกจากนี้ยังสังเกตพบว่า อากาศที่ร้อนในช่วงทำรัง ทำให้หนอนไหมเจริญเติบโตเร็วกว่าปกติ จะมีรังแฝดมากขึ้น การสาวรังแฝดจะสาวออกยาก เส้นไหมติดและขาดหลุดง่าย เพราะเส้นไหมจาก 1 รังเกิดจากเส้นไหมมากกว่า 1 เส้นพันเกี่ยวเนื่องกัน เส้นไหมที่ได้ไม่เรียบ

9. รังไหมเจาะ (pierced cocoon) รังประเภทนี้ถือได้ว่าเป็นรังเสียโดยแท้จริง เพราะรังไหมถูกเจาะเป็นรูจึ่งเท่ากับเส้นไหมถูกตัดให้ขาดทั้งเส้นเวลานำไปสาวเส้นจึงขาดบ่อย ๆ เป็นช่วง ๆ ทุกครั้งที่ดึงผ่านรอยขาด รังที่ถูกเจาะเป็นรูมักเกิดจากการกัดเจาะรังของแมลงวันลาย มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า แมลงวันกันชน ซึ่งเข้าวางไข่ตั้งแต่ระยะหนอนไหมมดเจาะรัง หรืออาจเกิดจากผีเสื้อไหมเองก็ได้ ดังนั้น รังประเภทนี้เป็นรังที่สาวไม่ได้ บางตำราระบุชัดเจนว่า Impossible in Reeling

10. รังไหมขึ้นรา (moldy cocoon) สาเหตุส่วนใหญ่เกิดจากรังไหมสดที่เก็บรวมกันในที่อากาศถ่ายเทไม่ดี หรือปริมาณรวมกันมากเกินไปจนสะสมความร้อน เกิดเป็นปัจจัยที่เหมาะสมกับการเจริญของเชื้อรา หรือเกิดจากการอบแห้งรังไหมไม่สมบูรณ์ อาจเกิดจากควบคุมความชื้นในห้องเก็บรังไหมไม่ดีพอ รังไหมแห้งที่มีความชื้น 15% หรือมากกว่านี้มักเกิดเชื้อราได้ง่ายรา จะให้เส้นไหมเสื่อมคุณภาพ ความยืดตัว (elongation) ลดลงซึ่งเกิดจากการย่อยสลายไหมขณะเชื้อราเจริญเติบโต ถ้านำรังขึ้นราไปสาวเส้น เส้นขาดหลุดง่าย เส้นไหมไม่เรียบ สีซีด และดูสกปรก ความเหนียวและการยืดตัวลดลง

11. รังไหมบอบ (crashed cocoon) สาเหตุเกิดจากการกดทับ ส่วนมากเนื่องจากไม่ระมัดระวังในการการขนส่ง ทำให้เกิดการกระทบกระเทือน ได้แก่ การขนส่งรังไหมโดยไม่ใช้ภาชนะบรรจุที่สามารถป้องกันการกระทบได้ รวมทั้งการขนส่งรังสดเป็นระยะทางไกล ใช้เวลาขนส่งนาน ความร้อนชื้นที่สะสมภายในกองรังไหม ทำให้รังนิ่มและถูกกดทับบอบได้ง่าย การกดทับที่รุนแรงทำให้เส้นใยหักแตกได้ ดังนั้นเมื่อนำรังประเภทนี้ไปสาวจะเกิดการขาดได้บ่อย ๆ บริเวณที่รังบอบ

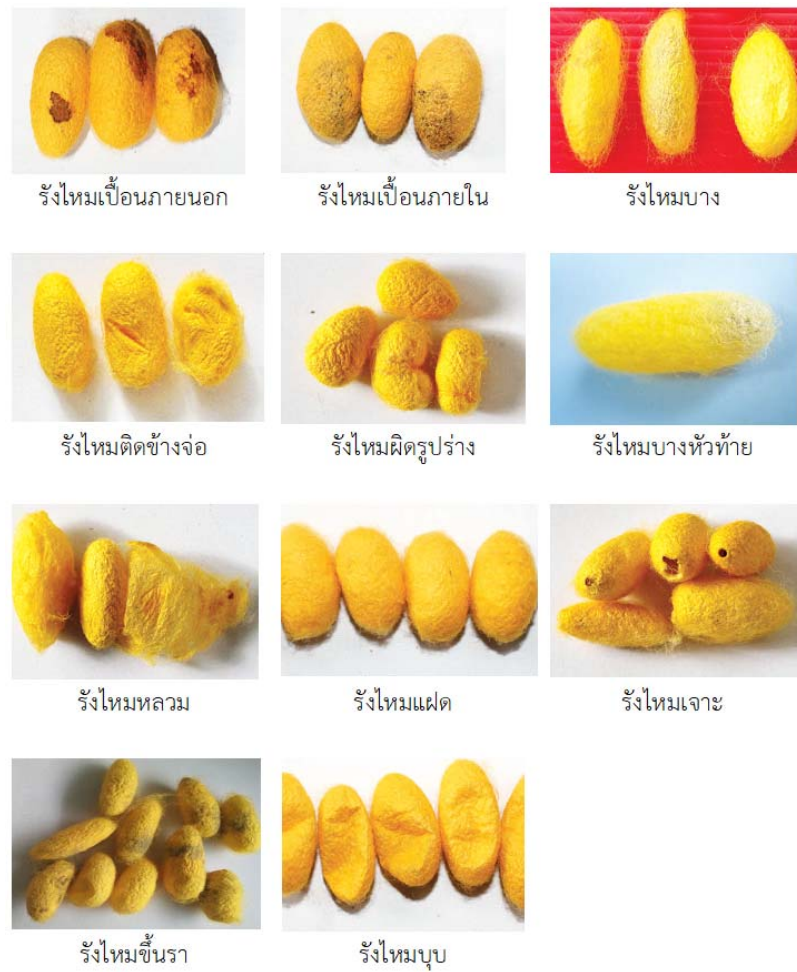
องค์ประกอบเส้นไหม

ไหมเป็นวัสดุสิ่งทอที่ได้จากธรรมชาติเป็นเส้นใยโปรตีนคล้ายกับเส้นผม หรือขนสัตว์ คีรีพร บุษพู และคนะ (2557) กล่าวถึงองค์ประกอบเส้นไหมซึ่งมีดังนี้

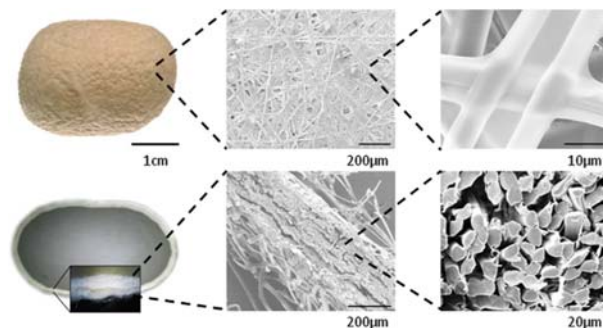
1. ไฟโบรอิน (fibroin) เป็นโปรตีนที่เป็นองค์ประกอบหลักในเส้นไหม โดยทั่วไปเส้นไหมมีไฟโบรอินเป็นองค์ประกอบร้อยละ 70-80 ขององค์ประกอบทั้งหมด ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการทอเป็นผืนผ้าไหม เนื่องจากไฟโบรอินเป็นส่วนของโปรตีนที่ไม่ละลายในน้ำและจะยังคงอยู่หลังกระบวนการฟอกขาวไหม ไฟโบรอินจึงเป็นเส้นใยที่ใช้ในการทอผ้าไหม

2. เซรีซิน (sericin) หรือที่เรียกว่า กาวไหม เป็นโปรตีนที่เป็นองค์ประกอบสำคัญของเส้นไหมอีกชนิดหนึ่ง โดยในเส้นไหมมีเซรีซินเป็นองค์ประกอบร้อยละ 20-30 ขององค์ประกอบทั้งหมดของเส้นไหม ที่ทำหน้าที่เป็นกาวเคลือบเส้นไฟโบรอินซึ่งเป็นเส้นใยต่อเนื่อง จำนวน 2 เส้นให้ยึดติดกัน โปรตีนชนิดนี้ละลายในน้ำ ดังนั้นจึงถูกลอกออกไปในระหว่างการฟอก(ลอก)กาวไหม

3. เส้นไหมนอกจากมีองค์ประกอบหลักของโปรตีนสองชนิดแล้ว ยังมีส่วนประกอบอื่นๆ อีก ได้แก่ ไชมันหรือแร็กซ์ จำนวนร้อยละ 0.4-0.8 สารไฮโดรคาร์บอน (hydrocarbon) จำนวนร้อยละ 1.2-1.6 สีที่ปรากฏตามธรรมชาติ (pigment) จำนวนร้อยละ 0.2 และเถ้าจำนวนร้อยละ 0.7



ภาพที่ 2.3 แสดงลักษณะรังไหมเสีย
ที่มา: ดัดแปลงจาก ศิริพร บุญชู และคณะ (2557)



ภาพที่ 2.4 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของรังไหมสายพันธุ์ *Bombyxmori*
ที่มา: Chen et al. (2012)

การผลิตเส้นไหม

วิธีการสาวไหมเป็นกระบวนการที่สำคัญในการผลิตให้ได้เส้นไหมไทยที่มีคุณภาพมาตรฐานตามต้องการ สมหญิง ชูประยูร (2557) ได้กล่าวถึงการผลิตเส้นไหม การสาวไหมเป็นกรรมวิธีในการผลิตเส้นไหม โดยการดึงเส้นใยไหมออกมาจากรังไหมที่ได้จากการเลี้ยงไหม ปัจจุบันสามารถทำการสาวไหมได้หลายวิธี สำหรับการสาวไหมในประเทศไทยสามารถจำแนกได้เป็น 2 รูปแบบคือ การสาวไหมแบบหัตถกรรมหรือหัตถอุตสาหกรรม และการสาวไหมแบบอุตสาหกรรม ระบบการผลิตเส้นไหมไทยคุณภาพโดยใช้เครื่องสาวไหมขนาดเล็ก ประกอบด้วย 4-6 หัวสาว ที่ได้จากการศึกษาวิจัยสู่ภาคปฏิบัติ เพื่อให้เกษตรกรและผู้ประกอบการที่สนใจได้นำไปประยุกต์ใช้ โดยได้ผ่านการทดสอบกับกลุ่มตัวอย่างเกษตรกรที่ร่วมโครงการแล้ว รายละเอียดขั้นตอนดังนี้

1. การเตรียมรังไหมก่อนการต้มรังไหม จะต้องมีการคัดแยกกระหว่างรังดีและรังเสีย
2. การต้มรังไหม คือ การนำรังไหมที่ผ่านการคัดแยกคุณภาพแล้ว มาทำการต้มเพื่อที่จะให้น้ำเข้าไปแทนที่อากาศที่อยู่ในเปลือกรังและละลายกาว อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการต้มคือ ให้เริ่มต้นที่อุณหภูมิประมาณ 60 °C ใช้เวลาประมาณ 10 นาที จากนั้นให้เพิ่มอุณหภูมิเป็นประมาณ 95 °C ต้มประมาณ 10-15 นาที ทั้งนี้ให้มีการสังเกตคุณลักษณะรังไหมที่ต้มประกอบด้วยว่าเปลือกมีการดูดซับน้ำเต็มที่แล้วหรือยัง หากรังไหมต้มได้คุณภาพก็จะเห็นรังไหมชุ่มฉ่ำน้ำและใส เปลือกรังจะมีความยืดหยุ่นดี การต้มรังไหมได้ดีตามที่ได้อธิบายมาแล้วจะทำให้เปอร์เซ็นต์การสาวไหมได้สูงและสาวง่าย ทำให้เส้นไหมที่สาวได้มีคุณลักษณะดี มีคุณภาพ ข้อควรระวังคือปริมาณรังไหมที่ต้มจะต้องให้เหมาะสมกับขนาดของหม้อต้มรังไหม และน้ำต้มสามารถแทรกซึมเข้าไปในรังไหมได้อย่างทั่วถึง
3. การสาวไหมด้วยเครื่องสาวไหมกึ่งอัตโนมัติหรือการสาวไหมของโรงสาวไหมชุมชน ทาการเตรียมเครื่องสาวไหมเพื่อการพร้อมสาว น้ำสาวไหมมีอุณหภูมิที่ระดับ 35-40 °C มีการติดตั้งลูกแก้ว(dinierel) เพื่อควบคุมขนาดของเส้นไหม ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญในการที่จะผลิตเส้นไหมให้ได้ขนาดมาตรฐาน ในการสาวเส้นไหมในแต่ละครั้งนอกจากที่จะใช้ลูกแก้วควบคุมขนาดแล้วยังคงต้องมีการนับจำนวนรังไหมที่จะเริ่มต้นในการสาวเส้นไหมแต่ละขนาดควบคู่กันไปด้วย เช่น ผลิตเส้นไหมขนาด 150/200 den จำนวนรังไหม 60-70 รัง เป็นต้น นอกจากนี้ในการสาวไหมในแต่ละครั้งมีความจำเป็นที่จะต้องคอยดูแลว่าจะต้องทำการเปลี่ยนถ่าน้ำสาวไหมหรือไม่เพราะหากน้ำสาวไหมสกปรกมากเกินไปก็จะส่งผลทำให้สีของเส้นไหมดำ ทำให้ราคาเส้นตกต่ำตามไปด้วย

เส้นไหมที่ดีต้องมีลักษณะกลม ขนาดสม่ำเสมอ ในการสาวรังไหมทดสอบนั้นเกิดการหยุดระหว่างดำเนินการเนื่องมาจาก เส้นไหมขาด เกิดการร่วงขาดบ่อยครั้ง และมีเศษเส้นไหมมากขึ้นด้วย ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่าในการสาวไหมครั้งนั้นมีการสาวยากหรือมีค่าการสาวง่ายต่ำ จึงไม่เหมาะที่จะผลิตเส้นไหม การสาวรังไหมได้ง่ายหรือยากนั้นขึ้นกับ ลักษณะทางกายภาพของรังไหมเช่น ความแข็งแรงและการรวมกันแน่นของเส้นไหม รวมถึงการเตรียมรังไหมก่อนสาว เช่น การอบรังไหม การจัดเก็บรังไหม อีกทั้งประสิทธิภาพเครื่องสาว และทักษะของผู้สาวไหม เปอร์เซ็นต์การสาวง่ายคำนวณได้ดังนี้ (Babu, 2003)

$$\text{เปอร์เซ็นต์การสาวง่าย} = \left(\frac{\text{จำนวนรังไหมที่สาวได้}}{\text{จำนวนครั้งในการป้อนรังไหม}} \right) \times 100 \quad (2.1)$$

วิธีชักตัวอย่างและทดสอบเส้นไหมสาวด้วยเครื่องจักร

คณะกรรมการสินค้าเกษตรกำหนดมาตรฐานสินค้าเกษตร โดยได้กำหนดวิธีชักตัวอย่างและการทดสอบเพื่อระบุชั้นคุณภาพของเส้นไหมดิบที่สาวด้วยเครื่องจักร ตามข้อกำหนดใน มกษ. 8002-2556 เส้นไหมดิบ เล่ม 2: เส้นไหมสาวด้วยเครื่องจักร เพื่อส่งเสริมสินค้าเกษตรให้ได้คุณภาพและปลอดภัย ดังนี้ (สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ, 2558)

การทดสอบเพื่อหาค่าเบี่ยงเบน (size deviation test) ของขนาดเส้นไหมดิบ

1. สุ่มเส้นไหมดิบตัวอย่างส่งห้องปฏิบัติการที่กรอเข้าแกนหลอดมาตรฐานแล้ว จำนวน 40 หลอด แบ่งเป็นเส้นไหมดิบที่กรอจากด้านนอก 20 หลอด และด้านใน 20 หลอด นำมาเข้าเครื่องกรอเพื่อเตรียมเช็ดไหมตัวอย่างทดสอบขนาด (sizing skein) โดยกำหนดความยาวและจำนวนตามขนาดเส้นไหมดิบ ดังนี้
 - เส้นไหมดิบ ขนาด 33 den หรือเล็กกว่า ใช้เช็ดไหมตัวอย่างทดสอบยาว 450 m จำนวน 200 เช็ด
 - เส้นไหมดิบ ขนาด 34 den ถึง 69 den ใช้เช็ดไหมตัวอย่างทดสอบยาว 112.5 m จำนวน 400 เช็ด
 - เส้นไหมดิบ ขนาด > 69 den ใช้เช็ดไหมตัวอย่างทดสอบยาว 56.25 m จำนวน 200 เช็ด
2. นำเช็ดไหมตัวอย่างทดสอบขนาดมาชั่งหามวลโดยแยกแต่ละเช็ด บันทึกค่ามวลที่ได้เพื่อนำไปคำนวณขนาดเส้นไหมดิบ โดยเส้นไหมยาว 9,000 m หนัก 1 g มีค่าเท่ากับขนาด 1 den
3. อบเช็ดไหมตัวอย่างทดสอบขนาดด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนที่อุณหภูมิ $(140 \pm 2) ^\circ\text{C}$ ประมาณ 10 นาที แล้วนำมาชั่งหามวลและบันทึกไว้ จากนั้นอบต่อไปอีกครั้งละ 5 นาที จนกระทั่งมวลคงที่ หรือมวลครั้งสุดท้ายต่างจาก 5 นาทีก่อนไม่เกิน 0.2 g มวลที่ได้จะเป็นมวลแห้ง (น้ำหนักแห้ง) ของเช็ดไหมตัวอย่างทดสอบขนาด
4. นำค่ามวลแห้งของเช็ดไหมตัวอย่างทดสอบขนาดมาคำนวณขนาดเส้นไหมที่ความชื้นมาตรฐาน 11% โดยเส้นไหมดิบยาว 9,000 m หนัก 1 g มีค่าเท่ากับขนาด 1 den

การหาขนาดเส้นไหมดิบที่ความชื้นมาตรฐาน 11%

$$d = \frac{M_0 \times 1.11 \times L}{T \times R} \quad (2.2)$$

เมื่อ	d	คือ ขนาดของเส้นไหมดิบ หน่วยเป็น den
	M_0	คือ ค่ามวลแห้งของเช็ดไหมตัวอย่างทดสอบขนาดแต่ละเช็ด หน่วยเป็น g
	T	คือ จำนวนรอบของเช็ดไหมตัวอย่างทดสอบขนาดแต่ละเช็ด
	L	คือ ความยาวของเส้นไหม 1 den มีค่าเท่ากับ 9,000 m
	R	คือ ความยาวเส้นรอบวงระวีง หน่วยเป็น m

การหาขนาดเฉลี่ยของเส้นไหมดิบ

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^N d_i}{N} \quad (2.3)$$

เมื่อ \bar{d} คือ ขนาดเส้นไหมดิบโดยเฉลี่ย หน่วยเป็น den
 d_i คือ ขนาดเส้นไหมดิบของแต่ละตัวอย่างทดสอบขนาด หน่วยเป็น den
 N คือ จำนวนเข็ทไหมตัวอย่างทดสอบขนาดทั้งหมด

การหาค่าเบี่ยงเบนของขนาดเส้นไหมดิบ

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (d_i - \bar{d})^2}{N}} \quad (2.4)$$

เมื่อ σ คือ ค่าเบี่ยงเบนของขนาดเส้นไหมดิบ หน่วยเป็น den
 d คือ ขนาดเส้นไหมดิบโดยเฉลี่ย หน่วยเป็น den
 d_i คือ ขนาดเส้นไหมดิบของแต่ละตัวอย่างทดสอบขนาดแต่ละเข็ท หน่วยเป็น den
 N คือ จำนวนเข็ทไหมตัวอย่างทดสอบขนาดทั้งหมด

การหาค่าสัมประสิทธิ์ความผันแปรของขนาดเส้นไหม (CV size)

$$CV \text{ size} = \frac{\sigma}{\bar{d}} \times 100 \quad (2.5)$$

การทดสอบความเหนียวและการยืดตัว (tenacity test and elongation test)

1. สุ่มเส้นไหมดิบตัวอย่างส่งห้องปฏิบัติการที่กรอเข้าหลอดมาตรฐาน จำนวน 10 หลอด แบ่งเป็นเส้นไหมดิบที่กรอจากด้านนอกของเข็ทหรือหลอด 5 ตัวอย่าง และด้านในของ เข็ทหรือหลอด 5 ตัวอย่าง นำมาเตรียมเข็ทไหมตัวอย่างทดสอบ

2. เตรียมเข็ทไหมตัวอย่างทดสอบจำนวน 10 เข็ท โดยใช้เครื่องกรอที่ทราบความยาวเส้นรอบวงของระวิงที่แน่นอนกำหนดจำนวนรอบในการกรอเข็ทไหมตัวอย่างทดสอบ ตามตารางที่ 2.1 นำจำนวนรอบที่กรอคูณด้วยความยาวเส้นรอบวงของระวิงจะได้ความยาวของเข็ทไหมตัวอย่างทดสอบ จดบันทึกความยาว ของแต่ละตัวอย่างทดสอบไว้

3. ปรับภาวะเข็ทไหมตัวอย่างทดสอบก่อนการทดสอบความเหนียวไม่น้อยกว่า 2 ชั่วโมง จากนั้นนำเข็ทไหมตัวอย่างทดสอบแต่ละเข็ทมาชั่งหามวลเพื่อคำนวณเทียบกับความยาวที่ได้จากข้อ 2 เพื่อหาขนาดของเส้นไหมดิบ และจดบันทึกขนาดของแต่ละตัวอย่างทดสอบไว้

4. นำเข็ทไหมตัวอย่างทดสอบที่เป็นวง มาตัดที่ตำแหน่งปลายของเข็ทไหมเพื่อให้ได้เส้นไหมดิบที่เป็นเส้นตรง ซึ่งจะมีจำนวนเส้นไหมดิบเท่ากับจำนวนรอบของการกรอ ตามตารางที่ 2.1

5. หนีบยึดตัวอย่างทดสอบทั้งชุดเข้ากับเครื่องทดสอบให้แน่น โดยให้มีระยะทดสอบระหว่างตัวหนีบ ยึดที่ (100 ± 2) mm หรือเป็นไปตามข้อตกลงระหว่างผู้เกี่ยวข้อง ก่อนการหนีบยึดตัวอย่างทดสอบ ให้ตรวจสอบตัวหนีบยึดให้อยู่ในแนวตรงและขนานกัน
6. ใช้อัตราเร็วของการเคลื่อนที่คงที่ในการดึง ที่ 150 mm min^{-1} หรือเป็นไปตามข้อตกลงระหว่างผู้เกี่ยวข้อง แต่ไม่ควรเกิน 500 mm min^{-1}
7. บันทึกค่าแรงดึงขาดและเปอร์เซ็นต์การยืดที่จุดขาด นำมาคำนวณค่าความเหนียวและการยืดตัวเฉลี่ย

ตารางที่ 2.1 จำนวนรอบในการกรอเส้นไหมตัวอย่างทดสอบ

ขนาดของเส้นไหมดิบ/den(dtex)	จำนวนรอบในการกรอ
24(26.7) หรือต่ำกว่า	400
25 ~ 50 (27.8 ~ 55.6)	200
51 ~ 69 (56.7 ~ 76.7)	100
> 69 (>76.7)	50

ที่มา: สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ (2558)

การหาค่าความเหนียวเฉลี่ย

$$P = \frac{\sum_{i=1}^N \left(\frac{F_i}{n \times d} \right)}{10} \quad (2.6)$$

- เมื่อ P คือ ความเหนียวเฉลี่ย หน่วยเป็น g den^{-1}
 F_i คือ ค่าแรงดึงขาดของแต่ละชุดไหมตัวอย่างทดสอบ หน่วยเป็น g
 n คือ จำนวนรอบในการกรอของแต่ละชุดไหมตัวอย่างทดสอบ
 d คือ ขนาดของเส้นไหมดิบตัวอย่างทดสอบแต่ละชุด

การหาค่าการยืดตัวเฉลี่ย

$$E_0 = \frac{\sum_{i=1}^N E_i}{10} \quad (2.7)$$

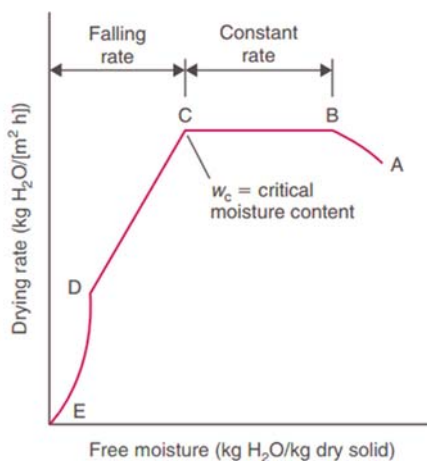
- เมื่อ E_0 คือ ค่าการยืดตัวเฉลี่ย หน่วยเป็น %
 E_i คือ ค่าการยืดตัวที่จุดขาดของแต่ละชุดไหมตัวอย่างทดสอบ หน่วยเป็น %

พื้นฐานการอบแห้ง

การอบแห้งเป็นกระบวนการที่ซับซ้อน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลไปกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้งนอกจากนี้ การเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ของวัสดุ ไม่ว่าจะเป็นการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เคมี หรือทางชีวเคมี มีผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ รวมทั้งกลับไปมีผลกระทบต่อกลไกการถ่ายเทความร้อนและมวลสารอีกทอดหนึ่งด้วย ในส่วนของการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของวัสดุอาจเกิดจากการหดตัว การพองตัว การตกผลึก หรือการหลอมเหลว ส่วนการเปลี่ยนแปลงทางเคมีนั้นอาจมีทั้งการเปลี่ยนแปลงซึ่งเป็นที่ต้องการและไม่เป็นที่ต้องการ และอาจนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงสี เนื้อสัมผัส กลิ่นรส และคุณภาพอื่น ๆ ของวัสดุได้ด้วย สภาพการอบแห้งที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อยอาจทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณลักษณะหรือฤทธิ์ทางชีวภาพที่เป็นที่ต้องการหรือไม่เป็นที่ต้องการได้ วิธีการในการถ่ายเทความร้อนให้กับวัสดุมีได้หลากหลายวิธี อย่างไรก็ตามในปัจจุบันเครื่องอบแห้งส่วนใหญ่ยังเป็นเครื่องอบแห้งแบบพาความร้อน (convective dryers) ซึ่งความร้อนเข้าสู่วัสดุภายในเครื่องอบแห้งโดยการพาโดยอากาศหรือก๊าซร้อน ส่วนการถ่ายเทหรือการเคลื่อนที่ของความชื้นในวัสดุนั้นอาจเป็นไปได้หลายกลไก เช่น โดยการแพร่ของเหลว (liquid diffusion) การแพร่ของไอ (vapor diffusion) การแพร่แบบ Knudsen (Knudsen diffusion) ซึ่งเกิดขึ้นในการอบแห้งที่อุณหภูมิและความดันต่ำมาก ๆ และผลจากการอบแห้งที่สำคัญอีกประเด็นหนึ่งคือ โครงสร้างของวัสดุซึ่งผ่านการอบแห้งย่อมเกิดการเปลี่ยนแปลงไปกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างดังกล่าวนี้อาจส่งผลต่อกลไกการเคลื่อนที่ของความชื้นในวัสดุ (สีกกมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา, 2555)

การระเหยน้ำออกจากผลิตภัณฑ์อาหารจะเป็นไปตามลำดับของอัตราการอบแห้ง แสดงดังภาพที่ 2.5 การระเหยน้ำออกผลิตภัณฑ์ในช่วงเริ่มต้น(ช่วง A-B) เกิดขึ้นจากผลิตภัณฑ์และน้ำภายในผลิตภัณฑ์มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเล็กน้อย จากนั้นการลดความชื้นของผลิตภัณฑ์จะเกิดขึ้นในอัตราคงที่(ช่วง B-C) และในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่นี้ อุณหภูมิของวัสดุจะมีค่าคงที่เท่ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศ ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่การถ่ายเทความร้อนและมวลจะเกิดขึ้นที่ผิวของวัสดุเท่านั้น น้ำจะเกาะอยู่ที่ผิวของวัสดุเป็นจำนวนมาก เมื่อเพิ่มความเร็วลมที่ไหลผ่านวัสดุ จะทำให้ฟิล์มอากาศที่มีความหนาลดลง เป็นผลให้ความต้านทานต่อการไหลของความร้อนและมวลลดลงด้วย เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของอากาศอบแห้ง จะทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างที่ผิววัสดุและของกระแสอากาศที่ไหลอย่างอิสระมีมากขึ้น เป็นผลให้การถ่ายเทความร้อนและมวลดีขึ้น เมื่อการระเหยน้ำในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ดำเนินการต่อเนื่องไปจนกระทั่งความชื้นลดต่ำลงจนถึงความชื้นวิกฤติ (critical moisture content) ในช่วงปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์มีค่าต่ำกว่าความชื้นวิกฤตินี้ อัตราการระเหยน้ำมีค่าลดลงเรียกว่า ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง(ช่วง C-E) ซึ่งช่วงอัตราการอบแห้งลดลง การถ่ายเทความร้อนและมวล จะไม่จำกัดอยู่เฉพาะที่ผิวของวัสดุเท่านั้น แต่จะเกิดขึ้นภายในผิวและเนื้อวัสดุด้วย เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของอากาศอบแห้ง จะทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิมีมากขึ้น นอกจากนี้ยังมีผลให้สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย เมื่อลดค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอบแห้งจะเป็นผลให้เกิดความแตกต่างระหว่างอัตราส่วนความชื้นเพิ่มขึ้นและมีผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิหรือลดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแล้ว จะเป็นผลให้การถ่ายเทความร้อนและมวลดีขึ้น เมื่อเพิ่มความเร็วลมจะพบว่าความหนาของฟิล์ม

อากาศหนึ่งมีค่าลดลง เป็นผลให้ความต้านทานลดลงเนื่องจากความต้านทานที่ฟิล์มอากาศมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับความต้านทานตัวอื่น ดังนั้นจึงไม่มีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนและมวลมากนัก (Singh & Heldman, 2009; สมชาติ โสภณภณฤทธิ์, 2540)



ภาพที่ 2.5 ลักษณะเส้นโค้งอัตราการอบแห้ง
ที่มา: Singh & Heldman (2009)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบาง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งในวัสดุพอรุนที่ใช้ในการศึกษาอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นในระหว่างกระบวนการอบแห้งซึ่งมีข้อกำหนดสำคัญคือ เป็นการอบแห้งแบบชั้นบาง (Thin-layer drying) ซึ่งความหนาของวัสดุจะต้องไม่เกิน 3 ชั้น และการอบแห้งเกิดในช่วงเวลาการอบแห้งแบบลดลง ซึ่งการถ่ายโอนความร้อนและมวลจะไม่จำกัดอยู่เฉพาะที่ผิวภายนอกของวัสดุเท่านั้น แต่จะเกิดขึ้นภายในด้วย สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ สมการทางทฤษฎี สมการกึ่งทฤษฎี และสมการเอมพิริคัล

สมการเอมพิริคัล (empirical equation) สมการนี้เป็นสมการที่ได้จากการฟิตข้อมูลที่ได้จากการทดลองเข้ากับสมการต้นแบบ ถือได้ว่าเป็นวิธีการที่ง่ายและนิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยสมการที่รู้จักกันดีในการอบแห้งวัสดุเกษตรและอาหารคือ สมการของ Page (Page's model) ซึ่งถูกพัฒนาในปี ค.ศ. 1949 เป็นสมการเริ่มแรกที่ใช้สำหรับเมล็ดข้าวโพด และพัฒนามาจาก Lewis Model ดังนี้

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e} = \exp(-kt^n) \quad (2.8)$$

ใส่ลอการิทึมธรรมชาติ (ln) ในสมการ (2.1) ทั้งสองข้าง จะสามารถหาค่าคงที่การอบแห้ง (drying constant, k) ค่าคงที่ของแบบจำลองของเพจ (Page's model constant หรือค่า n) หาได้จากความลาดชันของเส้นตรง ค่า k คือ จุดที่เส้นกราฟตัดแกนเมื่อ t มีค่าเท่ากับศูนย์นั่นก็คือ ที่ $\log 1$

นั่นเองในการพล็อตกราฟแบบ log-log และจะมีหน่วยเป็น เวลา⁻¹ ตามค่าหน่วยของ t ค่าคงที่การอบแห้งนี้จะบอกถึงระยะเวลาในการอบแห้งหากค่า k มีค่ามากแสดงว่าการอบแห้งใช้เวลาสั้น ส่วนค่าคงที่ n นั้นไม่มีหน่วย (สุนทร สืบคำ และ ฤทธิชัย อัครวราพันธ์, 2554) แบบจำลองเอมพิริคัลแสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบาง

ลำดับ	ชื่อสมการ	รูปแบบสมการ
1.	Lewis	$MR = \exp(-kt)$
2.	Page	$MR = \exp(-kt^n)$
3.	Henderson and Pebis	$MR = a \exp(-kt)$
4.	Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$
5.	Two term	$MR = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$
6.	Two term exponential	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kat)$
7.	Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$
8.	Approximation of diffusion	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kbt)$
9.	Midilli Kucuk	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$
10.	Verma et al.	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-gt)$

ที่มา: Usub et al. (2010)

เมื่อค่า MR คือ อัตราส่วนความชื้นไร้หน่วย, M_t คือ ค่าความชื้นที่เวลาใด ๆ, M_e คือ ค่าความชื้นสมดุล, M_i คือ ค่าความชื้นเริ่มต้น, t คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง และ $k, k_0, k_1, a, b, c, g, n$ คือ ค่าคงที่ของสมการ

การทวนสอบแบบจำลองการอบแห้งนิยมใช้เพื่อประเมินความเข้ากันได้ของแบบจำลองกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง หรือความกลมกลืน (goodness of fit) ของแบบจำลอง พารามิเตอร์ที่นิยมใช้ได้แก่ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination, R^2) ค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (root mean square error, RMSE) และค่าลดลงไคกำลังสอง (reduced chi square, χ^2) เป็นพารามิเตอร์ทางสถิติซึ่งช่วยในการเปรียบเทียบเพื่อหาความแม่นยำในการทำนายค่าความชื้นที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการอบแห้ง ค่า R^2 เป็นพารามิเตอร์ทางสถิติที่สำคัญในการบ่งบอกคุณภาพของรูปแบบสมการในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยค่าที่เข้าใกล้ 1.0 แสดงว่าแบบจำลองดังกล่าวมีความแม่นยำมาก ในขณะที่ค่า χ^2 และค่า RMSE เป็นค่าที่ใช้บ่งบอกความผิดพลาดในการทำนายแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความแม่นยำในการทำนายที่เหมาะสม ควรจะมีค่า R^2 สูง ค่า χ^2 และค่า RMSE ต่ำ Aghbashlo et al. (2009) ได้เสนอ สมการคำนวณค่า R^2, χ^2 และ RMSE มีดังนี้

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{pre} - MR_{exp,i})^2} \quad (2.9)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - z} \quad (2.10)$$

$$RMSE = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.11)$$

เมื่อ $MR_{exp,i}$ คือ อัตราส่วนความชื้นจากการทดลอง,
 $MR_{pre,i}$ คือ อัตราส่วนความชื้นจากการทำนายของแบบจำลอง
 \overline{MR}_{pre} คือ อัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยจากการทำนายของแบบจำลอง
 N คือ จำนวนข้อมูลจากการทดลอง
 z คือ จำนวนค่าคงที่ของสมการ

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นและพลังงานกระตุ้น

การแพร่ความชื้นบ่งบอกถึงการแพร่ความชื้นในวัสดุระหว่างอบแห้ง จะเกิดขึ้นขณะการอบแห้งในช่วงที่อัตราการอบแห้งลดลง พิจารณาได้จากสมการแพร่ตามกฎข้อที่สองของฟิค (Fick's second law) โดยมีสมมติฐานค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นคงที่ตลอดเวลาการอบแห้ง และสำหรับวัสดุที่มีรูปร่างกระบอกสี่เหลี่ยมสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.12 (Usub et al., 2010)

$$MR = \left(\frac{8r^2}{l^2} \right) \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{1}{\lambda_i^2 \beta_j^2} \exp \left(-(\lambda_i^2 + \beta_j^2) \frac{D_{eff} t}{r^2} \right) \quad (2.12)$$

เมื่อ D_{eff} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น ($m^2 s^{-1}$), r คือ รัศมีในแนวรัศมีรังไหม (m), l คือ ความยาวรังไหม (m), t คือ เวลาอบแห้ง (s), λ_i คือ ค่าตอบของฟังก์ชันเบสเซลอันดับที่ศูนย์ (2.405, 5.520, 8.564) และ i คือ ลำดับที่ของฟังก์ชัน (1, 2, 3,...)

$$\beta_j = \frac{(2j-1)\pi r}{2l}, j= 1, 2, 3 \quad (2.13)$$

จากสมการที่ (2.12) มีจำนวนเทอมที่ไม่มีที่สิ้นสุด สำหรับการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ระยะเวลายาวนาน ดังนั้นจึงประมาณค่าโดยพิจารณาเฉพาะเทอมแรก สามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$MR = \frac{32}{\lambda_1^2 \pi^2} \exp\left(-(\lambda_1^2 + \beta_1^2) \frac{D_{eff} t}{r^2}\right) \quad (2.14)$$

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{32}{\lambda_1^2 \pi^2}\right) - \left((\lambda_1^2 + \beta_1^2) \frac{D_{eff} t}{r^2}\right) \quad (2.15)$$

จากสมการที่ (2.15) สามารถคำนวณค่า D_{eff} ของรังไหมจากค่าความชันของกราฟเส้นตรงซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(MR)$ และเวลาในการอบแห้ง (t)

$$slope = \frac{(5.7831 + \beta_1^2) D_{eff}}{r^2} \quad (2.16)$$

เมื่อทราบค่า D_{eff} และค่าอุณหภูมิของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง สามารถหาค่าพลังงานกระตุ้นสำหรับการแพร่ โดยการประยุกต์ใช้สมการอาร์เรเนียส ซึ่งมีรูปสมการคือ (Onwude et al., 2019)

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (2.17)$$

- เมื่อ D_0 คือ ค่าคงที่เทียบเท่ากับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลที่อุณหภูมิอากาศสูงไม่มีขอบเขต (mm^2/min)
 E_a คือ พลังงานกระตุ้นของการอบแห้งด้วยอากาศร้อน (kJ/kg)
 R คือ ค่าคงที่ของก๊าซ = $8.314 \text{ kJ}/\text{kmol K}$
 T คือ อุณหภูมิของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง (K)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วรพจน์ รักสังข์ (2553) ได้ประดิษฐ์ตู้อบรังไหมขนาดเล็กแบบลิ้นชักเลื่อน สามารถใส่รังไหมได้ครั้งละ 10 kg ใช้ไฟฟ้า 2,500 W มีพัดลมตั้งโต๊ะ เป็นตัวนำความร้อนจากการทดลองสามารถอบรังไหมได้ 10 kg ในระยะเวลา 1-2 h ดักแต่ตายโดยรูปร่างไม่เปลี่ยนแปลงและอบต่อไป 16 h รังไหมจะแห้งและเก็บไว้ได้เป็นเวลานานนำไปทดสอบอบไหมในพื้นที่เกษตรกร จำนวนทั้งหมด 8 ตู้อบ โดยส่งตู้ และคู่มือใช้ไปยังศูนย์หม่อนไหมเฉลิมพระเกียรติฯ นครราชสีมา บุรีรัมย์ ศรีสะเกษ ร้อยเอ็ด สุรินทร์ และขอนแก่น นำไปให้เกษตรกรในพื้นที่ทดลองใช้ หลังจากนั้นทดสอบคุณภาพรังไหมด้านการสาวไหม และปรับปรุงให้เกิดความพอใจแก่เกษตรกร และมอบให้เกษตรกรทดลองใช้ จากการ

ทดสอบรังไหม 2 ส่วน คือทดสอบความพึงพอใจ และคุณภาพรังไหมหลังอบด้วยตู้อบรังไหมที่ผลิตพบว่า เกษตรกรมีความพึงพอใจในการใช้งานเป็นส่วนมาก และคุณภาพรังไหมมีแนวโน้มว่าดีขึ้น โดยรังไหมสวยงามขึ้น และมีเศษไหมน้อยซึ่งให้ผลิตเส้นไหมมีคุณภาพมากขึ้น และเป็นการชะลอการเจาะรังของผีเสื้ออันจะให้รังไหมเสียหาย

กลยุทธ์ ดิจริง และเอกสิทธิ์ สุทธิพิณทุ (2561) ทำการออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดรับรังสีอาทิตย์แบบผสมสำหรับอบแห้งรังไหม โดยทดลองอบแห้งรังไหมจำนวน 5 kg จากความชื้นรังไหมเริ่มต้นประมาณ 220% dry basis จนเหลือความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 10% dry basis ผลการทดลองด้านจลนพลศาสตร์การอบแห้ง พบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Midilli-Kucuk มีความเหมาะสมในการทำนายการอบแห้ง ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นเท่ากับ $3.78 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ด้านสมรรถนะเครื่องอบแห้ง พบว่า ประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ประสิทธิภาพการอบแห้ง และ ประสิทธิภาพรวมของระบบอบแห้ง เท่ากับ 37.37, 12.01 และ 8.85% ตามลำดับ ผลการทดสอบสาวไหม พบว่า รังไหมอบแห้งมีค่าการสาวง่ายสูงกว่ารังไหมสด และขนาดเส้นไหมดิบมีค่ามากกว่าเส้นไหมที่สาวได้จากรังไหมสด นอกจากนี้ ค่าความเหนียวและการยืดตัวของเส้นไหมดิบจากรังไหมอบแห้ง มีค่าสูงกว่าเส้นไหมดิบจากรังไหมสด ($p < 0.05$) อย่างไรก็ตามรังไหมอบแห้งมีคุณภาพใกล้เคียงกับรังไหมสด

Usub et al. (2010) ศึกษาคุณลักษณะการอบแห้งดักแด้ไหมแบบชั้นบางด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ ความชื้นเริ่มต้นของดักแด้ไหมเท่ากับ $4.37 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{kg}$ จนเหลือความชื้นสุดท้ายเท่ากับ $0.15 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{kg}_{\text{dry matter}}$ ที่อัตราการไหลอากาศ $0.32 \text{ kg}/\text{s}$ พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Midilli-Kucuk สามารถทำนายพฤติกรรมการอบแห้งได้ดีที่สุด ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.9982 ค่าอัตราการอบแห้งและสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลเท่ากับ $0.6723 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{kg}_{\text{drymatter}} \text{ h}$ และ $2.7696 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ตามลำดับ

Singh (2011) ศึกษาการอบแห้งรังไหมด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดไหลเวียนอากาศโดยการบังคับ ในการทดลองจัดวางรังไหมแบบชั้นบางภายในห้องอบแห้งที่ป้องกันจากแผ่รังสีอาทิตย์ อากาศร้อนจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ไหลเข้าห้องอบแห้งแบบบังคับด้วยเครื่องเป่าลม ที่อัตราการไหล $480 \text{ m}^3/\text{h}$ พบว่า อุณหภูมิอบแห้งอยู่ในช่วง 50 ถึง $75 \text{ }^\circ\text{C}$ ระยะเวลาอบแห้ง 16–19 ชั่วโมง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่ารังสีอาทิตย์ ประสิทธิภาพทางความร้อนรวมของเครื่องอบแห้งรังไหมพลังงานแสงอาทิตย์เท่ากับ 8.8– 9.2% มีค่าสูงการการตากแดดที่มีค่าเท่ากับ 2.6–3.6% และสามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้ประมาณ $0.75 \text{ kWh}/\text{kg cocoons dried}$ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Wang and Singh ทำนายผลการทดลองได้ดีที่สุด คุณภาพรังไหมใกล้เคียงกับรังไหมที่อบแห้งด้วยตู้อบไฟฟ้า ผลการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ พบว่า เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์มีค่า NPV สูงกว่าตู้อบไฟฟ้า ดังนั้นเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ออกแบบและสร้างขึ้นมาจึงมีความเป็นไปได้ในการนำมาอบแห้งรังไหม

Tirawanichakul et al. (2013) ศึกษาแนวทางการอบแห้งใบบัวบกเพื่อผลิตเป็นใบบัวบกแห้งชงดื่ม และสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งใบบัวบกด้วยการแผ่รังสีได้แดง และในส่วนสุดท้ายการทดสอบทางประสาทสัมผัสและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ การช่วงอุณหภูมิอบแห้งที่เลือกใช้ในการทดสอบอยู่ระหว่าง 50-70°C กำลังของรังสีอินฟราเรดเท่ากับ 500-1,500 W ขณะที่ใบบัวบกอ้างอิงอบแห้งด้วยแสงอาทิตย์ เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง การทดลองเริ่มจากใบบัวบกสดที่มีความชื้นเริ่มต้น 600 % มาตรฐานแห้ง อบแห้งจนกระทั่งใบบัวบกแห้งมีความชื้นสุดท้ายที่ 20.0 % มาตรฐานแห้ง จากผลการทดลองพบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Midilli และคณะ สามารถอธิบายจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งใบบัวบกได้ดีที่สุด ทุกเงื่อนไขการทดลอง เมื่อพิจารณาถึงปัจจัยของแนวทางการอบแห้งต่าง ๆ ที่มีผลต่อจลนพลศาสตร์ คุณภาพและความสิ้นเปลืองพลังงานในการอบแห้งใบบัวบก ผลการศึกษาพบว่าอุณหภูมิอบแห้ง และกำลังของรังสีอินฟราเรด ส่งผลต่อการอบแห้ง ทั้งในเรื่องของอัตราการอบแห้ง คุณภาพของผลิตภัณฑ์ หลังการอบแห้ง และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้ง โดยพบว่า การอบแห้งใบบัวบกด้วยรังสีอินฟราเรดกำลัง 1,500 W อุณหภูมิอบแห้ง 70°C ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งน้อยที่สุด (30 นาที) และมีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำสุด (0.31 MJ/kg of water evaporated) นอกจากนี้ในการศึกษาได้ทำการวิเคราะห์คุณภาพของผลิตภัณฑ์ใบบัวบกแห้งในรูปของชาชงดื่ม โดยการประเมินทางประสาทสัมผัส พบว่า อุณหภูมิอบแห้งและกำลังรังสีอินฟราเรดมีผลต่อคุณลักษณะด้าน สี กลิ่น รสชาติ และรูปลักษณะ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) อย่างไรก็ตามใบบัวบกแห้งที่อบด้วยรังสีอินฟราเรด ที่เงื่อนไขต่าง ๆ ต่อการยอมรับทางประสาทสัมผัสโดยรวม พบว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

เครื่องมือในการวิจัย

1. เครื่องอบแห้งโดยใช้รังสีอินฟราเรดร่วมกับอากาศร้อน
2. เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล (ยี่ห้อ Ohaus รุ่น PA 140 ความละเอียด 0.01 กรัม)
3. เครื่องวิเคราะห์ความชื้น (ยี่ห้อ Ohaus รุ่น MA 140)
4. เครื่องบันทึกพลังงานไฟฟ้า (ยี่ห้อ Fluke รุ่น 1735)
5. เครื่องบันทึกข้อมูลอุณหภูมิ (ยี่ห้อ Agilent รุ่น 34972A)
6. เครื่องวัดอัตราการไหลอากาศ (ยี่ห้อ Fluke รุ่น 922)
7. เครื่องสาวไหมทดสอบ
8. เครื่องทดสอบแรงดึง (ยี่ห้อ Lloyd รุ่น LR5K)
9. เครื่องกรอไหมเข้าหลอด (ยี่ห้อ Frenic รุ่น 5000G9S)
10. เครื่องกรอทำเช็ดไหมทดสอบ (ยี่ห้อ Kamol รุ่น 100 – 40)

การเตรียมรังไหม

คัดรังไหมพันธุ์นางน้อยศรีสะเกษ 1 ที่ไม่เนา ไม่มีรอยดำ ไม่บู่ ไม่บาง รังหัวท้ายบาง รังติดข้างจ่อ ไม่เปื้อน รังไม่ถูกเจาะ รังแผด รังผิดปกติ รังเชื้อรา

การประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้งโดยใช้รังสีอินฟราเรดร่วมกับอากาศร้อน

1. สุ่มรังไหมนำไปทดสอบหาค่าความชื้นเริ่มต้นของรังไหม และมวลแห้งของรังไหมด้วยเครื่องวิเคราะห์ความชื้น
2. นำรังไหมที่คัดแล้วจำนวน 2 kg อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับอากาศร้อนกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้หลอดอินฟราเรดเท่ากับ 600, 700 และ 800 W อุณหภูมิอากาศร้อนเท่ากับ 60, 70 และ 80 °C ระหว่างทำการอบแห้งบันทึกน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงด้วยเครื่องชั่งระบบดิจิตอล ความละเอียด 0.01 g โดยระหว่างการอบแห้งบันทึกน้ำหนักรังไหมทุก 10 min ทำการอบรังไหมจนกระทั่งรังไหมมีความชื้นเท่ากับ 12 % db.
3. ระหว่างการอบแห้งบันทึกการใช้พลังงานไฟฟ้า
4. คำนวณสมรรถนะเครื่องอบแห้งได้แก่ อัตราการอบแห้ง และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ดังสมการ

$$DR = \frac{m_i - m_f}{t}$$

$$SEC = \frac{E_{tot}}{m_w}$$

การศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งรังไหมด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับอากาศร้อน

ขั้นที่ 1 การวิเคราะห์คุณลักษณะการอบแห้งรังไหม

1. อบแห้งรังไหมด้วยเครื่องอบแห้งอินฟราเรดกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้หลอดอินฟราเรดเท่ากับ 600, 700 และ 800 W ร่วมกับอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 60, 70 และ 80°C คำนวณน้ำหนักรังไหมระหว่างการอบการแห้งนำมาคำนวณปริมาณความชื้นในหน่วยเปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง และเปลี่ยนค่าความชื้นจัดอยู่ในรูปของอัตราส่วนความชื้นที่เวลาใด ๆ

2. นำข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความชื้นระหว่างการอบแห้งมาคำนวณหาอัตราการอบแห้ง

3. สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับอัตราส่วนความชื้น จากนั้นวิเคราะห์ช่วงอัตราการอบแห้ง

ขั้นที่ 2 การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งรังไหม

1. นำข้อมูลการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นความชื้นของรังไหมระหว่างการอบแห้งมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งโดยใช้วิธี nonlinear regression ด้วยรูปแบบสมการอบแห้งชั้นบางที่ใช้สำหรับทำนายค่าอัตราส่วนความชื้น 6 สมการดังนี้ Newton, Page, Henderson and Pabis, Wang and Singh, Logarithmic และ Midilli Kucuk ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นจากการทดลองเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทำนายของสมการ แล้วใช้ค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนด (R^2) ค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (RMSE) และค่าลดงโคกำลังสอง (χ^2) เป็นค่าบ่งชี้ความสามารถในการทำนายของสมการ

ขั้นที่ 3 การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น

สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(MR)$ กับเวลาของการอบแห้ง (t) หาความชันของกราฟจากสมการเส้นตรง แล้วนำค่าความชันหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิภาพ ดังสมการ

$$\text{slope} = \frac{(5.7831 + \beta_1^2) D_{eff}}{r^2}$$

การศึกษาคุณภาพรังไหมหลังการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับอากาศร้อน

ขั้นที่ 1 การวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์การสาวง่าย

1. อบริงไหมที่ผ่านการอบแห้งจนกระทั่งมีความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 12 %db นำริ้งไหมหลังจากการอบแห้งจำนวน 50 ริ้ง มาต้มในน้ำที่อุณหภูมิ 95-100 °C เป็นเวลา 1 min เพื่อให้น้ำร้อนไล่อากาศออกจากริ้งไหม จากนั้นนำริ้งไหมต้มในน้ำที่อุณหภูมิ 65 °C เป็นเวลา 1 min เพื่อให้น้ำซึมเข้าไปในริ้งไหม แล้วนำไปต้มในน้ำที่อุณหภูมิ 95-100 °C เป็นเวลา 3 min เพื่อให้ริ้งไหมพองตัว แล้วนำริ้งไหมที่ต้มแล้วมาแช่ไว้ในน้ำอุณหภูมิ 40-50 °C

2. นำริ้งไหมหลังจากต้มริ้งไหมจำนวน 50 ริ้ง มาหาเงื่อนของริ้งไหม แล้วใส่ลงในอ่างสาวไหมที่มีอุณหภูมิประมาณ 37-40 °C ในกรณีมีริ้งไหมที่หาเงื่อนไม่ได้ให้บันทึกเป็นริ้งสาวไม่ออก

3. ริ้งไหมที่หาเงื่อนเสร็จแล้วจำนวน 10 ริ้ง มาร้อยผ่านขอเกี่ยวเส้นไหม (jett bout) รูดกระดุม รอกเกลียวซึ่งจะได้เกลียวยาวประมาณ 8-10 cm แล้วนำเส้นไหมปลายเงื่อนผูกกับอีกสาวไหม

4. เปิดเครื่องสาวไหมแล้วสังเกตริ้งไหมที่สาว เมื่อมีริ้งไหมร่วงจากขอเกี่ยวเส้นไหมจะต้องป้อนริ้งไหมเข้าไปในพงสาว และบันทึกจำนวนริ้งไหมที่ป้อนเข้าไปในพงสาว เมื่อสาวจนถึง 10 ริ้งสุดท้ายแล้วสังเกตเห็นริ้งบาง หรือริ้งที่ร่วง จึงหยุดเครื่องสาวแล้วนับจำนวนริ้งไหมที่เหลือ และบันทึกเป็นริ้งขึ้นไม่ได้

5. ข้อมูลจำนวนริ้งสาวไม่ออก และริ้งที่ขึ้นไม่ได้ มาจำแนกเป็นชนิดริ้งหนา ริ้งปานกลาง และริ้งบาง แล้วนำมาคำนวณโดยเปรียบเทียบด้านความยาว จากตัวคุณดังนี้

$$1 \text{ ริ้งหนา} = 0.85 \text{ ริ้ง} ; 1 \text{ ริ้งปานกลาง} = 0.37 \text{ ริ้ง} \text{ และ } 1 \text{ ริ้งบาง} = 0.11 \text{ ริ้ง}$$

แล้วคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การสาวง่าย ดังสมการ

$$\text{การสาวง่าย} = \left(\frac{\text{จำนวนริ้งไหมที่นำมาสาว} - \text{จำนวนริ้งไหมที่สาวไม่ออก} - \text{จำนวนริ้งไหมที่ขึ้นไม่ได้}}{\text{จำนวนครั้งที่ป้อนริ้งไหม} - \text{จำนวนริ้งไหมที่ขึ้นไม่ได้}} \right) \times 100$$

6. นำเส้นไหมออกจากอ๊กโดยการกรอเข้าแหล่ง เพื่อทำไฟไหมให้เส้นไหมพันกัน จากนั้นนำเช็ดไหมออกจากแหล่ง ปรับสภาพเช็ดไหมในห้องที่มีสภาวะอุณหภูมิ 25 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 65 % เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อหาหน้าไปหาขนาดเส้นไหมในขั้นตอนต่อไป

ขั้นที่ 2 การศึกษาขนาดเส้นไหม

1. นำเช็ดไหมที่ปรับสภาพแล้วเข้าเครื่องกรอเข้าหลอด (winding test) เพื่อทำเป็นเช็ดไหมทดสอบโดยใช้เครื่องกรอทำเช็ดไหมทดสอบที่มีเส้นรอบวงระวาง 1.125 m โดยกำหนดให้มีจำนวนรอบในเช็ดไหมเท่ากับ 100 รอบ

2. นำเช็ดไหมตัวอย่างทดสอบขนาดมาชั่งหามวลด้วยเครื่องน้ำหนักแบบดิจิตอล โดยแยกแต่ละเช็ด บันทึกค่ามวลที่ได้เพื่อนำไปคำนวณขนาดเส้นไหมดิบ

ขั้นที่ 3 การศึกษาสมบัติเชิงกลของเส้นไหม

1. นำเส้นไหมทดสอบที่ทราบขนาดมาทดสอบแรงดึงของเส้นไหมด้วยเครื่อง เครื่องทดสอบแรงดึง ความเร็วในการดึง 300 mm min^{-1} และระยะห่างที่ใช้ในการดึง 100 mm ทดสอบภายใต้สภาวะบรรยากาศที่อุณหภูมิ $25 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ความชื้นสัมพัทธ์ $65 \pm 4\%$ บันทึกค่าแรงดึง ณ จุดขาด และระยะยืดตัวของเส้นไหม

2. ข้อมูลจากการทดสอบแรงดึงมาวิเคราะห์สมบัติเชิงกลของเส้นไหมได้แก่ ค่าความเหนียว และการยืดตัว ตามลำดับดังสมการ

$$P = \frac{F}{n \times d}$$

$$E = \frac{L_f - L_o}{L_o} \times 100$$

การวิเคราะห์ผลทางสถิติของค่าทดสอบคุณภาพรังไหม และสมบัติเชิงกลของเส้นไหม ใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (one-way analysis of variance) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's multiple range test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

การศึกษาทางเศรษฐศาสตร์ของการอบแห้งรังไหม

รวบรวมข้อมูล ปริมาณการอบแห้ง พลังงานไฟฟ้าในการอบแห้ง จากนั้นวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานในการดำเนินงาน คำนวณได้จาก ปริมาณการอบแห้งต่อค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง

บทที่ 4 ผลการวิจัย

การศึกษาการอบแห้งรังไหมด้วยเครื่องอบแห้งโดยใช้รังสีอินฟราเรดร่วมกับอากาศร้อนโดยนำเสนอผลการวิเคราะห์ข้อมูลตามลำดับดังนี้

1. การประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้งโดยใช้รังสีอินฟราเรดร่วมกับอากาศร้อน
2. การศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งรังไหมด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับอากาศร้อน
3. การศึกษาคุณภาพรังไหมหลังการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับอากาศร้อน
4. การศึกษาทางเศรษฐศาสตร์สำหรับการอบแห้งรังไหมด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับอากาศร้อน

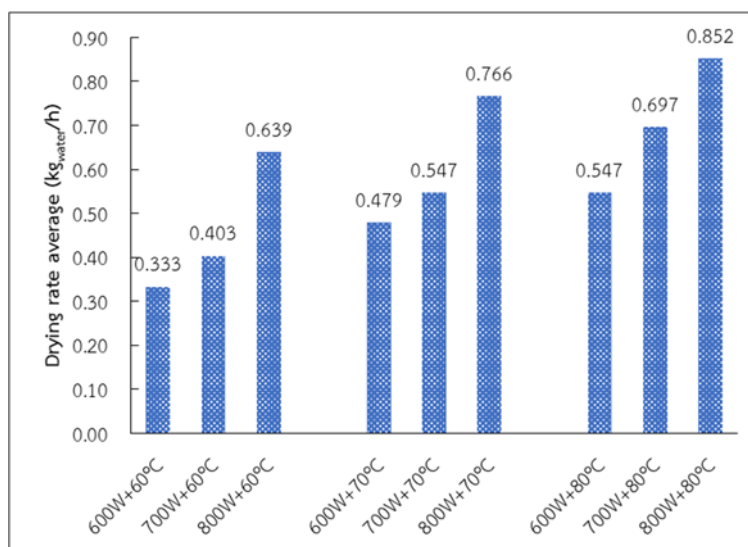
การประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้งโดยใช้รังสีอินฟราเรดร่วมกับอากาศร้อนในการอบแห้งรังไหม
เครื่องอบแห้งที่ใช้ในการอบรังไหมประกอบด้วยอุปกรณ์หลักคือ ห้องอบแห้ง แت่งอินฟราเรด ชุดลดอุณหภูมิ ความร้อน พัฒลมในระบบหมุนเวียนอากาศ มีรายละเอียดดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 รายละเอียดส่วนประกอบหลักของเครื่องอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับอากาศร้อน

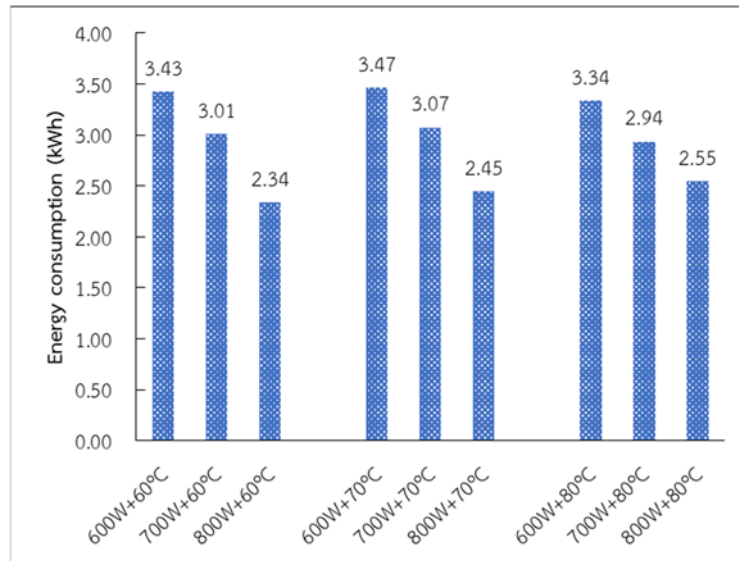
ส่วนประกอบ	รายละเอียด
ห้องอบแห้ง	ปริมาตรภายในห้องอบแห้ง กว้างxลึกxสูง เท่ากับ $0.48 \times 0.40 \times 0.55 \text{ m}^3$ ถาดบรรจุวัสดุทำด้วยสแตนเลส ขนาด $0.48 \times 0.40 \text{ m}^2$ จำนวน 4 ถาด
แท่งอินฟราเรด	ขนาดกำลังไฟฟ้าสูงสุด 650 W จำนวน 2 แท่ง
พัดลม	ขนาดกำลังมอเตอร์ 38 W ใบพัด 9.5 นิ้ว
ชุดลดอุณหภูมิ	ขนาดกำลังไฟฟ้า 3 kW
ระบบควบคุม	ควบคุมอุณหภูมิอบแห้งด้วย Temperature Controller และ Magnetic Contactor ขนาด 20 A ควบคุมความเร็วรอบการทำงานพัดลมด้วย อินเวอร์เตอร์ปรับความเร็ว รอบ (Variable Speed Drive)

การทดสอบสมรรถนะเครื่องอบแห้งโดยใช้รังไหมปริมาณ 2 kg ความชื้นเริ่มต้น 210 %db จนกระทั่งมีความชื้น 12 %db กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้แท่งอินฟราเรด 600, 700 และ 800 W ระยะห่างระหว่างแท่งอินฟราเรดกับถาดอบแห้งเท่ากับ 25 cm ควบคุมอุณหภูมิอากาศร้อนอบแห้งเท่ากับ 60, 70 และ 80 °C ภาพที่ 4.1 แสดงอัตราการอบแห้งเฉลี่ย พบว่า เมื่อกำลังรังสีอินฟราเรดและอุณหภูมิอากาศอบแห้งเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดกำลัง 800 W ร่วมกับอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 80 °C มีอัตราการอบแห้งสูงสุดเท่ากับ 0.852 kg_{water}/h

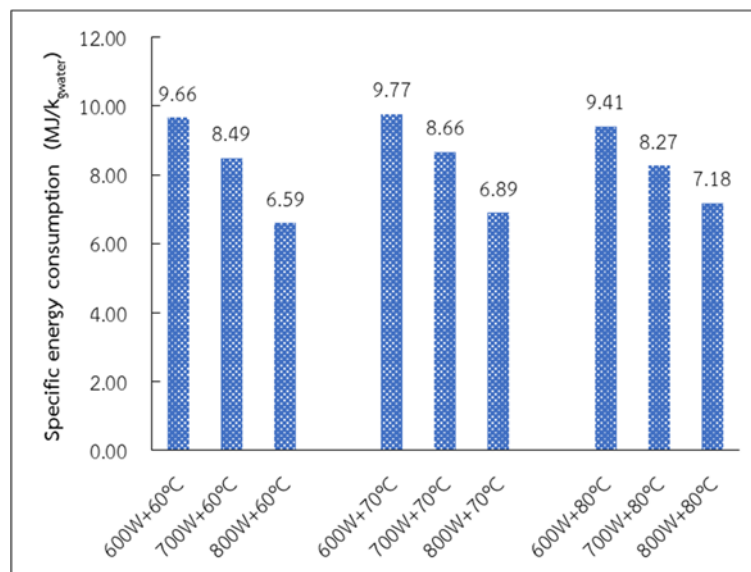
เมื่อพิจารณาด้านพลังงานที่ใช้ในกระบวนการอบแห้งรังไหม จากภาพที่ 4.2-4.3 พบว่า เมื่อให้กำลังรังสีอินฟราเรดสูงขึ้นการใช้พลังงานและค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลง สอดคล้องกับผลวิจัยของ Tirawanichakul et al. (2013) ศึกษาอบแห้งใบบัวบกด้วยรังสีอินฟราเรดที่ระดับกำลัง 500-1,500 W พบว่าเมื่อกำลังอินฟราเรดเพิ่มขึ้นจะช่วยให้มีอัตราการอบแห้งที่สูงขึ้น และมีความสิ้นเปลืองพลังงานลดลง อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาที่กำลังรังสีอินฟราเรดเท่ากัน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้งความสิ้นเปลืองพลังงานมีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย การอบแห้งรังไหมด้วยรังสีอินฟราเรด 600 W ร่วมกับอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 60, 70 และ 80 °C ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีค่าเท่ากับ 9.66, 9.77 และ 9.41 MJ/kg_{water} ตามลำดับ ขณะที่กำลังอินฟราเรด 800 W อุณหภูมิอากาศ 60, 70 และ 80 °C จะให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเท่ากับ 6.59, 6.89 และ 7.18 MJ/kg_{water} ตามลำดับ



ภาพที่ 4.1 อัตราการอบแห้งรังไหม



ภาพที่ 4.2 ปริมาณไฟฟ้าที่ใช้อบแห้งรังไหม

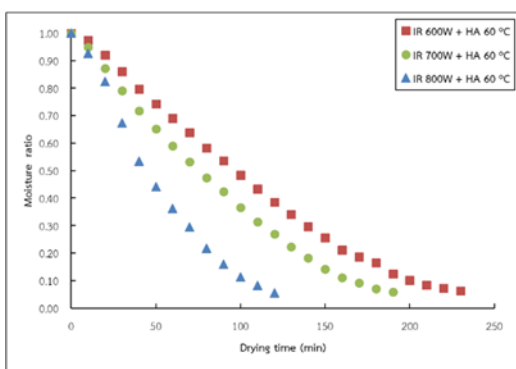


ภาพที่ 4.3 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้งรังไหม

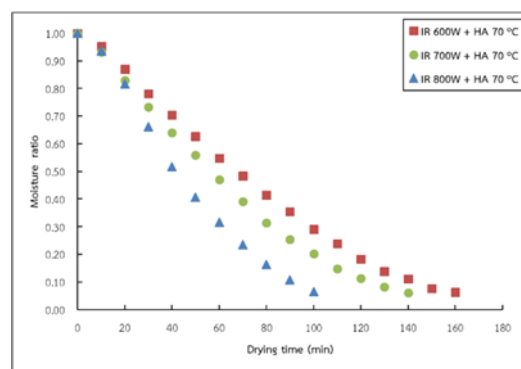
การศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งรังไหมด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับอากาศร้อน

1. คุณลักษณะการอบแห้งรังไหม

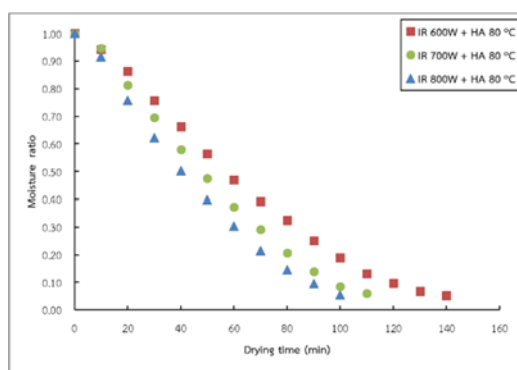
จากภาพที่ 4.4 (a)-(c) แสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงความชื้นรังไหมระหว่างการอบแห้งที่กำลังอินฟราเรด 600, 700 และ 800 W ร่วมกับอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 60, 70 และ 80 °C พบว่า อุณหภูมิอากาศร้อนคงที่ เมื่อเพิ่มกำลังรังสีอินฟราเรดสูงขึ้น ใช้เวลาการอบแห้งลดลง จากภาพที่ 4.4 (a) การอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 60 °C ร่วมกับรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 600, 700 และ 800 W ใช้เวลาในการอบแห้ง 230, 190 และ 120 นาที ตามลำดับ ขณะที่อุณหภูมิ 70 °C (ภาพที่ 4.4 (b)) รังสีอินฟราเรดที่กำลัง 600, 700 และ 800 W ใช้เวลาในการอบแห้งเท่ากับ 160, 140 และ 100 นาที ตามลำดับ ส่วนอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80 °C (ภาพที่ 4.4 (c)) รังสีอินฟราเรดที่กำลัง 600, 700 และ 800 W ใช้เวลาในการอบแห้ง 140, 110 และ 100 นาที ตามลำดับ



(a)



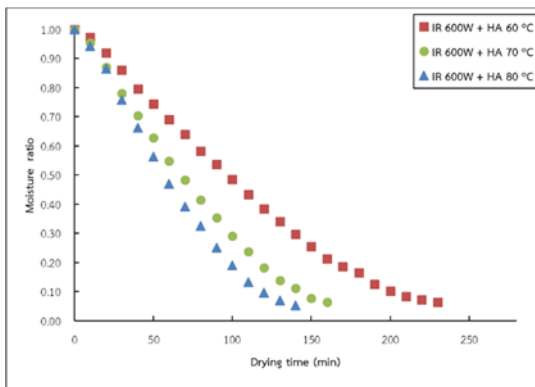
(b)



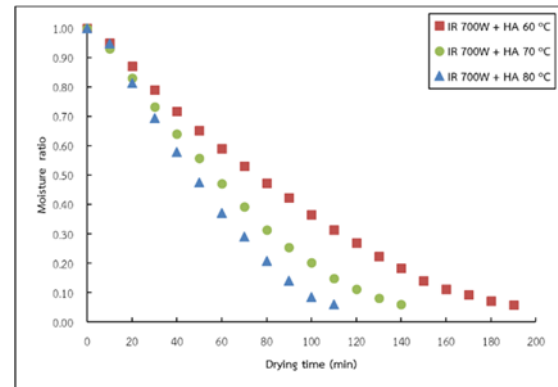
(c)

ภาพที่ 4.4 ค่าอัตราส่วนความชื้นรังไหมกับระยะเวลาในการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 600, 700 และ 800 W ที่อุณหภูมิอากาศ (a) 60, (b) 70 และ (c) 80 °C

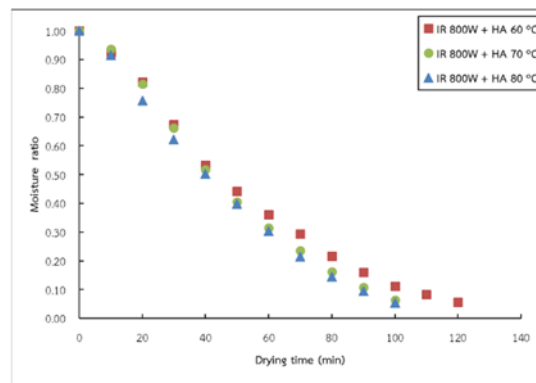
จากภาพที่ 4.5 (a)-(c) เมื่ออบแห้งรังไหมด้วยกำลังอินฟราเรดคงที่ พบว่า เวลาในการอบแห้งลดลงตามอุณหภูมิอากาศร้อนที่เพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มกำลังอินฟราเรดสูงขึ้นระยะเวลาอบแห้งของแต่ละอุณหภูมิมีค่าที่ใกล้เคียงกันมากขึ้น จากภาพที่ 4.5 (c) ที่กำลังอินฟราเรด 800 W อุณหภูมิอากาศร้อน 70 และ 80 °C ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ระยะเวลาอบแห้งที่เท่ากัน คือ 100 นาที แต่ค่าอัตราส่วนความชื้นของรังไหมที่อบแห้งด้วยอุณหภูมิอากาศร้อน 80 °C มีค่าต่ำกว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อน 70 °C โดยที่ อุณหภูมิอากาศร้อน 80 และ 70 °C ค่าอัตราส่วนความชื้นของรังไหมเท่ากับ 0.055 และ 0.065 ตามลำดับ



(a)

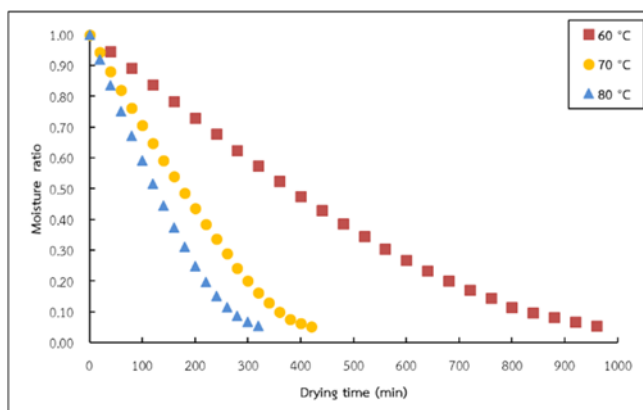


(b)



(b)

ภาพที่ 4.5 ค่าอัตราส่วนความชื้นรังไหมกับระยะเวลาในการอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 60, 70 และ 80 °C ร่วมกับรังสีอินฟราเรดที่กำลัง (a) 600, (b) 700 และ (c) 800 W



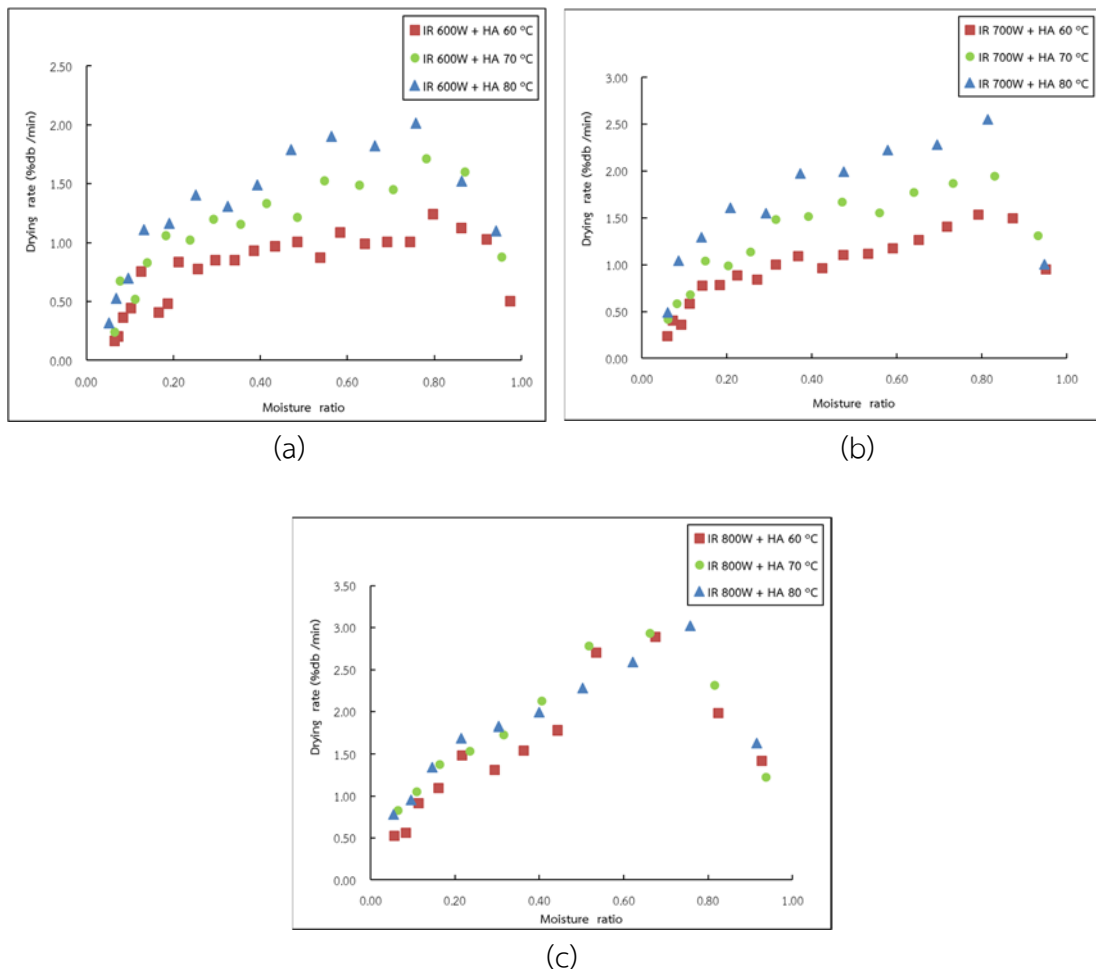
ภาพที่ 4.6 ค่าอัตราส่วนความชื้นรังไหมกับระยะเวลาในการอบแห้งด้วยอากาศที่อุณหภูมิ 60, 70 และ 80 °C

ภาพที่ 4.6 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนความชื้นรังไหมกับเวลาในการอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 60, 70 และ 80 °C พบว่ามีระยะเวลาในการอบแห้งรังไหมเท่ากับ 960, 420 และ 320 นาที ตามลำดับ เปรียบเทียบระยะเวลาในการอบแห้งรังไหมด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับอากาศร้อน และอบแห้งด้วยอากาศร้อนเท่านั้น จะพบว่าการใช้รังสีอินฟราเรดในการอบแห้งรังไหมจะช่วยลดเวลาอบแห้งได้มาก โดยการอบแห้งที่กำลังรังสีอินฟราเรด 800 W อุณหภูมิอากาศร้อน 60, 70 และ 80 °C สามารถลดเวลาในการอบแห้งด้วยอากาศร้อนเพียงอย่างเดียวเท่ากับ 840 ถึง 220 นาที เนื่องจากรังไหมความชื้นส่วนมากมาจากตัวดักแด้ที่อยู่ภายในรังไหม โดยมีเปลือกรังไหมหุ้มดักแด้เอาไว้ ทำให้การอบแห้งด้วยอากาศร้อนซึ่งเป็นการถ่ายโอนความร้อนด้วยการพาความร้อนไปยังดักแด้ได้ไม่ดี เพราะมีเปลือกรังไหมที่เปรียบเสมือนฉนวนที่ป้องกันการถ่ายโอนความร้อนให้กับดักแด้ และการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับอากาศร้อน ขณะที่อบแห้งนั้นเกิดการถ่ายโอนความร้อนทั้งการแผ่รังสีความร้อนและการพาความร้อนไปยังเปลือกรังไหมและดักแด้ที่อยู่ภายใน ส่งผลให้น้ำภายในวัสดุได้รับพลังงานจากการแผ่รังสีความร้อนไปยังภายในวัสดุได้โดยตรงและจากอากาศร้อนที่ผิวสัมผัส ทำให้รังไหมได้รับความร้อนอย่างรวดเร็วและน้ำภายในเนื้อวัสดุถูกถ่ายเทออกไปยังอากาศแวดล้อมเร็วกว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อนเพียงอย่างเดียว

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับอัตราส่วนความชื้นระหว่างการอบแห้งรังไหม ภาพที่ 4.7 แสดงลักษณะเส้นโค้งอัตราการอบแห้งในการอบแห้งรังไหมด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 60, 70 และ 80 °C ร่วมกับรังสีอินฟราเรดกำลัง 600, 700 และ 800 W พบว่า ที่กำลังอินฟราเรด 800 W มีอัตราการอบแห้งสูงที่สุด เนื่องจากการเพิ่มกำลังอินฟราเรด วัสดุได้รับพลังงานความร้อนเพิ่มขึ้นเป็นผลให้เกิดการถ่ายโอนความร้อนได้ดี และช่วยให้เกิดการเคลื่อนที่ของน้ำภายในเนื้อวัสดุออกสู่ผิววัสดุได้อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ยังพบว่า ทุกเงื่อนไขของการอบแห้งมีอัตราการอบแห้ง 2 ช่วง คือ ช่วงอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นและลดลง ขณะเริ่มต้นการอบแห้งจะอยู่ในช่วงอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นเป็นช่วงระยะเวลาสั้นๆ เนื่องจากช่วงเริ่มต้นในช่วงนี้ผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นสูงสามารถดูดกลืนรังสีอินฟราเรดได้มากทำให้ผลิตภัณฑ์มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และอัตราการระเหยน้ำออกจากผลิตภัณฑ์มีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อการอบแห้งดำเนินต่อไปจนกระทั่งอัตราส่วนความชื้นมีค่าประมาณ 0.8 (ประมาณ 20-40 นาที) การอบแห้งจะอยู่ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงจนถึงสิ้นสุดการทดลอง

ทั้งนี้เนื่องจากการเคลื่อนที่ของน้ำภายในผลิตภัณฑ์มายังผิวเกิดช้ากว่าการพาความชื้นจากผิวไปยังอากาศ สอดคล้องกับรายงานการวิจัยของ Ponkham et al. (2012)

จากภาพที่ 4.7 เมื่อพิจารณาอุณหภูมิอากาศอบแห้งมีผลต่ออัตราการอบแห้ง พบว่า ที่กำลังรังสีอินฟราเรด 600 และ 700 W เมื่อเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้งส่งผลให้มีอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ขณะที่กำลังอินฟราเรด 800 W การเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้ง จะทำให้อัตราการอบแห้งแตกต่างกันเล็กน้อย อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 60, 70 และ 80 °C มีอัตราอบแห้งเฉลี่ยเท่ากับ 1.53, 1.79 และ 1.81 %db/min ตามลำดับ



ภาพที่ 4.7 อัตราการอบแห้งกับอัตราส่วนความชื้นในการอบแห้งรังสีอินฟราเรดด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ร่วมกับรังสีอินฟราเรดกำลัง (a) 600, (b) 700 และ (c) 800 W

2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งรังไหม

ผลวิเคราะห์ทางสถิติของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายค่าอัตราส่วนการอบแห้งจากการทดลองแต่ละอุณหภูมิอบแห้ง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นำมาศึกษาได้แก่ Newton, Page, Henderson and Pabis, Wang and Singh, Logarithmic และ Midilli Kucuk จากผลวิเคราะห์ทางสถิติ ดังตารางที่ 4.2-4.4 พบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ และ Midilli Kucuk สามารถทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นรังไหมระหว่างการอบแห้งรังไหมด้วยกำลังอินฟราเรดร่วมกับอากาศร้อนได้ดีที่สุด ซึ่งมีค่า R^2 มากที่สุด RMSE และ χ^2 น้อยที่สุด ผลการวิจัยสอดคล้องกับรายงานวิจัยของ กลยุทธ์ และ เอกสิทธิ์ (2561) ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้งรังไหมด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดรับรังสีอาทิตย์แบบผสม ซึ่งรังไหมได้รับพลังงานความร้อนจากรังสีอาทิตย์โดยตรงและการพาอากาศร้อน อย่างไรก็ตาม ผลการทดลองไม่สอดคล้องกับรายงานวิจัยของ Singh (2011) ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้งรังไหมโดยใช้อากาศร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์และรังไหมไม่ได้รับรังสีอาทิตย์โดยตรง อุณหภูมิอากาศร้อนอบแห้งระหว่างวันอยู่ในช่วง 50 ถึง 75 °C พบว่า แบบจำลอง Wang and Singh มีความเหมาะสมในการทำนายการอบแห้งรังไหม ทั้งนี้เนื่องจากการอบแห้งที่ใช้วิธีแตกต่างกัน โดยการอบแห้งของ Singh รังไหมได้รับความร้อนจากการพาอากาศร้อนเท่านั้น

ผลการวิเคราะห์ค่าคงที่แบบจำลอง Midilli Kucuk และรูปแบบสมการในการทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นรังไหมระหว่างการอบแห้งที่เงื่อนไขต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 4.5 ผลการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนความชื้นรังไหมที่ได้จากการทดลองกับการทำนายจากแบบจำลอง Midilli Kucuk แสดงดังภาพที่ 4.8 (a)-(c) พบว่า ค่าอัตราส่วนความชื้นจากการทำนายมีความกลมกลืนกับค่าจากการทดลอง และจากภาพที่ 4.9 (a)-(c) จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นรังไหมที่ได้จากการทำนายกับการทดลองมีความใกล้เคียงกับเส้นทวนสอบความแม่นยำ หรือเส้นตรงที่ความชัน 45 องศา ซึ่งบ่งบอกว่าแบบจำลองมีความแม่นยำในการทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นรังไหมระหว่างการอบแห้ง

ตารางที่ 4.2 ค่าทางสถิติของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งรังไหมด้วยรังสีอินฟราเรดที่ กำลัง 600, 700 และ 800 W ร่วมกับอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 60 °C

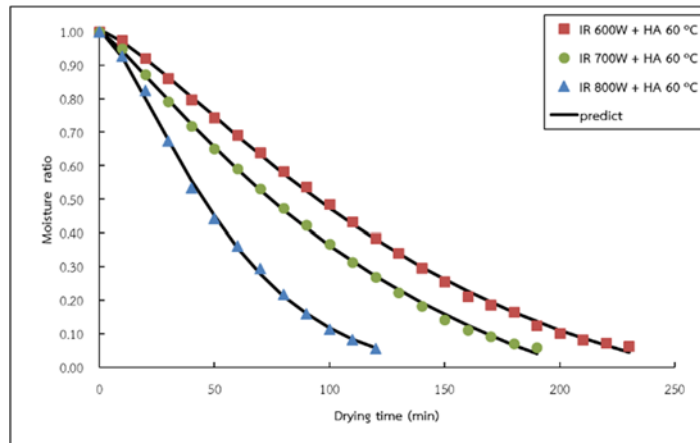
Drying model	Infrared power (W)	R ²	RMSE	χ^2
Newton	600	0.95418	0.06525	0.00444
	700	0.96781	0.05383	0.00305
	800	0.96472	0.05938	0.00382
Page	600	0.99794	0.01385	0.00021
	700	0.99706	0.01626	0.00029
	800	0.99877	0.01108	0.00015
Henderson and Pabis	600	0.97148	0.05148	0.00289
	700	0.97835	0.04414	0.00216
	800	0.97723	0.04770	0.00329
Wang and Singh	600	0.99570	0.01999	0.00044
	700	0.99869	0.01088	0.00013
	800	0.99330	0.01088	0.00013
Logarithmic	600	0.99685	0.01711	0.00033
	700	0.99848	0.01168	0.00016
	800	0.99387	0.02474	0.00080
Midilli Kucuk	600	0.99930	0.00807	0.00008
	700	0.99928	0.00803	0.00008
	800	0.99885	0.01070	0.00017

ตารางที่ 4.3 ค่าทางสถิติของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งรังไหมด้วยรังสีอินฟราเรดที่ กำลัง 600, 700 และ 800 W ร่วมกับอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 70 °C

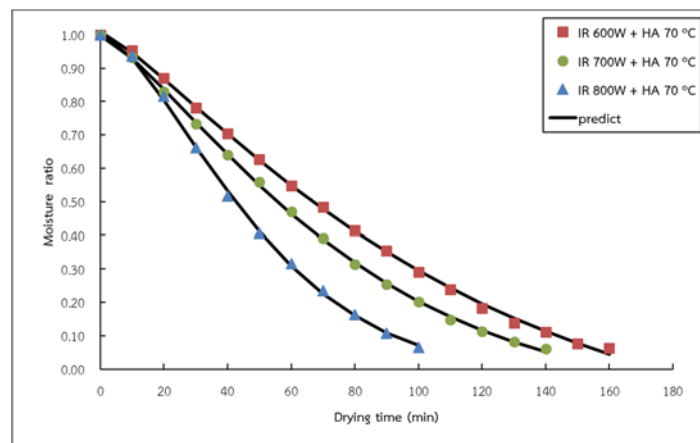
Drying model	Infrared power (W)	R ²	RMSE	χ^2
Newton	600	0.95715	0.06350	0.00428
	700	0.96420	0.05820	0.00363
	800	0.94955	0.07195	0.00569
Page	600	0.99805	0.01355	0.00021
	700	0.99872	0.01101	0.00014
	800	0.99934	0.00823	0.00008
Henderson and Pabis	600	0.97192	0.05140	0.00299
	700	0.97576	0.04789	0.00265
	800	0.96626	0.05883	0.00423
Wang and Singh	600	0.99651	0.01811	0.00037
	700	0.99718	0.01635	0.00031
	800	0.98999	0.03205	0.00126
Logarithmic	600	0.99731	0.01592	0.00031
	700	0.99715	0.01641	0.00034
	800	0.99237	0.02797	0.00108
Midilli Kucuk	600	0.99935	0.00781	0.00008
	700	0.99970	0.00533	0.00004
	800	0.99941	0.00781	0.00010

ตารางที่ 4.4 ค่าทางสถิติของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งรังไหมด้วยรังสีอินฟราเรดที่ กำลัง 600, 700 และ 800 W ร่วมกับอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 80 °C

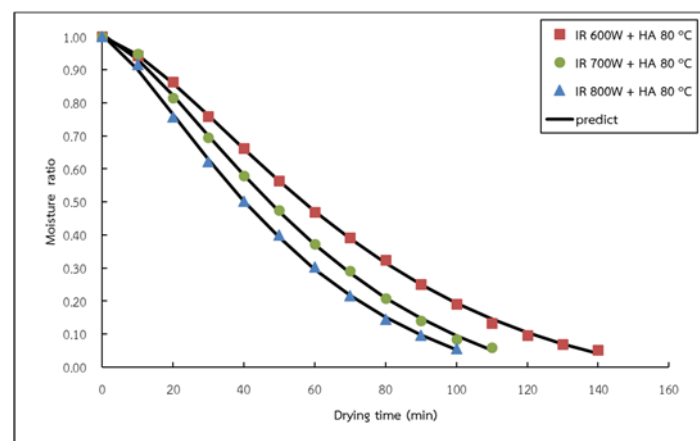
Drying model	Infrared power (W)	R ²	RMSE	χ^2
Newton	600	0.94922	0.07185	0.00553
	700	0.94734	0.07331	0.00586
	800	0.96276	0.06098	0.00409
Page	600	0.99903	0.00992	0.00011
	700	0.99863	0.01185	0.00017
	800	0.99866	0.01156	0.00016
Henderson and Pabis	600	0.96618	0.05864	0.00397
	700	0.96429	0.06037	0.00437
	800	0.97386	0.05109	0.00319
Wang and Singh	600	0.99318	0.02633	0.00080
	700	0.99316	0.02642	0.00084
	800	0.99627	0.01930	0.00046
Logarithmic	600	0.99463	0.02338	0.00068
	700	0.99509	0.02240	0.00067
	800	0.99662	0.01836	0.00046
Midilli Kucuk	600	0.99967	0.00580	0.00005
	700	0.99948	0.00726	0.00008
	800	0.99958	0.00649	0.00007



(a)

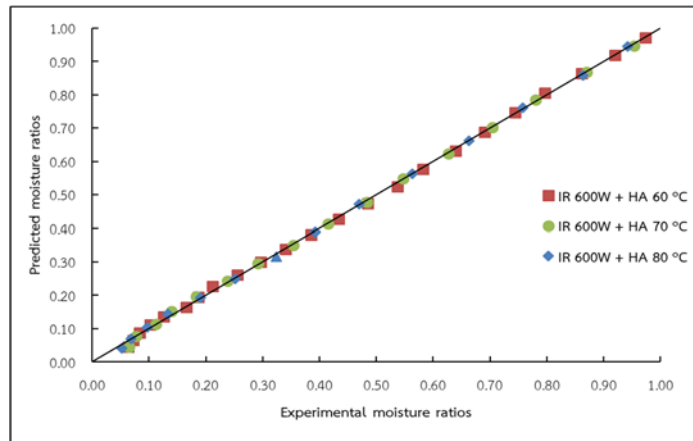


(b)

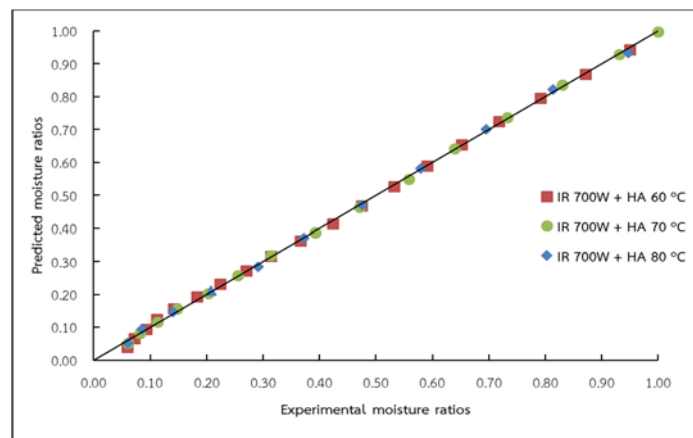


(c)

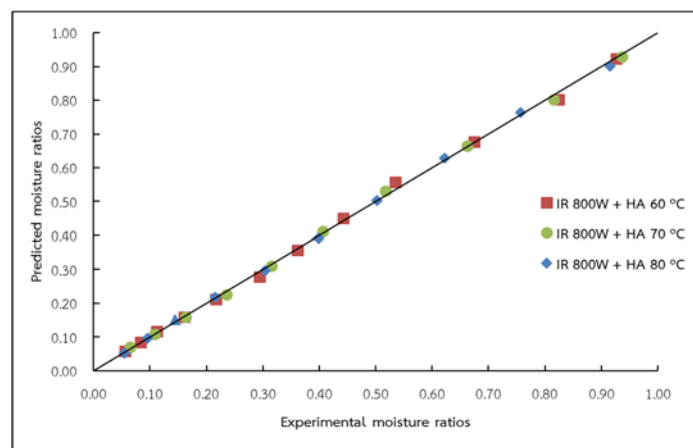
ภาพที่ 4.8 เปรียบเทียบค่าอัตราส่วนความชื้นจากการทำนายด้วยแบบจำลอง Midilli Kucuk กับ ค่าจากการทดลองที่กำลังรังสีอินฟราเรด 600, 700 และ 800 W อุณหภูมิอากาศอบแห้ง (a) 60, (b) 70 และ (c) 80 °C



(a)



(b)



(c)

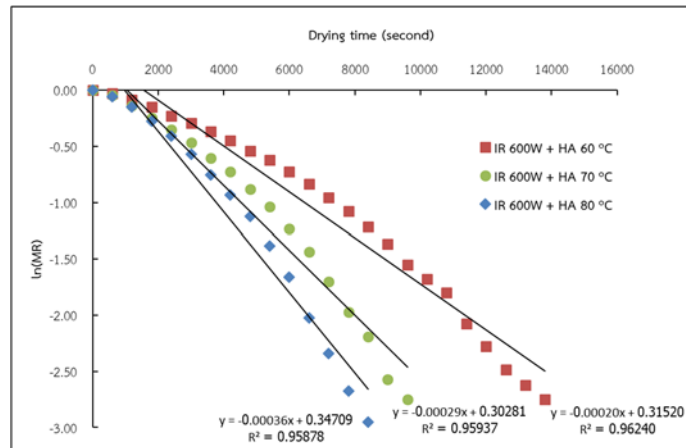
ภาพที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนความชื้นจากการทำนายด้วยแบบจำลอง Midilli Kucuk กับ ค่าจากการทดลองที่กำลังรังสีอินฟราเรด 600, 700 และ 800 W อุณหภูมิอากาศอบแห้ง (a) 60, (b) 70 และ (c) 80 °C

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าคงที่แบบจำลอง Midilli Kucuk รูปแบบสมการทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นแห้งระหว่างการอบแห้ง

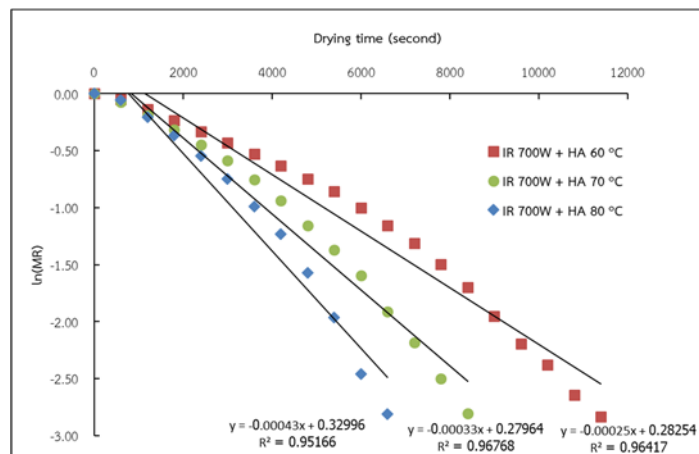
Drying condition	Midilli Kucuk Model parameter				Equation
	a	k	n	b	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$
IR 600W+ HA 60°C	1.00741	0.00166	1.30282	-0.00041	$MR=1.00741\exp(-0.00166t^{1.30282})-0.00041t$
IR 600W+ HA 70°C	1.01093	0.00327	1.24284	-0.00077	$MR=1.01093\exp(-0.00327t^{1.24284})-0.00077t$
IR 600W+ HA 80°C	1.00128	0.00195	1.43868	-0.00036	$MR=1.00128\exp(-0.00195t^{1.43868})-0.00036t$
IR 700W+ HA 60°C	1.00710	0.00408	1.15827	-0.00068	$MR=1.00710\exp(-0.00408t^{1.15827})-0.00068t$
IR 700W+ HA 70°C	0.99857	0.00320	1.31870	-0.00045	$MR=0.99857\exp(-0.00320t^{1.31870})-0.00045t$
IR 700W+ HA 80°C	1.00719	0.00268	1.42188	-0.00061	$MR=1.00719\exp(-0.00268t^{1.42188})-0.00061t$
IR 800W+ HA 60°C	1.00768	0.00362	1.37732	-0.00011	$MR=1.00768\exp(-0.00362t^{1.37732})-0.00011t$
IR 800W+ HA 70°C	1.00854	0.00260	1.48843	-0.00015	$MR=1.00854\exp(-0.00260t^{1.48843})-0.00015t$
IR 800W+ HA 80°C	1.00540	0.00491	1.32100	-0.00064	$MR=1.00540\exp(-0.00491t^{1.32100})-0.00064t$

3. สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น

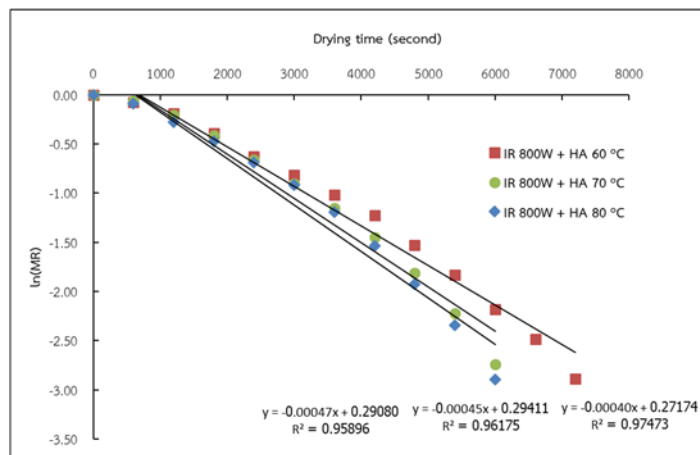
การวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ขึ้นคำนวณจากค่าความชันของกราฟเส้นตรงของความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(MR)$ กับ เวลาการอบแห้ง (t) ดังภาพที่ 4.10 ผลการศึกษาพบว่า เมื่อเพิ่มกำลังอินฟราเรดและอุณหภูมิอากาศสูงขึ้น ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากทำให้วัสดุได้รับความร้อนเพิ่มขึ้น ทำความดันไอในวัสดุเพิ่มขึ้น ช่วยเร่งให้การถ่ายเทมวลน้ำออกจากวัสดุได้รวดเร็วยิ่งขึ้น (Thuwapanichayanan et al., 2011) ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นอยู่ในช่วง 1.847×10^{-9} ถึง 4.339×10^{-9} m^2/s ดังแสดงในตารางที่ 4.6 จากรายงานวิจัยของ Usub et al. (2010) ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของผักตบชวีระหว่างอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่อัตราการไหลอากาศ 0.21-0.53 kg/s มีค่าอยู่ในช่วง 1.86×10^{-10} ถึง 2.77×10^{-10} m^2/s และงานวิจัยของ กลยุทธ์ และ เอกสิทธิ์ (2561) ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของรังไหมระหว่างการอบแห้งรังไหมด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดรับรังสีอาทิตย์แบบผสม มีค่าเท่ากับ 9.54×10^{-10} m^2/s



(a)



(b)



(c)

ภาพที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมธรรมชาติของอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่กำลังต่าง ๆ ร่วมกับอากาศอบแห้งที่อุณหภูมิ (a) 60, (b) 70 และ (c) 80 °C

ตารางที่ 4.6 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นรังไหมระหว่างการอบแห้ง

Drying condition	Effective diffusivity (m ² /s)	R ²
IR 600W+ HA 60°C	1.847x10 ⁻⁹	0.9624
IR 600W+ HA 70°C	2.677x10 ⁻⁹	0.9594
IR 600W+ HA 80°C	3.324x10 ⁻⁹	0.9588
IR 700W+ HA 60°C	2.308x10 ⁻⁹	0.9642
IR 700W+ HA 70°C	3.047x10 ⁻⁹	0.9677
IR 700W+ HA 80°C	3.970x10 ⁻⁹	0.9517
IR 800W+ HA 60°C	3.693x10 ⁻⁹	0.9747
IR 800W+ HA 70°C	4.155x10 ⁻⁹	0.9618
IR 800W+ HA 80°C	4.339x10 ⁻⁹	0.9590

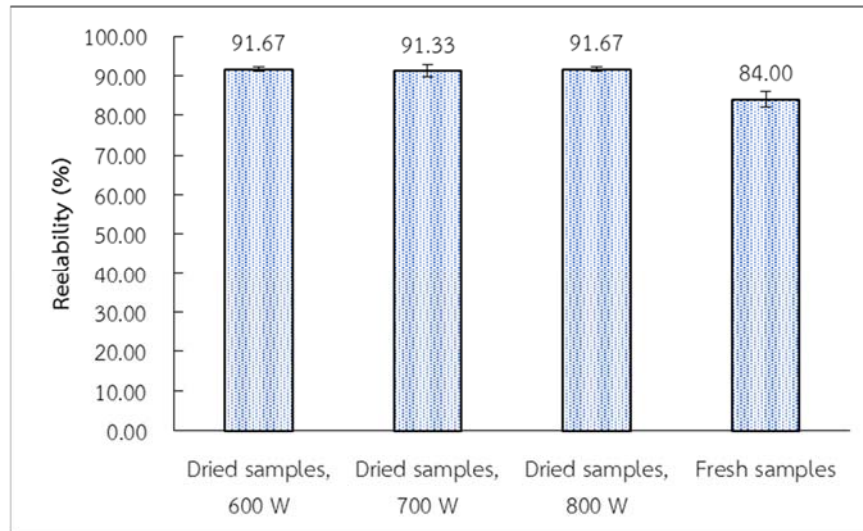
การศึกษาคุณภาพรังไหมหลังการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับอากาศร้อน

จากการอบรังไหมด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับอากาศร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ จากการสังเกตรังไหมหลังการอบแห้ง พบว่า สีของรังไหมยังเหมือนกับรังไหมก่อนอบแห้ง เมื่อเพิ่มกำลังรังสีอินฟราเรดเท่ากับ 900 W รังไหมบางส่วนเกิดการเปลี่ยนสีเป็นสีเหลืองอ่อน และรังไหมบางส่วนมีสีขาว

ผลการประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้งที่พบว่า กำลังรังสีอินฟราเรดมีผลต่ออัตราการอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงาน เมื่อพิจารณากรณีกำลังรังสีอินฟราเรดคงที่ อุณหภูมิอากาศอบแห้งส่งผลต่ออัตราการอบแห้งเช่นกัน ซึ่งอุณหภูมิ 80 °C มีอัตราการอบแห้งสูงสุด แต่อย่างไรก็ตาม การอบแห้งด้วยอุณหภูมิต่างกัน พบว่า ความสิ้นเปลืองพลังงานในการอบแห้งมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้น การศึกษาคุณภาพรังไหมได้เลือกรังไหมที่ผ่านการอบแห้งด้วยรังสีกำลังอินฟราเรด 600, 700 และ 800 W อุณหภูมิ 80 °C มาทดสอบคุณภาพ ได้แก่ ค่าการสาวง่าย ขนาดเส้นไหม ความเหนียว และการยืดตัวของเส้นไหมดิบ

1. การทดสอบสาวรังไหม

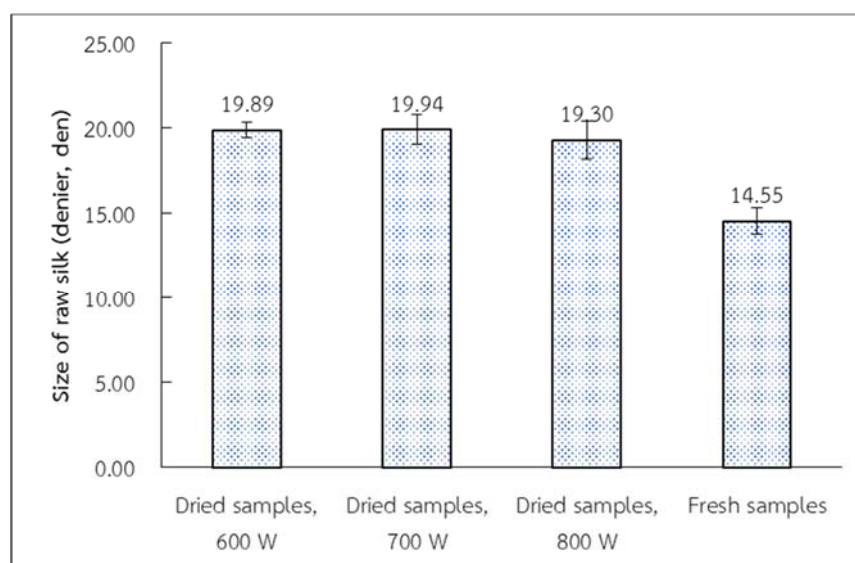
จากการทดสอบสาวรังไหมเพื่อวิเคราะห์ความยากง่ายการสาวรังไหม ดังภาพที่ 4.11 แสดงผลการสาวไหม พบว่า รังไหมที่อบแห้งมีค่าเปอร์เซ็นต์การสาวง่ายไม่แตกต่างกัน โดยมีค่าการสาวง่ายอยู่ในช่วง 91 ถึง 93% และรังไหมสดที่มีความชื้นเท่ากับ 210 %db ค่าการสาวง่ายเท่ากับ 84% ซึ่งมีค่าต่ำกว่ารังไหมอบแห้งอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) นั้นแสดงให้เห็นว่าขณะทดสอบสาวรังไหมอบแห้งนั้นเส้นใยไหมไม่ขาดง่ายคล้ายตัวออกมาได้ดี และรังไหมหลุดร่วงจากพงสาวจำนวนน้อยครั้งกว่ารังไหมสด



ภาพที่ 4.11 ค่าเปอร์เซ็นต์การสาวง่าย

2. ขนาดเส้นไหมดิบ

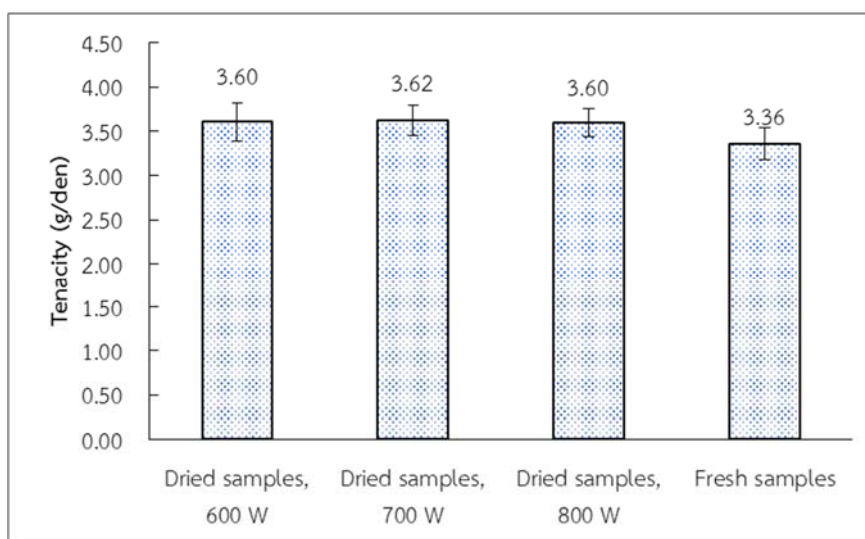
การสาวรังไหมกำหนดจำนวนรังไหมในพงสาวเท่ากับ 10 รัง เส้นไหมดิบที่ได้จากการสาวแล้วทำเกลียวให้รวมเป็นเส้นเดียวกันในขั้นตอนการสาวไหม เมื่อวิเคราะห์ขนาดเส้นไหมในหน่วยดีเนียร์ พบว่า เส้นไหมดิบที่ได้จากการสาวรังไหมอบแห้งจะให้ขนาดเส้นไหมดิบไม่ต่างกัน ($p > 0.05$) มีขนาดอยู่ในช่วง 19.30 ถึง 19.89 den แสดงดังภาพที่ 4.12 เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นไหมดิบจากสาวรังไหมสด พบว่า เส้นไหมดิบจากรังอบแห้งมีขนาดมากกว่าเส้นไหมดิบจากรังไหมสด (14.55 den) แสดงให้เห็นว่า การสาวรังไหมอบแห้งมีมวลและความหนาแน่นเชิงเส้นมากกว่าเส้นไหมดิบจากรังไหมสด



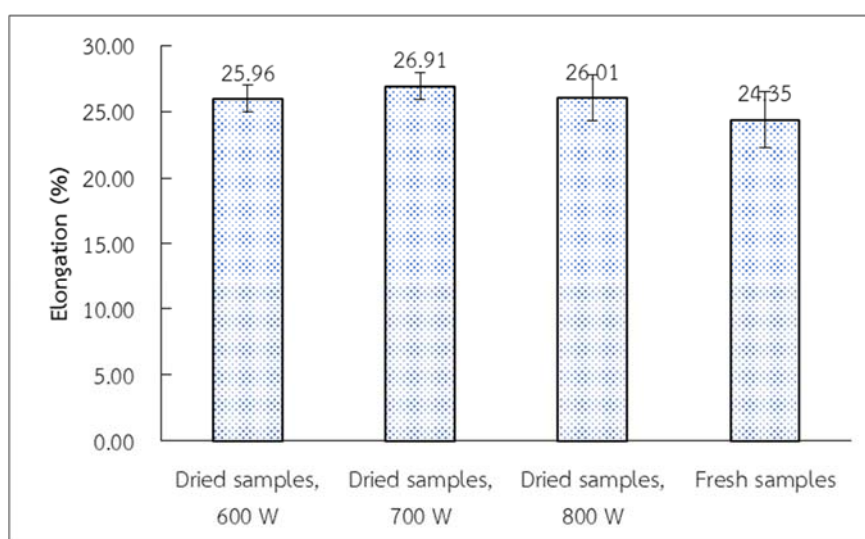
ภาพที่ 4.12 ขนาดเส้นไหมดิบที่สาวจากรังไหมสดและรังไหมอบแห้ง

3. สมบัติเชิงกลของเส้นไหมดิบ

รังไหมที่ผ่านการอบแห้งนำมาสาวเพื่อให้ได้เส้นไหมดิบ จากนั้นนำเส้นไหมดิบมาทดสอบสมบัติเชิงกลได้แก่ ความเหนียว และการยืดตัว ณ จุดขาด เป็นการศึกษาพฤติกรรมของเส้นไหมภายใต้ความเค้น โดยดึงเส้นไหมให้ยืดยาวออกจนถึงจุดที่เส้นไหมเกิดการเสียหายและขาดออกจากกัน จากภาพที่ 4.13 พบว่า เส้นไหมดิบที่สาวจากรังไหมที่ผ่านการอบแห้งด้วยกำลังอินฟราเรด 600, 700 และ 800 W มีค่าความเหนียวของเส้นไหมดิบเท่ากับ 3.60-3.62 g/den ขณะที่เส้นไหมดิบที่สาวได้จากรังไหมสดค่าความเหนียวเท่ากับ 3.36 g/den ซึ่งบ่งบอกถึงเส้นไหมจากรังไหมอบแห้งเส้นไหมมีการยึดเกาะกันสูงขึ้น และสามารถต่อต้านการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ดีกว่าเส้นไหมดิบจากรังไหมสด นอกจากนี้การยืดตัวของเส้นไหมจากรังไหมอบแห้งมีความยืดตัวที่สูงกว่าเส้นไหมดิบจากรังไหมสดเล็กน้อย แสดงดังภาพที่ 4.14



ภาพที่ 4.13 ความเหนียวเส้นไหมดิบที่สาวได้จากรังไหมสดและรังไหมอบแห้ง



ภาพที่ 4.14 การยืดตัวของเส้นไหมดิบที่สาวได้จากรังไหมสดและรังไหมอบแห้ง

การศึกษาทางเศรษฐศาสตร์ของการอบแห้งรังไหม

จากการศึกษาด้านคุณภาพเส้นไหมที่พบว่ารังไหมอบแห้งที่กำลังอินฟราเรด 600, 700 และ 800 W มีคุณภาพเส้นไหมไม่แตกต่างกัน และผลการวิเคราะห์ความสิ้นเปลืองพลังงานในการอบแห้งรังไหมที่กำลังรังสีอินฟราเรด 800 W อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 60-80°C มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานต่ำที่สุด แต่อุณหภูมิ 80°C ใช้เวลาอบแห้งสั้นที่สุด ดังนั้นจึงเลือกวิธีการอบแห้งกำลังรังสีอินฟราเรด 800 W อุณหภูมิอากาศ 80°C มาวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานของการอบแห้งรังไหม รายละเอียดเงื่อนไขการวิเคราะห์และผลการวิเคราะห์ แสดงดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ผลวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานของการอบแห้งรังไหม

Description	Infrared-convective dryer	Hot air dryer
	IR 800 W + HA 80°C	HA 80°C
<u>เงื่อนไขการวิเคราะห์</u>		
ค่าเครื่องอบแห้ง (บาท)	20,000	15,000
ค่าไฟฟ้าต่อหน่วย (บาท)	3	3
ความชื้นรังไหมเริ่มต้น (%db)	210	210
ความชื้นรังไหมสุดท้าย (%db)	12	12
ปริมาณการอบแห้งรังไหมสดต่องวด (kg)	2	2
ปริมาณไฟฟ้าที่ใช้อบแห้งต่องวด (kWh)	2.55	7.89
ระยะเวลาอบแห้งต่องวด (นาที)	120	260
<u>ผลการวิเคราะห์</u>		
ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานต่องวด (บาท)	7.65	23.67
ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานต่อปริมาณการอบรังไหม (บาทต่อกิโลกรัมรังไหมสด)	3.83	11.84
ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานต่อปริมาณผลผลิต (บาทต่อกิโลกรัมรังไหมแห้ง)	10.57	32.74

จากตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการอบแห้งรังไหมด้วยเครื่องอบแห้งโดยใช้รังสีอินฟราเรดที่กำลังไฟฟ้า 800 W ร่วมกับอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 80 °C ผลการคำนวณค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน พบว่า มีค่าใช้จ่ายที่น้อยกว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 80 °C เท่ากับ 67.68 %

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัย

1. การประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้ง

เมื่อเพิ่มกำลังรังสีอินฟราเรดสูงขึ้น ส่งผลต่อค่าความสิ้นเปลืองพลังงานลดลง และอัตราการอบแห้งสูงขึ้น กำลังรังสีอินฟราเรด 800 W มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำที่สุดเท่ากับ 6.59 ถึง 7.18 MJ/kg_{water} ขณะที่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้งสูงขึ้น ความสิ้นเปลืองพลังงานแตกต่างกันเล็กน้อย และอัตราการอบแห้งสูงขึ้น

2. การศึกษาจลพลศาสตร์การอบแห้ง

อัตราการอบแห้ง 2 ช่วง คือ ในช่วงแรกของการอบแห้งอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นและตามด้วยช่วงอัตราลดลง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Midilli Kucuk สามารถทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นของรังไหมและเวลาการอบแห้งได้ดีที่สุด เมื่อเพิ่มกำลังรังสีอินฟราเรดและอุณหภูมิอากาศอบแห้งสูงขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นเพิ่มขึ้น มีค่าเท่ากับ 1.847×10^{-9} ถึง 4.339×10^{-9} m²/s

3. การศึกษาคุณภาพรังไหมอบแห้ง

รังไหมอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดกำลัง 600,700 และ 800 W ร่วมกับอากาศร้อนอุณหภูมิ 80 °C กำลังรังสีอินฟราเรดไม่มีผลต่อคุณภาพรังไหม การสาวรังไหมอบแห้งมีค่าเปอร์เซ็นต์การสาวง่ายมากกว่ารังไหมสด ขนาดเส้นไหมดิบอยู่ในช่วง ช่วง 19.30 ถึง 19.89 den ค่าสมบัติเชิงกลของเส้นไหมดิบด้านความเหนียว เท่ากับ 3.60 ถึง 3.62 g/den และการยืดตัวของเส้นไหมดิบเท่ากับ 25.96 ถึง 26.9120%

4. การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

การอบแห้งรังไหมด้วยเครื่องอบแห้งโดยรังสีอินฟราเรดร่วมกับอากาศร้อน มีค่าใช้จ่ายด้านพลังงานเท่ากับ 3.83 บาทต่อกิโลกรัมรังไหมสด หรือ 10.57 บาทต่อกิโลกรัมรังไหมแห้ง เมื่อเปรียบเทียบเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนค่าใช้จ่ายลดลง

อภิปรายผล

การอบแห้งรังไหมด้วยแผ่รังสีอินฟราเรด การเพิ่มกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแท่งอินฟราเรดสูงขึ้น ส่งผลให้ความเข้มของรังสีที่แผ่จากแท่งอินฟราเรดเพิ่มขึ้น ทำให้รังไหมได้รับพลังงานความร้อนเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ด้วยเหตุนี้ทำให้น้ำภายในรังไหมสามารถระเหยได้เร็วขึ้น เนื่องจากพฤติกรรมการให้ความร้อนของการแผ่รังสี จะมีข้อแตกต่างจากการให้ความร้อนด้วยอากาศร้อน คือ ความร้อนจากแท่งอินฟราเรดจะถูกแผ่ไปยังรังไหมโดยตรง โดยไม่ต้องอาศัยตัวกลางการถ่ายเทความร้อน และจากลักษณะรังไหมที่มีเปลือกกรังห่อหุ้มตัวดักแต่ไหมไว้ภายใน ซึ่งเป็นตัวต้านทานการส่งถ่ายความร้อน

จากอากาศสู่ผักแต่ที่อยู่ภายในรังไหม ดังนั้นการอบรังไหมด้วยการแผ่รังสีอินฟราเรดส่งผ่านพลังงานไปยังตัวผักแต่ได้ดีขึ้นและมีอัตราการอบแห้งที่สูง ความสิ้นเปลืองพลังงานในการอบแห้งลดลง ส่งผลต่อค่าใช้จ่ายด้านพลังงานในการดำเนินงานลดลงด้วยเช่นเดียวกัน

ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้

การอบแห้งรังไหมด้วยเครื่องอบแห้งโดยใช้รังสีอินฟราเรดร่วมกับอากาศร้อนในการวิจัยนี้ เนื่องจากความชื้นเริ่มต้นรังไหมอาจมีค่าที่เปลี่ยนแปลงไปจากตัวอย่างที่นำมาศึกษา จากผลการศึกษาด้าน จลนพลศาสตร์การอบแห้ง แนะนำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Midilli Kucuk สำหรับทำนายระยะเวลาอบแห้ง จากผลศึกษาด้านสมรรถนะการอบแห้ง และคุณภาพของเส้นไหม ควรเลือกใช้กำลังรังสีอินฟราเรด 800 W ร่วมกับอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 80 °C

ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยครั้งต่อไป

ศึกษาการอบแห้งรังไหมด้วยคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งไม่ต้องอาศัยตัวกลางในการส่งถ่ายความร้อน รังสีหรือคลื่นความร้อนจึงถูกส่งไปยังผิวของเนื้อโดยตรง และคลื่นความร้อนบางส่วนสามารถทะลุผ่านเข้าไปผิวในของวัสดุได้ สามารถสร้างความร้อนภายในวัสดุได้ดี ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการอบแห้งสูงขึ้น และศึกษาระยะเวลาในการเก็บรังไหมหลังการอบแห้งที่อาจจะส่งผลต่อคุณภาพรังไหม

บรรณานุกรม

บรรณานุกรมภาษาไทย

- กรมหม่อนไหม. (2554). *ความรู้ด้านรังไหม*. สืบค้น 30 ตุลาคม 2559, จาก <http://www.qsds.go.th/KMweb/knowledge/knowledge21.html>
- กรมหม่อนไหม. (2556). *ไหมพันธุ์รับรองของกรมวิชาการเกษตร*. สืบค้น 30 ตุลาคม 2559, จาก http://www.qsds.go.th/qssc_lei/inside_page.php?pageid=27
- กลยุทธิ์ ดิจริง และ เอกสิทธิ์ สุทธิระพินทุ (2561). การอบแห้งรังไหมด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดรับรังสีอาทิตย์แบบผสม: จลพลศาสตร์การอบแห้ง สมรรถนะเครื่องอบแห้ง และสมบัติเชิงกลของเส้นไหมดิบ. *วารสารเกษตรพระวรุณ*, 15(1), 216-228.
- วรพจน์ รักสังข์. (2553). *โครงการวิจัยและพัฒนา ตู้อบรังไหมขนาดเล็กเพื่อเกษตรกรรายย่อย*. สืบค้น 30 มิถุนายน 2560, จาก http://www.qsds.go.th/research/abstract.php?r_id=127
- ศิริพร บุญชู, ภัควิภา เพชรวิจิตร และกนกวรรณ คุณาธรรม. (2557). *มาตรฐานหม่อนไหม*. กรุงเทพฯ: ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย.
- สมชาติ โสภณธณฤทธิ. (2540). *การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท* (พิมพ์ครั้งที่3). กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- สมหญิง ชูประยูร. (2557). *องค์ความรู้การพัฒนามลิตภัณฑ์ไหมไทย*. สืบค้น 30 มิถุนายน 2560, จาก http://www.qsds.go.th/newqsds/file_upload/2015-02-05-Knowledge_book.pdf
- สักกมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา. (2555). *การอบแห้งอาหารและวัสดุชีวภาพ*. กรุงเทพฯ: ท็อป.
- สุนทร สืบคำ, และฤทธิชัย อัครราชันย์. (2554). แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งวัสดุพรม. *วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย*, 17(1), 59-67.
- สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ. (2556). *มาตรฐานสินค้าเกษตร มกษ. 8002-2556 เส้นไหมดิบ เล่ม 2 : เส้นไหมสาวด้วยเครื่องจักร*. สืบค้น 30 มิถุนายน 2560, จาก http://www.acfs.go.th/standard/download/RAW_SILK_VOLUME_2.pdf
- สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ. (2558). *มาตรฐานสินค้าเกษตร มกษ. 9042-2558 เส้นไหมดิบ เล่ม 3: วิธีชักตัวอย่างและทดสอบ เส้นไหมสาวด้วยเครื่องจักร*. สืบค้น 30 มิถุนายน 2560, จาก <http://www.acfs.go.th/standard/download/SILK-YARN.pdf>

บรรณานุกรมภาษาต่างประเทศ

- Aghbashlo, M., Kianmehr, M.H., & Arabhosseini, A. (2009). Modeling of thin-layer drying of potato slices in length of continuous band dryer. *Energy Conversion and Management*, 50, 1348–1355.
- Babu, K.M. (2013). *Silk: Processing, Properties and Applications*. Woodhead Publishing.
- 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.
- Lechtanska, J.M., Szadzinska, J., & Kowalski, S.J. (2015). Microwave- and infrared-assisted convective drying of green pepper: quality and energy considerations. *Chemical Engineering and Processing*, 98, 155–164.
- Nowak, D., & Lewicki, P. P. (2004). Infrared drying of apple slices. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 5, 353–360.
- Onwude, D. I., Hashim. N., Abdan, K., Janius, R., & Chen., G. (2019). The effectiveness of combined infrared and hot-air drying strategies for sweet potato. *Journal of Food Engineering*, 241, 75–87.
- Ponkham, K., Meeso, N., Soponronnarit, S., & Siriamornpun, S. (2012). Modeling of combined far-infrared radiation and air drying of a ring shaped-pineapple with/without shrinkage. *Food and Bioprocess Processing*, 90, 155–164.
- Singh, P.L. (2011). Silk cocoon drying in forced convection type solar dryer. *Applied Energy*, 88, 1720–1726.
- Singh, R. P., & Heldman, D. R. (2009). *Introduction to Food Engineering* (4th ed.). China: Elsevier.
- Supmoon, N., & Noomhorm, A. (2013). Influence of combined hot air impingement and infrared drying on drying kinetics and physical properties of potato chips. *Drying Technol*, 31, 24–3.
- Sun, J., Hu, X., Zhao, G., Wu, J., Wang, Z., Chen, F., & Liao, X. (2007). Characteristics of thin-layer infrared drying of apple pomace with and without hot air pre-drying. *Food Science and Technology International*, 13, 91–97.
- Thuwapanichayanan, R., Prachayawarakorn, S., Kunwisawa, J., & Soponronnarit, S. (2011). Determination of effective moisture diffusivity and assessment of quality attributes of banana slices during drying. *Food Science and Technology*, 44, 1502-1510.

- Tirawanichakul, S., Chanchiew, S., & Tirawanichakul., Y. (2013). Pennywort Drying using Infrared Radiation: Drying Kinetics, Energy Consumption and Quality Aspect. *KKU Res. J*, 18(2), 311-324.
- Usub, T., Lertsatitthakorn, C., Poomsa-ad, N., Wiset, L., Siriamornpun, S., & Soponronnarit, S. (2010). Thin layer solar drying characteristics of silkworm pupae. *Food and Bioproducts Processing*, 88, 149–160.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
ข้อมูลการอบแห้งรังไหม

ตารางที่ ก-1 ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความชื้นรังไหมระหว่างการอบแห้งด้วยกำลังอินฟราเรด 600 W
อุณหภูมิอากาศ 60 °C

เวลา (min)	ความชื้น (%db)	อัตราส่วน ความชื้น	เวลา (min)	ความชื้น (%db)	อัตราส่วน ความชื้น
0	191.65	1.00	120	73.79	0.39
10	186.60	0.97	130	65.24	0.34
20	176.31	0.92	140	56.70	0.30
30	165.05	0.86	150	48.93	0.26
40	152.62	0.80	160	40.58	0.21
50	142.52	0.74	170	35.73	0.19
60	132.43	0.69	180	31.65	0.17
70	122.52	0.64	190	24.08	0.13
80	111.65	0.58	200	19.61	0.10
90	102.91	0.54	210	15.95	0.08
100	92.82	0.48	220	13.89	0.07
110	83.11	0.43	230	12.22	0.06

ตารางที่ ก-2 ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความชื้นรังไหมระหว่างการอบแห้งด้วยกำลังอินฟราเรด 600 W
อุณหภูมิอากาศ 70 °C

เวลา (min)	ความชื้น (%db)	อัตราส่วน ความชื้น	เวลา (min)	ความชื้น (%db)	อัตราส่วน ความชื้น
0	191.69	1.00	80	79.43	0.41
10	182.87	0.95	90	67.83	0.35
20	166.82	0.87	110	55.84	0.29
30	149.65	0.78	120	34.96	0.18
40	135.11	0.70	130	26.64	0.14
50	120.22	0.63	140	21.42	0.11
60	104.95	0.55	150	14.66	0.08
70	92.77	0.48	160	12.24	0.06

ตารางที่ ก-3 ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความชื้นรังไหมระหว่างการอบแห้งด้วยกำลังอินฟราเรด 600 W
อุณหภูมิอากาศ 80 °C

เวลา (min)	ความชื้น (%db)	อัตราส่วน ความชื้น	เวลา (min)	ความชื้น (%db)	อัตราส่วน ความชื้น
0	191.68	1.00	80	62.19	0.32
10	180.70	0.94	90	48.16	0.25
20	165.49	0.86	100	36.51	0.19
30	145.32	0.76	110	25.41	0.13
40	127.08	0.66	120	18.45	0.10
50	108.04	0.56	130	13.18	0.07
60	90.14	0.47	140	10.00	0.05
70	75.26	0.39			

ตารางที่ ก-4 ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความชื้นรังไหมระหว่างการอบแห้งด้วยกำลังอินฟราเรด 700 W
อุณหภูมิอากาศ 60 °C

เวลา (min)	ความชื้น (%db)	อัตราส่วน ความชื้น	เวลา (min)	ความชื้น (%db)	อัตราส่วน ความชื้น
0	191.68	1.00	100	70.29	0.37
10	182.12	0.95	110	60.24	0.31
20	167.11	0.87	120	51.77	0.27
30	151.70	0.79	130	42.86	0.22
40	137.58	0.72	140	35.01	0.18
50	124.92	0.65	150	27.22	0.14
60	113.13	0.59	160	21.37	0.11
70	101.92	0.53	170	17.72	0.09
80	90.87	0.47	180	13.65	0.07
90	81.24	0.42	190	11.25	0.06

ตารางที่ ก-5 ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความชื้นรังไหมระหว่างการอบแห้งด้วยกำลังอินฟราเรด 700 W
อุณหภูมิอากาศ 70 °C

เวลา (min)	ความชื้น (%db)	อัตราส่วน ความชื้น	เวลา (min)	ความชื้น (%db)	อัตราส่วน ความชื้น
0	191.65	1.00	80	60.22	0.31
10	178.52	0.93	90	48.81	0.25
20	159.05	0.83	100	38.87	0.20
30	140.35	0.73	110	28.42	0.15
40	122.62	0.64	120	21.60	0.11
50	107.04	0.56	130	15.76	0.08
60	90.29	0.47	140	11.59	0.06
70	75.10	0.39			

ตารางที่ ก-6 ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความชื้นรังไหมระหว่างการอบแห้งด้วยกำลังอินฟราเรด 700 W
อุณหภูมิอากาศ 80 °C

เวลา (min)	ความชื้น (%db)	อัตราส่วน ความชื้น	เวลา (min)	ความชื้น (%db)	อัตราส่วน ความชื้น
0	191.65	1.00	60	71.36	0.37
10	181.60	0.95	70	55.88	0.29
20	156.07	0.81	80	39.83	0.21
30	133.25	0.70	90	26.87	0.14
40	111.00	0.58	100	16.43	0.09
50	91.08	0.48	110	11.50	0.06

ตารางที่ ก-7 ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความชื้นรังไหมระหว่างการอบแห้งด้วยกำลังอินฟราเรด 800 W
อุณหภูมิอากาศ 60 °C

เวลา (min)	ความชื้น (%db)	อัตราส่วน ความชื้น	เวลา (min)	ความชื้น (%db)	อัตราส่วน ความชื้น
0	193.40	1.00	70	56.85	0.29
10	179.17	0.93	80	41.95	0.22
20	159.35	0.82	90	30.97	0.16
30	130.39	0.67	100	21.75	0.11
40	103.31	0.53	110	16.07	0.08
50	85.47	0.44	120	10.77	0.06
60	69.98	0.36			

ตารางที่ ก-8 ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความชื้นรังไหมระหว่างการอบแห้งด้วยกำลังอินฟราเรด 800 W
อุณหภูมิอากาศ 70 °C

เวลา (min)	ความชื้น (%db)	อัตราส่วน ความชื้น	เวลา (min)	ความชื้น (%db)	อัตราส่วน ความชื้น
0	191.75	1.00	60	60.49	0.32
10	179.50	0.94	70	45.11	0.24
20	156.32	0.82	80	31.28	0.16
30	126.98	0.66	90	20.76	0.11
40	99.14	0.52	100	12.41	0.06
50	77.83	0.41			

ตารางที่ ก-9 ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความชื้นรังไหมระหว่างการอบแห้งด้วยกำลังอินฟราเรด 800 W
อุณหภูมิอากาศ 80 °C

เวลา (min)	ความชื้น (%db)	อัตราส่วน ความชื้น	เวลา (min)	ความชื้น (%db)	อัตราส่วน ความชื้น
0	191.70	1.00	60	58.21	0.30
10	175.41	0.92	70	41.30	0.22
20	145.15	0.76	80	27.89	0.15
30	119.21	0.62	90	18.37	0.10
40	96.38	0.50	100	10.56	0.06
50	76.48	0.40			

ตารางที่ ก-10 ข้อมูลการใช้พลังงานในอบแห้งรังไหม

Drying Method	Drying time (min)	Energy consumption (kWh)		
		Heater	Infrared	Total
IR 600W+ HA 60°C	230	1.074	2.353	3.427
IR 600W+ HA 70°C	160	1.631	1.835	3.466
IR 600W+ HA 80°C	140	1.874	1.465	3.339
IR 700W+ HA 60°C	190	0.789	2.224	3.013
IR 700W+ HA 70°C	140	1.405	1.669	3.074
IR 700W+ HA 80°C	110	1.692	1.243	2.935
IR 800W+ HA 60°C	120	0.658	1.680	2.338
IR 800W+ HA 70°C	100	1.141	1.304	2.445
IR 800W+ HA 80°C	90	1.356	1.191	2.547

ภาคผนวก ข
ผลการทดสอบคุณภาพรังไหม

ผลการทดสอบคุณภาพรังไหมที่ผ่านอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดกำลัง 600-800 W ร่วมกับอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 80°C แสดงดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ ข-1 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนค่าเปอร์เซ็นต์การสาวง่าย ขนาดเส้นไหม ความเหนียว การยืดตัว และแรงดึงสูงสุด

		N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
						Lower Bound	Upper Bound		
เปอร์เซ็นต์การสาวง่าย	600 W	3	91.6667	.57735	.33333	90.2324	93.1009	91.00	92.00
	700 W	3	91.3333	1.52753	.88192	87.5388	95.1279	90.00	93.00
	800 W	3	91.6667	.57735	.33333	90.2324	93.1009	91.00	92.00
	control	3	84.0000	2.00000	1.15470	79.0317	88.9683	82.00	86.00
	Total	12	89.6667	3.60135	1.03962	87.3785	91.9549	82.00	93.00
ขนาดเส้นไหม	600 W	10	19.8880	.45443	.14370	19.5629	20.2131	18.88	20.40
	700 W	10	19.9360	.87538	.27682	19.3098	20.5622	18.40	20.72
	800 W	10	19.2960	1.10372	.34903	18.5064	20.0856	17.68	20.88
	control	10	14.5520	.77122	.24388	14.0003	15.1037	13.36	15.36
	Total	40	18.4180	2.41200	.38137	17.6466	19.1894	13.36	20.88
ความเหนียว	600 W	10	3.6038	.21590	.06827	3.4494	3.7583	3.25	3.95
	700 W	10	3.6225	.17129	.05417	3.4999	3.7450	3.41	3.88
	800 W	10	3.5953	.15878	.05021	3.4817	3.7089	3.42	3.90
	control	10	3.3596	.18249	.05771	3.2291	3.4901	3.12	3.65
	Total	40	3.5453	.20717	.03276	3.4790	3.6116	3.12	3.95
การยืดตัว	600 W	10	25.9588	1.01404	.32067	25.2334	26.6842	24.45	27.53
	700 W	10	26.9069	1.03584	.32756	26.1659	27.6478	24.90	28.68
	800 W	10	26.0096	1.76324	.55759	24.7483	27.2710	22.11	27.83
	control	10	24.3518	2.13066	.67377	22.8276	25.8760	19.63	26.27
	Total	40	25.8068	1.76624	.27927	25.2419	26.3716	19.63	28.68

ตารางที่ ข-2 ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การสางง่าย

กำลังรังสีอินฟราเรด	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
control	3	84.0000	
700 W	3		91.3333
600 W	3		91.6667
800 W	3		91.6667
Sig.		1.000	.775

ตารางที่ ข-3 ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยขนาดเส้นไหม

กำลังรังสีอินฟราเรด	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
control	10	14.5520	
800 W	10		19.2960
600 W	10		19.8880
700 W	10		19.9360
Sig.		1.000	.775

ตารางที่ ข-4 ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความเหนียวเส้นไหม

กำลังรังสีอินฟราเรด	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
control	10	3.3596	
800 W	10		3.5953
600 W	10		3.6038
700 W	10		3.6225
Sig.		1.000	.758

ตารางที่ ข-5 ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยการยืดตัวเส้นไหม

กำลังรังสีอินฟราเรด	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
control	10	24.3518	
600 W	10		25.9588
800 W	10		26.0096
700 W	10		26.9069
Sig.		1.000	.208

ภาคผนวก ค
เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย



ภาพที่ ค-1 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัล



ภาพที่ ค-2 เครื่องวิเคราะห์ความชื้น



ภาพที่ ค-3 เครื่องบันทึกพลังงานไฟฟ้า



ภาพที่ ค-4 หม้อแปลงปรับแรงดันไฟฟ้า



ภาพที่ ค-5 เครื่องสาวไหมอัตโนมัติ



ภาพที่ ค-6 แปลงใจไหม



ภาพที่ ค-7 เครื่องกรอไหมเข้าหลอด



ภาพที่ ค-8 เครื่องกรอทำเช็ดไหมทดสอบ



ภาพที่ ค-9 เครื่องทดสอบแรงดึง



ภาพที่ ค-10 ตัวอย่างรังไหมอบแห้งสำหรับนำไปสาวทดสอบ



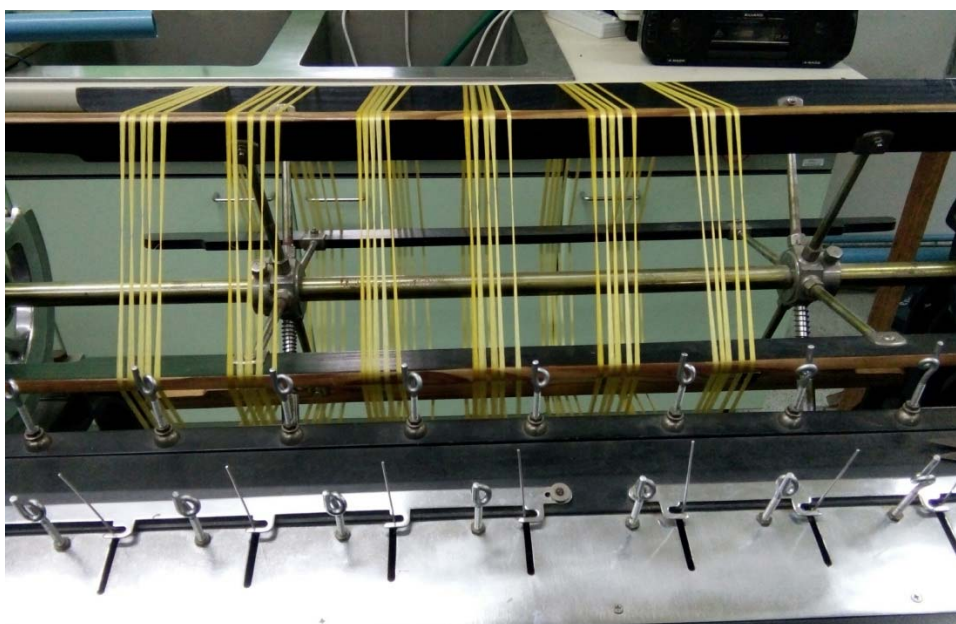
ภาพที่ ค-11 การต้มรังไหมก่อนนำไปสาวด้วยเครื่องสาวไหม



ภาพที่ ค-12 การทำไฟไหม



ภาพที่ ค-13 การนำเส้นไหมเข้าเครื่องกรอไหมเข้าหลอด



ภาพที่ ค-14 การทำเช็ดไหมทดสอบ

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ - นามสกุล
ประวัติการศึกษา

นายกลยุทธ ดิจริง
ระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์
มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี
ระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาเทคโนโลยีพลังงาน มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ชื่อ - นามสกุล
ประวัติการศึกษา

นายพงศธร กองแก้ว
ระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ระดับปริญญาโท วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
สาขาวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่