

การอบแห้งรังไหมด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดรับรังสีอาทิตย์แบบผสม:
 จลพลศาสตร์การอบแห้ง สมรรถนะเครื่องอบแห้ง และสมบัติเชิงกลของเส้นไหมดิบ

กลยุทธ์ ดิจริง* และ เอกสิทธิ์ สุทธะพินทุ

สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม จังหวัดมหาสารคาม 44000

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแนวทางการอบแห้งรังไหมด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดรับรังสีอาทิตย์แบบผสม ซึ่งจะพิจารณาจลพลศาสตร์การอบแห้ง สมรรถนะเครื่องอบแห้งของการอบแห้งรังไหม และสมบัติเชิงกลของเส้นไหมดิบ เครื่องอบแห้งมีส่วนประกอบหลัก คือ ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นร่องรูปตัววี ห้องอบแห้ง และพัดลมใช้บังคับอากาศให้ไหลผ่านตัวเก็บรังสีอาทิตย์และห้องอบแห้ง ทำการทดลองอบแห้งรังไหมจำนวน 5 kg จากความชื้นรังไหมเริ่มต้นประมาณ 220%db จนเหลือความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 10%db ผลการทดลองด้านจลพลศาสตร์การอบแห้ง พบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Midilli Kucuk มีความเหมาะสมในการทำนายการอบแห้ง ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น เท่ากับ $9.54 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ด้านสมรรถนะเครื่องอบแห้ง พบว่า ประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ประสิทธิภาพการอบแห้ง และ ประสิทธิภาพรวมของการอบแห้ง เท่ากับ 37.37, 12.01 และ 8.85% ตามลำดับ ผลการทดสอบสาวไหม พบว่า รังไหมอบแห้งมีเปอร์เซ็นต์การสาวง่ายสูงกว่ารังไหมสด และขนาดเส้นไหมดิบมีค่ามากกว่าเส้นไหมที่สาวได้จากรังไหมสด นอกจากนี้ ค่าความเหนียวและการยืดตัวของเส้นไหมดิบจากรังไหมอบแห้ง มีค่าสูงกว่าเส้นไหมดิบจากรังไหมสด ($P < 0.05$) ดังนั้นเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดรับรังสีอาทิตย์แบบผสมจึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการอบแห้งรังไหมได้

คำสำคัญ: เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ จลพลศาสตร์การอบแห้ง รังไหม เส้นไหมดิบ และ สมบัติเชิงกล

*ผู้เขียนให้ติดต่อ: E-mail: konlatikdee@gmail.com

Cocoon Drying in a Mixed-Mode Solar Dryer: The Drying Kinetics, Dryer Performance and Mechanical Properties of Raw Silk

Konlayut Deejing* and Aekasit Sutthapintu

*Program of Physics, Faculty of Science and Technology,
Rajabhat Maha Sarakham University, Maha Sarakham, 44000, Thailand*

Abstract

The purpose of this research was to study the process of drying cocoon by mixed-mode solar dryer by considering the drying kinetics, performance of the dryer for drying cocoon and mechanical properties of raw silk. The dryer mainly consists of a v-corrugated plate solar collector, drying chamber and a blower was used to force the air throughout the solar collector and the drying chamber. The experiment was done by drying 5 kg of cocoons, with the initial moisture content of 220%db to the final moisture content of 10%db. The results from drying kinetics experiment showed that the Midilli Kucuk model was the appropriate model for the prediction of drying process. The moisture diffusion coefficient was $9.54 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. The performance of dryer showed the collector efficiency, drying efficiency and overall drying efficiency of 37.37%, 12.01% and 8.85%, respectively. Also, the experiment of reeling showed that the reliability percentage of dried cocoons were more than that of fresh cocoons and the size of raw silk were more than the silk reeling from fresh cocoon. Besides this, the tenacity and elongation of raw silk from dry cocoon were more than that of raw silk that from fresh cocoon ($P < 0.05$). Therefore, the mixed-mode solar dryer was found as one of the alternatives for cocoon drying.

Keywords: Solar dryer, Drying kinetics, Cocoon, Raw silk and Mechanical property

* Corresponding author: E-mail: konlatikdee@gmail.com

บทนำ

เส้นไหมเป็นวัตถุดิบที่สำคัญในการทอผ้าไหมของไทย เส้นไหมดิบเป็นเส้นใยโปรตีนประกอบด้วย เส้นใยโพลีอิน ประมาณ 75% และเซรีซิน 25% (Jiang *et al.*, 2006) เส้นไหมได้จากการนำรังไหมมาสาวด้วยพวงสาวไหมพื้นบ้านซึ่งเป็นภูมิปัญญาท้องถิ่นที่สืบทอดกันมา ก่อนทำการสาวไหมต้องทำการคัดเลือกรังไหมเพื่อให้ได้เส้นไหมที่มีขนาดสม่ำเสมอ ซึ่งประเภทของรังไหมที่ไม่นำมาสาวเช่น รังแฝด รังหลวม รังเป็นเชื้อรา และรังเจาะ เป็นต้น รังไหมที่เป็นเชื้อราเกิดจากการอบรังไหมไม่สมบูรณ์ หรือเก็บรังไหมในสถานที่ที่มีความชื้นสูง ส่วนรังเจาะเกิดจากหนอนแมลงวันลายเจริญเติบโตอยู่ภายในแล้วเจาะรัง และสาเหตุหนึ่งเกิดจากเกษตรกรไม่สามารถนำรังไหมที่ผลิตได้จำนวนมากไปสาวไหมให้เสร็จก่อนที่ดักแด้ในรังไหมกลายเป็นผีเสื้อและเจาะรังไหมเป็นผลให้เส้นไหมขาด จากปัญหาที่เกษตรกรประสบในกระบวนการผลิตเส้นไหมดังกล่าว เกษตรกรจึงนำรังไหมมาตากแดดโดยมีจุดประสงค์เพื่อให้ดักแด้ในรังไหมตายเป็นการป้องกันการเจาะรังไหมและสามารถเก็บรังไหมไว้ได้นานโดยไม่เกิดเชื้อราหรือเน่าเสีย แต่วิธีตากแดดมีข้อด้อยคือ ใช้เวลาอบแห้งนาน เมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ (Rabha *et al.*, 2017)

ปัจจุบันระบบการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ได้ถูกออกแบบ พัฒนา และทดสอบ เพื่อเป็นทางเลือกของการอบแห้งซึ่งระบบการอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์มีหลายลักษณะเช่นแบบเรือนกระจกรับรังสีอาทิตย์โดยตรง รับรังสีอาทิตย์โดยอ้อม และรับรังสีอาทิตย์แบบผสม (Tripathy and Kumar, 2009) เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดรับรังสีอาทิตย์แบบผสม นำหลักการของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบรับรังสีอาทิตย์โดยตรง และแบบรับรังสีอาทิตย์โดยอ้อมมาประยุกต์ร่วมกันคือ ห้องอบแห้งมีส่วนทำด้วยวัสดุโปร่งใสเพื่อให้ผลิตภัณฑ์ได้รับพลังงานความร้อนจากรังสีอาทิตย์โดยตรง และมีแผงรับรังสีอาทิตย์ทำหน้าที่ดูดกลืนรังสีอาทิตย์เพื่อสร้างความร้อนให้แก่อากาศสำหรับอบแห้งผลิตภัณฑ์ภายในห้องอบแห้ง (Eltawil *et al.*, 2018; Forson *et al.*, 2007) จากการศึกษาของ Elkhadraoui *et al.* (2015) พบว่า การอบแห้งพริกและองุ่น ด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดรับรังสีอาทิตย์แบบผสมใช้

ระยะเวลาอบแห้งที่สั้นกว่าการตากแดดเท่ากับ 7 h และ 17 h ตามลำดับ Dejchanchaiwong *et al.* (2016) ศึกษาการอบแห้งยางธรรมชาติด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดรับรังสีอาทิตย์แบบผสม ซึ่งสามารถลดเวลาการอบแห้งได้ 4 วัน เมื่อเปรียบเทียบกับแบบรับรังสีอาทิตย์โดยอ้อมเมื่อพิจารณาระบบการไหลเวียนอากาศภายในเครื่องอบแห้งแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือการไหลเวียนอากาศแบบธรรมชาติและแบบบังคับ ระบบการไหลเวียนอากาศแบบบังคับจะช่วยเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนของเครื่องอบแห้ง (Jareanjit, 2012) จากการศึกษาของ Sallam *et al.* (2015) การอบแห้งใบสะระแหน่ด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ระบบการไหลเวียนอากาศแบบบังคับมีอัตราการอบแห้งที่สูงกว่าการไหลเวียนอากาศแบบธรรมชาติ

ดังนั้นบทความวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาการอบแห้งรังไหมด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดรับรังสีอาทิตย์แบบผสมระบบการไหลเวียนอากาศแบบบังคับ ที่มีต่อจลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง สมรรถนะเครื่องอบแห้ง และคุณภาพของเส้นไหม เพื่อเป็นแนวทางการเพิ่มศักยภาพในกระบวนการผลิตเส้นไหมในระดับวิสาหกิจชุมชน

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมตัวอย่าง

คัดเลือกรังไหมพันธุ์เหลืองโพโรจน์ที่มีความสมบูรณ์ได้แก่ ไม่เป็นรังเจาะ รังบุบ และรังเปื้อน เป็นต้น เก็บรังไหมไว้ที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 24 h เพื่อลดอุณหภูมิภายในรังไหม และช่วยลดการเน่าเสียของรังไหม

2. เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดรับรังสีอาทิตย์แบบผสม มีส่วนประกอบหลักคือ ห้องอบแห้งขนาดกว้าง 1.0 m ยาว 2.8 m และสูง 0.1 m ด้านบนปิดด้วยกระจกใสหนา 5 mm ภาชนะบรรจุผลิตภัณฑ์ทำด้วยตะแกรงสแตนเลสขนาดกว้าง 0.45 m ยาว 1.0 m จำนวน 6 ภาชนะ ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นร่องรูปตัววี พื้นที่เท่ากับ 1.8 m² ด้านบนปิดด้วยกระจกใสหนา 5 mm ควบคุมการไหลเวียนอากาศด้วยพัดลมกำลังขนาด 74.57 W แสดงดัง Fig. 1

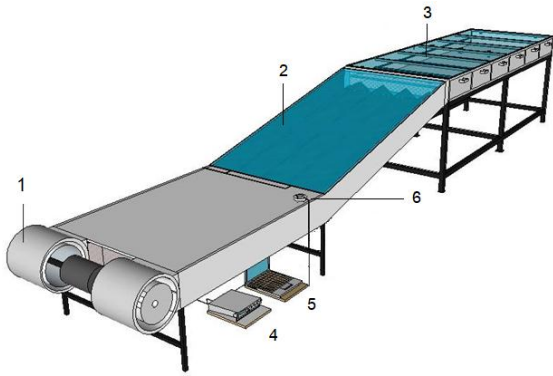


Fig. 1 A schematic diagram of the mixed-mode solar dryer: (1) Blower (2) V-grooved solar collector (3) Drying chamber (4) Data logger (5) Computer (6) Pyranometer

3. การอบแห้งรังไหมด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

ทดลองอบแห้งรังไหมที่ศูนย์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม อำเภอเมือง จังหวัดมหาสารคาม รังไหมจำนวน 5 kg จัดเรียงกระจายบนถาดอบแห้ง และไม่ให้อ่างน้ำวางทับซ้อนกัน เริ่มการทดลองเวลา 09:00 น. จนกระทั่งรังไหมมีความชื้นเท่ากับ 10%db ปรับอัตราการไหลอากาศภายในห้องอบแห้งเท่ากับ 0.022 kgs^{-1} ระหว่างทำการอบแห้งบันทึกน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักระบบดิจิทัลความละเอียด 0.01 g วัดค่ารังสีอาทิตย์ด้วยเครื่อง Pyranometer (Kipp & Zonen SP Lite2) เชื่อมต่อกับเครื่องบันทึกข้อมูล (Meteondata logger) วัดอุณหภูมิอากาศที่ตำแหน่งทางเข้า-ออก ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ กลางห้องอบแห้ง ทางออกห้องอบแห้งและอากาศแวดล้อม ด้วยสายเทอร์โมคัปเปิลชนิด K เชื่อมต่อกับเครื่องบันทึกข้อมูล (Agilent 34972A) และวัดการใช้พลังงานไฟฟ้าของพัดลมด้วยเครื่องวัดพลังงานไฟฟ้า (Fluke 1735)

4. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้ง

ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักระหว่างการอบแห้งวิเคราะห์อยู่ในรูปอัตราส่วนความชื้นที่เวลาใด ๆ ดังสมการที่ (1) (Sacilik and Elicin, 2006)

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e} \quad (1)$$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น M_o คือ ความชื้นเริ่มต้น, M_t คือ ความชื้นที่เวลาใด ๆ และ M_e คือความชื้นสมดุลการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ค่าความชื้นสมดุล พิจารณาให้มีค่าเท่ากับศูนย์ เมื่อค่าความชื้นสมดุลมีค่าน้อยมากเปรียบเทียบกับ M_o และ M_t (Midilli and Kucuk, 2003; Vijayan *et al.*, 2016) และความสัมพันธ์อากาศระหว่างการอบแห้งมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง (Akpınar and Bicer, 2008) ดังนั้นค่าอัตราส่วนความชื้นสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2)

$$MR = \frac{M_t}{M_o} \quad (2)$$

วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนความชื้นกับเวลาการอบแห้ง ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Table 1) โดยใช้การวิเคราะห์ถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นตรง (non-linear regression) ความสามารถในการทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นของแบบจำลองพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2) ค่าการลดลงไคกำลังสอง (Reduced chi-square, χ^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square error, RMSE) คำนวณได้ดังสมการ (3)-(5) (Aghbashlo *et al.*, 2009)

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^N (\overline{MR_{pre}} - MR_{exp,i})^2} \quad (3)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - z} \quad (4)$$

$$RMSE = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

เมื่อค่า $MR_{exp,i}$ คือ อัตราส่วนความชื้นจากการทดลอง, $MR_{pre,i}$ คือ อัตราส่วนความชื้นจากการทำนายของแบบจำลอง, $\overline{MR_{pre}}$ คือ อัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยจากการทำนายของแบบจำลอง, N คือจำนวนข้อมูลจากการทดลอง และ z คือ จำนวนค่าคงที่ของแบบจำลอง

Table 1 Mathematical models for cocoon drying

Model No.	Model Name	Model	References
1.	Lewis	$MR = \exp(-kt)$	Kashaninejad <i>et al.</i> (2007)
2.	Page	$MR = \exp(-kt^n)$	Panchariya <i>et al.</i> (2002)
3.	Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	Akpinar <i>et al.</i> (2003)
4.	Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$	Togrul and Pehlivan (2002)
5.	Midilli Kucuk	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	Midilli <i>et al.</i> (2002)
6.	Two term	$MR = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$	Yaldiz <i>et al.</i> (2001)
7.	Diffusion approach	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kbt)$	Demir <i>et al.</i> (2007)
8.	Verma <i>et al.</i>	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-gt)$	Doymaz (2005)
9.	Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	Yaldiz and Ertekin (2004)

5. การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น

การแพร่ความชื้นบ่งบอกการเคลื่อนที่ของความชื้นในวัสดุระหว่างการอบแห้งในช่วงที่อัตราการอบแห้งลดลง พิจารณาได้จากสมการแพร่ตามกฎข้อที่สองของฟิค (Fick's second law) โดยมีสมมติฐานค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นมีค่าคงที่ตลอดเวลาการอบแห้ง และสำหรับวัสดุที่มีรูปทรงกระบอกสั้นซึ่งรังไหมมีรูปทรงใกล้เคียงทรงกระบอกสามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นได้ดังนี้ (Usub *et al.*, 2010)

$$MR = \left(\frac{8r^2}{l^2}\right) \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{1}{\lambda_i^2 \beta_j^2} \exp\left(-(\lambda_i^2 + \beta_j^2) \frac{D_{eff} t}{r^2}\right) \tag{6}$$

เมื่อ D_{eff} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น ($m^2 s^{-1}$), r คือ รัศมีในแนวรัศมีรังไหม (m), l คือความยาวรังไหม (m), t คือ เวลาอบแห้ง (s), λ_i คือ สังกัลค่า เบสเซลอันดับที่ศูนย์ (2.405, 5.520, 8.564) และคือลำดับที่ของฟังก์ชัน (1, 2, 3, ...)

$$\beta_j = \frac{(2j-1)\pi r}{2l}, j= 1, 2, 3 \tag{7}$$

จากสมการที่ (6) มีจำนวนเทอมที่ไม่มีที่สิ้นสุด การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ระยะเวลายาวนาน ดังนั้นจึง

ประมาณค่าโดยพิจารณาเฉพาะเทอมแรก (Doymaz, 2004) สามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$MR = \frac{32}{\lambda_1^2 \pi^2} \exp\left(-(\lambda_1^2 + \beta_1^2) \frac{D_{eff} t}{r^2}\right) \tag{8}$$

จากสมการที่ (8) เขียนอยู่ในรูปลอการิทึมดังสมการที่ (9)

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{32}{\lambda_1^2 \pi^2}\right) - \left((\lambda_1^2 + \beta_1^2) \frac{D_{eff} t}{r^2}\right) \tag{9}$$

จากสมการที่ (9) สามารถคำนวณค่า D_{eff} ของรังไหมจากค่าความชื้นของกราฟเส้นตรง ดังสมการที่ (10) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(MR)$ และเวลาในการอบแห้ง (t)

$$slope = \frac{(5.7831 + \beta_1^2) D_{eff}}{r^2} \tag{10}$$

6. การศึกษาสมรรถนะเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ของการอบแห้งรังไหม

การวิเคราะห์สมรรถนะเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ส่วนห้องอบแห้งได้รับพลังงานจากรังสีอาทิตย์โดยตรงและได้รับความร้อนจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ สามารถคำนวณได้ ดังนี้ (Usub *et al.*, 2008; Chowdhury *et al.*, 2011)

ประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Collector efficiency, η_c) หาได้จากอัตราส่วนพลังงานที่ได้จากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ต่อพลังงานที่ให้กับตัวเก็บรังสี คำนวณได้ดังสมการที่ (11)-(13)

$$IA_{collector} = A_{collector} \int Sr(t)dt \quad (11)$$

เมื่อ $IA_{collector}$ คือ พลังงานแสงอาทิตย์ที่ให้กับตัวเก็บรังสี (J), $A_{collector}$ คือ พื้นที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (m^2) และ $Sr(t)$ คือ ค่ารังสีอาทิตย์ที่เวลาใด ๆ (Wm^{-2})

$$Output_{collector} = \int \dot{m}(t)C_p(T_c - T_i)dt \quad (12)$$

เมื่อ $Output_{collector}$ คือ พลังงานที่ได้จากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (J), $\dot{m}(t)$ คือ อัตราการไหลอากาศที่เวลาใด ๆ (kgm^{-1}), C_p คือ ความร้อนจำเพาะอากาศ ($kJkg^{-1}oC^{-1}$), T_i คือ อุณหภูมิอากาศที่เข้าตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (oC) และ T_c คือ อุณหภูมิอากาศที่ออกตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (oC)

$$\eta_c = \frac{Output_{collector}}{IA_{collector}} \quad (13)$$

ประสิทธิภาพการอบแห้ง (Drying efficiency) หาได้จากอัตราส่วนพลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำออกจากวัสดุต่อพลังงานที่ส่วนอบแห้งได้รับจากรังสีอาทิตย์ คำนวณได้ดังสมการที่ (14)-(16)

$$IA_{dryer} = A_{dryer} \int Sr(t)dt \quad (14)$$

เมื่อ IA_{dryer} คือ พลังงานที่ห้องอบแห้งได้จากการแผ่รังสีอาทิตย์ (J) และ A_{dryer} คือ พื้นที่ห้องอบแห้ง (m^2)

$$Output_{dryer} = mrL_g \quad (15)$$

เมื่อ $Output_{dryer}$ คือ พลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำออกจากวัสดุ (J), mr คือ มวลของน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุ (kg) และ L_g คือ ค่าความร้อนแฝงที่ในการระเหยน้ำ (Jkg^{-1})

$$\eta_d = \frac{Output_{dryer}}{IA_{dryer} + Output_{collector}} \quad (16)$$

ประสิทธิภาพรวมของการอบแห้ง(Overall drying efficiency) หาได้จากอัตราส่วนพลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำออกจากวัสดุต่อพลังงานทั้งหมดที่ให้กับเครื่องอบแห้ง คำนวณได้ดังสมการที่ (17)

$$\eta_{overall} = \frac{Output_{dryer}}{IA_{collector} + IA_{dryer} + E_{fan}} \quad (17)$$

เมื่อ E_{fan} คือ พลังงานไฟฟ้าที่ให้กับพัดลม (J)

7. การสาวทดสอบรังไหม

รังไหมที่ได้จากการอบแห้งนำมาสาวทดสอบซึ่งความยากง่ายของการสาวรังไหม พิจารณาจากจำนวนครั้งที่รังไหมร่วงออกจากพงสาวระหว่างทำการสาวทดสอบ โดยการสาวทดสอบรังไหมจะใช้วิธีการสาวรังไหมแบบกลุ่มโดยใช้เครื่องสาวไหมซึ่งการสาวแต่ละครั้งใช้รังไหมจำนวน 50 รัง และกำหนดจำนวนรังไหมในพงสาวเท่ากับ 10 รัง ระหว่างการสาวรังไหมบันทึกจำนวนรังไหมที่ป้อนเข้าในพงสาวรังไหมสาวไม่ออก และรังไหมที่ขึ้นเครื่องสาวไม่ได้ จากนั้นนำข้อมูลจำนวนรังไหมสาวไม่ออก และรังไหมที่ขึ้นเครื่องสาวไม่ได้ มาจำแนกเป็นชนิดรังหนา รังปานกลาง และรังบาง แล้วคำนวณโดยเปรียบเทียบด้านความยาวจากตัวคูณได้แก่ 1 รังหนา = 0.85 รัง 1 รังปานกลาง = 0.37 รัง และ 1 รังบาง = 0.11 รัง แล้วคำนวณเปอร์เซ็นต์การสาวง่าย (reelability) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (18)

$$reelability = \frac{NS - UC - UD}{NF - UD} \times 100 \quad (18)$$

เมื่อ NS คือจำนวนรังไหมที่นำมาสาว UC คือ จำนวนรังไหมที่สาวไม่ออก UD คือ จำนวนรังไหมที่ขึ้นเครื่องสาวไม่ได้ และ NF คือ จำนวนครั้งที่ป้อนรังไหม

8. การวิเคราะห์ขนาดเส้นไหมดิบ

การศึกษาครั้งนี้ขนาดเส้นไหมดิบจะวัดในหน่วยดีเนียร์ (Denier, den) หรือเรียกว่าความหนาแน่นเชิงเส้น ซึ่งคำนวณจากความสัมพันธ์ของมวลเส้นไหมในหน่วย g ต่อความยาวเส้นไหม 9,000 m เส้นไหมดิบที่ได้จากการสาวก่อนวิเคราะห์หาขนาดนำมาปรับภาวะเส้นไหมดิบโดยเก็บเส้นไหมดิบในห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิ 25±2°C และความชื้นสัมพัทธ์ 65±4% เป็นเวลา 24 h จากนั้นนำเส้นไหมดิบทำเป็นเช็ดไหมทดสอบด้วยเครื่องกรอที่มีเส้นรอบวงของระวิงเท่ากับ 1.125 m จำนวนรอบการกรอเส้นไหมเท่ากับ 100 รอบ แล้วชั่งมวลเช็ดไหมทดสอบเพื่อหาขนาดเส้นไหม ดังสมการที่ (19)

$$D = \frac{W}{T \times R} \times 9,000 \tag{19}$$

เมื่อ *D* คือ ขนาดเส้นไหม (den), *W* คือ มวลเส้นไหม (g) *T* คือ จำนวนรอบของเช็ดไหมทดสอบและ *R* คือ ความยาวเส้นรอบวงระวิง (m)

9. การทดสอบสมบัติเชิงกลเส้นไหมดิบ

นำเช็ดไหมมาทดสอบสมบัติเชิงกลของเส้นไหมดิบ ได้แก่ ค่าความเหนียว และการยืดตัว ณ จุดขาด ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (Lloyd LR5k) อัตราเร็วในการดึงคงที่เท่ากับ 300 mm min⁻¹ และระยะทดสอบในการดึง 100 mm ทดสอบภายใต้สภาวะบรรยากาศที่อุณหภูมิ 25±2°C ความชื้นสัมพัทธ์ 65±4% คำนวณความเหนียว และการยืดตัว ณ จุดขาดได้ดังสมการที่ (20)-(21) ตามลำดับ

$$P = \frac{F}{D} \tag{20}$$

$$E = \frac{L_f - L_o}{L_o} \times 100 \tag{21}$$

เมื่อ *P* คือ ค่าความเหนียว (g den⁻¹) *F* คือ แรงดึงเส้นไหมสูงสุด (gf) *E* คือ ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด (%) *L_o* คือ ความยาวเส้นไหมก่อนดึง (mm) และ *L_f* คือ ความยาวเส้นไหม ณ จุดขาด (mm)

การสาวทดสอบรังไหม การวิเคราะห์ขนาดเส้นไหม และการทดสอบสมบัติเชิงกลเส้นไหมดิบ ทำการทดสอบที่ศูนย์หม่อนไหมเฉลิมพระเกียรติฯ จังหวัดนครราชสีมา

ผลและวิจารณ์ผลการวิจัย

1. คุณลักษณะการอบแห้งรังไหม

จากการอบรังไหมจำนวน 5 kg ด้วยเครื่องพลังงานแสงอาทิตย์ วันที่ 20 เมษายน 2560 เริ่มการทดลองตั้งแต่วันที่ 09:00 น. ถึง 16:30 น. ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์เฉลี่ยตลอดการทดลองเท่ากับ 685.32 Wm⁻² มีค่าสูงสุดเท่ากับ 847 Wm⁻² ที่เวลาประมาณ 12:00 น. ค่าพลังงานแสงอาทิตย์ตลอดการทดลองเท่ากับ 19.74 MJm⁻² ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ มีค่าพลังงานแสงอาทิตย์โดยเฉลี่ยรายปีเท่ากับ 19-20 MJ m⁻² (Janjai *et al.*, 2005) อุณหภูมิภายในห้องอบแห้งในแต่ละตำแหน่งไม่แตกต่างกันมากอุณหภูมิระหว่างการทดลองอยู่ในช่วงประมาณ 46°C ถึง 62°C และค่าอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 55.78°C ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิอากาศแวดล้อมภายนอกเครื่องประมาณ 20°C การเปลี่ยนแปลงความเข้มรังสีอาทิตย์ อุณหภูมิอากาศภายในห้องอบแห้งและอุณหภูมิอากาศแวดล้อมขณะทดลองอบรังไหมแสดงดัง Fig. 2

การอบแห้งรังไหมที่มีความชื้นเริ่มต้น 220%db โดยเริ่มทำการทดลองที่เวลา 09:00 น. การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นรังไหมระหว่างการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ และการตากแดด แสดงดัง Fig. 3 พบว่า การอบแห้งรังไหมด้วยเครื่องพลังงานแสงอาทิตย์ รังไหมมีความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 10%db ใช้เวลาอบแห้งเท่ากับ 440 min ซึ่งตรงกับเวลา 16:20 น. ขณะที่การอบรังไหมด้วยวิธีตากแดดใช้เวลาประมาณ 3 วัน (21 ชั่วโมงที่มีแดด)

Fig. 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับอัตราการอบแห้ง พบว่า การอบรังไหมด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ช่วงเริ่มต้นการอบรังไหมจะอยู่ในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ เมื่อการอบแห้งดำเนินไปจนถึงอัตราส่วนความชื้นประมาณ 0.6 อัตราการอบแห้งจะอยู่ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง สอดคล้องกับผลวิจัยของ El-Sebaai and Shalaby (2013) และ Baniasadi *et al.*

(2017) ซึ่งพบว่ากรอบแห้ง ใบมินต์ พลัม และ แอปพริคอต อัตราการอบแห้งอยู่ในช่วงอัตราคงที่และลดลง เมื่อเปรียบเทียบอัตราการอบแห้งรังไหมทั้งสองวิธีการแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์มีค่าอัตราการอบแห้งที่สูงกว่าวิธีการตากแดดอย่างชัดเจน สอดคล้องกับผลวิจัยของ Fudholi *et al.* (2014)

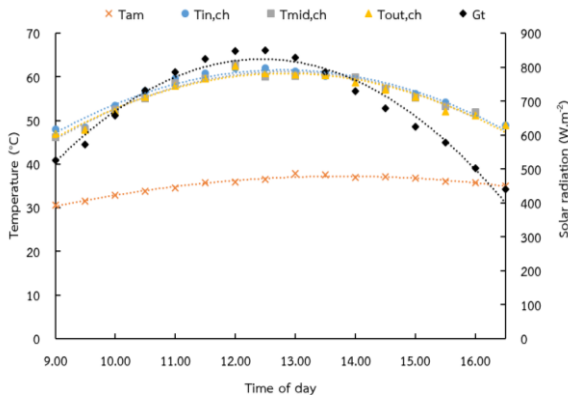


Fig. 2 Variation in solar radiation and temperature versus drying time

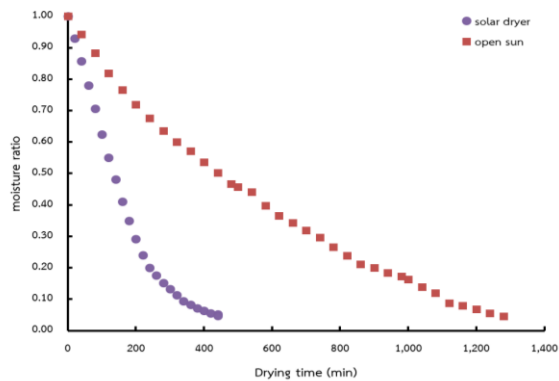


Fig. 3 Variation in moisture ratio versus the duration of drying time

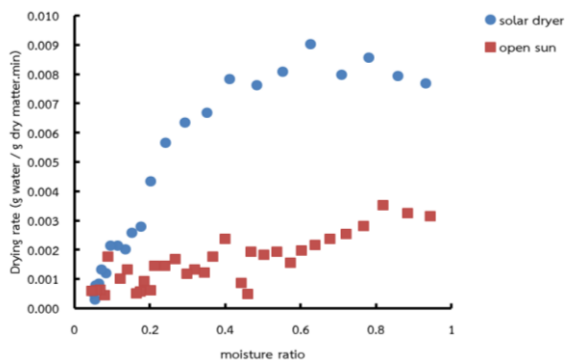


Fig. 4 Variation in drying rate versus moisture ratio

2. ผลการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ผลวิเคราะห์ทางสถิติและค่าคงที่ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายค่าอัตราส่วนการอบแห้งจากการทดลอง แสดงดัง Table 2 พบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Midilli Kucuk สามารถทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นของรังไหมระหว่างการอบแห้งได้ดีที่สุด ซึ่งการอบแห้งรังไหมด้วยเครื่องพลังงานแสงอาทิตย์ มีค่า R^2 สูงสุดเท่ากับ 0.9993 ค่า χ^2 และ RMSE ต่ำสุด เท่ากับ 0.0080 และ 0.00007 ตามลำดับ การอบแห้งรังไหมด้วยการตากแดด มีค่า R^2 สูงสุดเท่ากับ 0.99941 ค่า χ^2 และ RMSE ต่ำสุด เท่ากับ 0.0066 และ 0.00005 ตามลำดับ เช่นเดียวกับผลวิจัยของ Usub *et al.* (2010) พบว่า แบบจำลองของ Midilli Kucuk มีความเหมาะสมในการทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นการอบแห้งผักตบชวาด้วยเครื่องอบพลังงานแสงอาทิตย์ ดังนั้นสมการทำนายค่าอัตราส่วนของการอบแห้งรังไหมด้วยเครื่องอบพลังงานแสงอาทิตย์และการตากแดด ดังสมการที่ (22)-(23) ตามลำดับ

$$MR=1.00028 \exp(-0.00112t^{1.32197}) + 0.00004t \quad (22)$$

$$MR=1.00614 \exp(-0.00262t^{0.88561}) - 0.00015t \quad (23)$$

3. ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น

ค่าความชันของกราฟเส้นตรงของความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(MR)$ กับ เวลาการอบแห้ง (t) ดัง Fig. 5 คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของการอบแห้งรังไหม พบว่า การอบแห้งรังไหมด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์และการตากแดดมีค่าเท่ากับ 9.54×10^{-10} และ $3.82 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ตามลำดับ จากรายงานวิจัยของ Usub *et al.* (2010) การอบแห้งผักตบชวาด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นมีค่าอยู่ในช่วง 1.86×10^{-10} ถึง $2.77 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$

4. สมรรถนะเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

การทดสอบสมรรถนะเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์โดยจะทำการอบรังไหม 5 kg จนกระทั่งมีความชื้นเท่ากับ 10%db ที่อัตราการไหลของอากาศ 0.022 kgs^{-1} ผลการทดสอบสมรรถนะเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แสดงดัง Table 3 พบว่า ประสิทธิภาพตัวเก็บ

รังสีอาทิตย์ ประสิทธิภาพการอบแห้ง และประสิทธิภาพรวมของการอบแห้ง เท่ากับ 37.37%, 12.01% และ 8.85% ตามลำดับ ซึ่งการอบรังไหมด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดรับรังสีอาทิตย์แบบผสม รังไหมที่อยู่ในห้องอบแห้งได้รับความร้อนจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (13.28 MJ) และพลังงานที่รังสีอาทิตย์ส่งผ่านเข้ามาในห้องอบแห้งโดยตรง สามารถลดเวลาอบแห้งจากการตากแดดตามธรรมชาติได้โดยประมาณ 2 วัน ผลการวิจัยของ Singh (2011) ได้ศึกษาอบรังไหมด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดรับรังสีอาทิตย์โดยอ้อม อุณหภูมิอากาศในห้องอบแห้งอยู่ในช่วง 50°C ถึง 80°C พบว่า เวลาอบรังไหมเท่ากับ 16 h ถึง 19 h

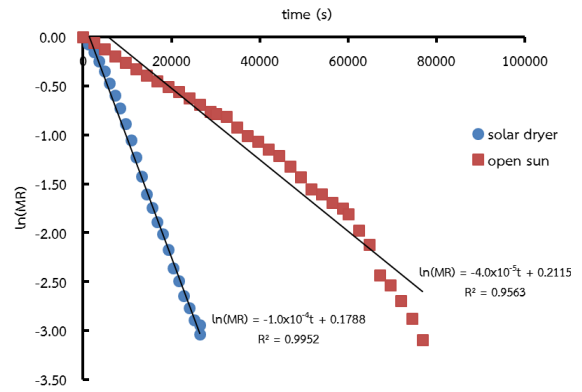


Fig. 5 Linear relationship between ln (MR) and drying time

Table 2 Statistical results of mathematical modeling of drying curves for cocoon

Model Name	Mixed-mode solar drying				Traditional open sun drying			
	Model constants	R ²	RMSE	χ ²	Model constants	R ²	RMSE	χ ²
Lewis	k=0.00590	0.9793	0.0439	0.00201	k=0.00171	0.9871	0.0310	0.00099
Page	k=0.00125 n=1.29372	0.9989	0.0100	0.00011	k=0.00069 n=1.14120	0.9933	0.0223	0.00053
Henderson and Pabis	a=1.08343 k=0.00638	0.9874	0.0343	0.00128	a=1.03052 k=0.00177	0.9885	0.0292	0.00091
Logarithmic	a=1.15023 c=-0.09627 k=0.00514	0.9874	0.0343	0.00141	a=1.19993 c=-0.21254 k=0.00119	0.9989	0.0092	0.00009
Midilli Kucuk	a=1.00028 n=1.32197 k=0.00112 b=0.00004	0.9993	0.0080	0.00007	a=1.00614 n=0.88561 k=0.00262 b=-0.00015	0.9994	0.0066	0.00005
Two-term	a=0.54176 k ₀ =0.00638 b=0.54165 k ₁ =0.00638	0.9931	0.0254	0.00073	a=0.51112 k ₀ =0.51923 b=0.00177 k ₁ =0.00177	0.9885	0.0292	0.00091
Diffusion approach	a=-1.28835 b=0.63040 k=0.01441	0.9992	0.0085	0.00008	a=-1.47543 b=0.76412 k=0.00314	0.9941	0.0209	0.00048
Verma et al.	a=-1.49430 g=0.00344 k=0.00236	0.9912	0.0286	0.00093	a=-2.03045 g=0.00248 k=0.00307	0.9942	0.0208	0.00048
Wang and Singh	a=-0.00451 b=0.00001	0.9970	0.0168	0.00030	a=-0.00132 b=0.00001	0.9956	0.0180	0.00035

Table 3 Collector efficiency, drying efficiency and overall efficiency

Parameter	Value
Solar collector	
Energy input (MJ)	35.53
Energy output (MJ)	13.28
Collector Efficiency (%)	37.37
Drying section	
Energy input (MJ)	55.26
Energy output (MJ)	8.23
Drying efficiency (%)	12.01
Overall drying efficiency (%)	8.85

5. ผลการสาวทดสอบรังไหม

ความยากง่ายการสาวไหมวิเคราะห์จากผลการสาวทดสอบรังไหมที่ผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ และการตากแดด ซึ่งมีความชื้นเท่ากับ 10%db เปรียบเทียบกับรังไหมสดที่มีความชื้นเท่ากับ 220%db ค่า% การสาวง่ายแสดงดัง Table 4 พบว่า รังไหมอบแห้งทั้งสองวิธีมีค่าเปอร์เซ็นต์การสาวง่ายมากกว่ารังไหมสดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) แสดงให้เห็นว่าการสาวรังไหม

Table 4 Result of reeling and mechanical properties of silk

Drying method	Reeling results		Mechanical properties		
	Reelability (%)	Size of raw silk (den)	Force (cN)	Tenacity (gden ⁻¹)	Elongation (%)
Mixed-mode Solar dryer	92.20±1.78 ^a	18.66±0.86 ^a	68.39±5.53 ^a	3.73±0.19 ^a	27.41±1.49 ^a
Traditional open sun drying	90.60±1.14 ^a	18.32±0.76 ^a	64.89±4.21 ^a	3.61±0.22 ^a	28.50±2.55 ^a
Control (Fresh cocoon)	77.67±1.24 ^b	15.20±1.06 ^b	51.32±6.81 ^b	3.44±0.31 ^b	23.45±1.86 ^b

Values followed by different superscripted letters in the same column were significantly different at $P < 0.05$ (Duncan test).

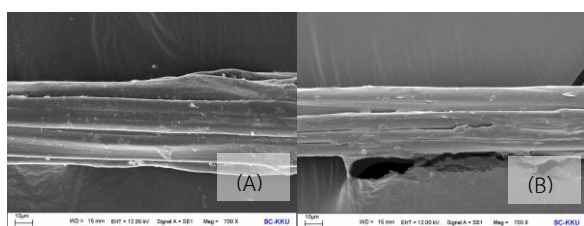


Fig. 6 Morphologies of cocoon silk: Fresh Cocoon (a) and Dry Cocoon (b)

อบแห้งนั้นเส้นใยไหมไม่ขาดง่ายคล้ายตัวออกมาได้ดี และรังไหมหลุดร่วงออกมาจากพงสาวมีจำนวนน้อยครั้งกว่ารังไหมสด

6. ขนาดเส้นไหมดิบ

จากการสาวไหมที่กำหนดจำนวนรังไหมในพงสาวเท่ากับ 10 รัง ดังนั้นเส้นไหมดิบประกอบด้วยเส้นใยไหมที่สาวได้จากรังไหม 10 รัง โดยทำเกลียวให้รวมเป็นเส้นเดียวกันในขั้นตอนการสาวไหม มีกาวไหม (เซรีซิน) ประสานเส้นใยไหมรวมเป็นเส้นไหมเดียวกัน จาก Fig. 6 แสดงลักษณะเส้นไหมดิบ เห็นได้ว่าการสาวไหมจากรังไหมอบแห้งจะได้เส้นไหมดิบที่เล็กกว่ารังไหมสด เมื่อวิเคราะห์ขนาดเส้นไหมในหน่วยดีเนียร์ พบว่า เส้นไหมดิบที่ได้จากการสาวรังไหมที่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์และวิธีการตากแดดมีขนาดเส้นไหมดิบไม่แตกต่างกัน ($P > 0.05$) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 18.66 den และ 18.32 den ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นไหมดิบจากรังไหมสด พบว่า เส้นไหมดิบจากรังไหมอบแห้งมีขนาดมากกว่าเส้นไหมดิบจากรังไหมสดอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) แสดงให้เห็นว่า เส้นไหมดิบที่สาวได้จากรังไหมอบแห้งจะมีลักษณะเส้นที่เล็กแต่มีมวลและความหนาแน่นเชิงเส้นมากกว่าเส้นไหมดิบจากรังไหมสด

7. สมบัติเชิงกลของเส้นไหมดิบ

รังไหมที่ผ่านการอบแห้งนำมาสาวเพื่อให้ได้เส้นไหมดิบ จากนั้นนำเส้นไหมดิบมาทดสอบสมบัติเชิงกลได้แก่ ความเหนียว และการยืดตัว ณ จุดขาดเป็นการศึกษาพฤติกรรมของเส้นไหมภายใต้ความเค้นโดยดึงเส้นไหมให้ยืดยาวออกจนถึงจุดที่เส้นไหมเกิดการเสียสภาพและขาดออกจากกัน ผลการทดสอบแสดงดัง Table 4 รังไหมที่ผ่านการ

อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ตากแดด และ รังไหมสด เส้นไหมดิบมีค่าแรงดึงที่จุดขาดเท่ากับ 68.39, 64.89 และ 51.32 cN ตามลำดับ และค่าความเหนียวของ เส้นไหมดิบเท่ากับ 3.73, 3.61 และ 3.44 gden⁻¹ ตามลำดับ ซึ่งบ่งบอกถึงเส้นไหมดิบจากรังไหมอบแห้งเส้นใย ไหมมีการยึดเกาะกันสูงขึ้น และสามารถต่อต้านการ เปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ดีกว่าเส้นไหมดิบจากรังไหมสด นอกจากนี้เส้นไหมดิบจากรังไหมอบแห้งมีการยึดตัว มากกว่าเส้นไหมดิบจากรังไหมสดประมาณ 4.0-5.0 %

2. สมรรถนะเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ชนิด รับรังสีอาทิตย์แบบผสมในการอบแห้งรังไหม สามารถลด ระยะเวลาอบแห้งได้ 2 วัน เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีตากแดด ประสิทธิภาพการอบแห้ง และประสิทธิภาพรวมของการ อบแห้ง เท่ากับ 12.01% และ 8.85% ตามลำดับ

3. รังไหมอบแห้งมีค่าการสาวง่ายมากกว่ารังไหมสด และขนาดเส้นไหมดิบมีค่ามากกว่าเส้นไหมจากรังไหมสด นอกจากนี้สมบัติเชิงกลของเส้นไหมดิบในด้าน ความเหนียว และการยึดตัว มีค่าสูงกว่าเส้นไหมดิบจากรังไหมสด

สรุปผลการวิจัย

1. การอบแห้งรังไหมด้วยเครื่องอบแห้งพลังงาน แสงอาทิตย์ แบบจำลอง Midilli Kucuk สามารถทำนายค่า อัตราส่วนความชื้น และเวลาในการอบแห้งรังไหมได้ดีที่สุด ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นเท่ากับ $9.54 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ และมากกว่าการตากแดด 5.13 เท่า

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัย ราชภัฏมหาสารคามที่สนับสนุนงบประมาณวิจัย ศูนย์หม่อน ไหมเฉลิมพระเกียรติฯ จังหวัดนครราชสีมา ที่ให้คำแนะนำ และอนุเคราะห์เครื่องมือในการทดสอบคุณภาพรังไหม รวมทั้งขอขอบคุณหลักสูตรฟิสิกส์ ฟิสิกส์ประยุกต์ และศูนย์ วิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัย ราชภัฏมหาสารคาม ที่ได้สนับสนุนเครื่องมือในการวิจัยครั้งนี้

References

- Aghbashlo, M., Kianmehr, M.H. and Arabhosseini, A. 2009. Modeling of thin-layer drying of potato slices in length of continuous band dryer. *Energy Convers. Manage.* 50: 1348–1355.
- Akpinar, E.K. and Bicer, Y. 2008. Mathematical modelling of thin layer drying process of long green pepper in solar dryer and under open sun. *Energy Convers. Manage.* 88(49): 1367–1375.
- Akpinar, E.K., Bicer, Y. and Yildiz, C. 2003. Thin layer drying of red pepper. *J. Food Eng.* 59: 99–104.
- Baniasadi, E., Ranjbar, S. and Boostanipour, O. 2017. Experimental investigation of the performance of a mixed-mode solar dryer with thermal energy storage. *Renew. Energy.* 112: 143-150.
- Chowdhury, M.M.I., Bala, B.K. and Haque, M.A. 2011. Energy and exergy analysis of the solar drying of jackfruit leather. *Biosyst. Eng.* 110: 222-229.
- Dejchanchaiwong, R., Arkasuwan, A., Kumar, A. and Tekasakul, P. 2016. Mathematical modeling and performance investigation of mixed-mode and indirect solar dryers for natural rubber sheet drying. *Energy Sustainable Dev.* 34: 44–53.
- Demir, V., Gunhan, T. and Yagcioglu, A.K. 2007. Mathematical modelling of convection drying of greentable olives. *Biosyst. Eng.* 98: 47–53.

- Doymaz, I. 2004. Pretreatment effect on sun drying of mulberry fruits (*Morus alba* L.). J. Food Eng. 65: 205–209.
- Doymaz, I. 2005. Sun drying of figs: an experimental study. J. Food Eng. 71: 403–407.
- Elkhadraoui, A., Kooli, S., Hamdi, I. and Farhat, A. 2015. Experimental investigation and economic evaluation of a new mixed mode solar greenhouse dryer for drying of red pepper and grape. Renew. Energy. 77: 1-8.
- El-Sebaei, A.A. and Shalaby, S.M. 2013. Experimental investigation of an indirect-mode forced convection solar dryer for drying thymus and mint. Energy Convers. Manage. 74: 109–116.
- Eltawil, M.A., Azam, M.M. and Alghannam, A.O. 2018. Solar PV powered mixed-mode tunnel dryer for drying potato chips. Renew. Energy. 116: 594-605.
- Forson, F.K., Nazha, M.A.A. and Rajakaruna, H. 2007. Modelling and experimental studies on a mixed-mode natural convection solar crop-dryer. Sol. Energy. 81: 346–357.
- Fudholi, A., Sopian, K., Ruslan, M.H., Yazdi M.H., Gabbasa, M. and Kazem, H.A. 2014. Performance analysis of solar drying system for red chili. Sol. Energy. 99: 47–54.
- Janjai, S., Laksanaboonsong, J., Nunez, M. and Thongsathitya, A. 2005. Development of a method for generating operational solar radiation maps from satellite data for a tropical environment. Sol. Energy. 78: 739–751
- Jareanjit, J. 2012. A solar dryer technology and its development. KKU Res. J. 17(1): 110-124. (in thai)
- Jiang, P., Liu, H., Wang, C., Wu, L., Huang, J. and Guo, C. 2006. Tensile behavior and morphology of differently degummed silkworm (*Bombyx mori*) cocoon silk fibres. Mater. Lett. 60: 919–925.
- Kashaninejad, M., Mortazavi, A., Safekordi, A. and Tabil, L.G. 2007. Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts. J. Food Eng. 78: 98–108
- Midilli, A. and Kucuk, H. 2003. Mathematical modeling of thin layer drying of pistachio by using solar energy. Energy Convers. Manage. 44(7): 1111–1122.
- Midilli, A., Kucuk, H. and Yapar, Z. 2002. A new model for single layer drying. Dry.Techno. 20(7): 1503–1513.
- Panchariya, P.C., Popovic, D. and Sharma, A.L. 2002. Thin-layer modelling of black tea drying process. J. Food Eng. 52: 349–357.
- Rabha, D.K., Muthukumar, P. and Somayaji, C. 2017. Experimental investigation of thin layer drying kinetics of ghost chilli pepper (*Capsicum chinense* Jacq.) dried in a forced convection solar tunnel dryer. Renew. Energy. 105: 583-589.
- Sacilik, K. and Elicin, A.K. 2006. The thin layer drying characteristics of organic apple slices. J. Food Eng. 73: 281–289.
- Sallam, Y.I., Aly, M.H., Nassar, A.F. and Mohamed, E.A. 2015. Solar drying of whole mint plant under natural and forced convection. J. Adv. Res. 6(2): 171-178.
- Singh, P.L. 2011. Silk cocoon drying in forced convection type solar dryer. Appl. Energy. 88: 1720–1726.
- Togrul, I.T. and Pehlivan, D. 2002. Mathematical modeling of solar drying of apricots in thin layers. J. Food Eng. 55: 209–216.
- Tripathy, P.P. and Kumar, S. 2009. Modeling of heat transfer and energy analysis of potato slices and cylinders during solar drying. Appl. Therm. Eng. 29: 884-891.
- Usub, T., Lertsatitthanakorn, C., Poomsa-ad, N., Wiset, L., Yang, L. and Siriamornpun, S. 2008. Experimental

performance of solar tunnel dryer for drying silkworm pupae. Biosyst. Eng. 101: 2209–2216.

Usub, T., Lertsatitthanakorn, C., Poomsa-ad, N., Wiset, L., Yang, L., Siriamornpun, S. and Soponronnaritc, S. 2010. Thin layer solar drying characteristics of silkworm pupae. Food Bioprod. Process. 88: 149–160.

Vijayan, S., Arjunana, T.V. and Kumar, A. 2016. Mathematical modeling and performance analysis of thin layer drying of bitter gourd in sensible storage based indirect solar dryer. Innovative Food Sci. Emerging Technol. 36: 59–67.

Yaldiz, O. and Ertekin, C. 2004. Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. J. Food Eng. 63: 349–359.

Yaldiz, O., Ertekin, C. and Uzun, H.I. 2001. Mathematical modelling of thin layer solar drying of sultana grapes. Energy. 26: 457-465.