

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และสมบัติทางกายภาพของการอบแห้ง แบบชั้นบางของมะม่วงน้ำดอกไม้

MATHEMATICAL MODELS AND PHYSICAL PROPERTIES OF THIN-LAYER DRYING OF NAM DOK MAI MANGOES

ชยพัทธ์ ภูสำเภา* และจักรพรรณ์ ผิวสอาด

Chayapat Phusampao* and Jagravan Piwsaoad

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้ได้แสดงถึงการอบแห้งแบบชั้นบางของมะม่วงน้ำดอกไม้ โดยทำการควบคุมอุณหภูมิและความเร็วลมในการอบแห้ง ซึ่งใช้มะม่วงน้ำดอกไม้ จำนวน 200 กรัมต่อการอบแห้ง 1 รอบ โดยทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 40, 50 และ 60°C ด้วยอัตราเร็วลม 0.8 1.0 1.2 และ 1.4 ms^{-1} จนกระทั่งความชื้นสุดท้ายเหลือ 30% (d.b.) นอกจากจะพบว่าอุณหภูมิและความเร็วลมมีผลต่อการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้แล้ว ยังสามารถนำแบบจำลองการอบแห้งแบบชั้นบาง 7 แบบจำลองมาทำนายผลการทดลองอบแห้งของมะม่วงน้ำดอกไม้ ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Modified Henderson and Pabis สามารถทำนายผลการทดลองออกมาได้ดีที่สุดโดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9978 และค่า RMSE เท่ากับ 0.5879% จากการทดลองพบว่า การแพร่ความชื้นของมะม่วงน้ำดอกไม้จะมีค่าระหว่าง 1.54×10^{-10} ถึง $0.88 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ และการหดตัวของมะม่วงน้ำดอกไม้มีค่าลดลงตามอุณหภูมิอบแห้ง

คำสำคัญ: อบแห้งชั้นบาง มะม่วง การแพร่ความชื้น

คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย อำเภอเมือง จังหวัดเลย 42000

Faculty of Education, Loei Rajabhat University, Muang District, Loei Province 42000

*corresponding author, e-mail: chayapatphu@gmail.com

Received: 19 November 2021; Revised: 15 March 2022; Accepted: 16 March 2022

DOI: <https://doi.org/10.14456/lsej.2022.19>

Abstract

This research demonstrates the thin layer drying of Nam Dok Mai mangoes by controlling the drying temperature and the air velocity. The 200 g of Mangoes were dried for the temperature of 40, 50, and 60 °C, at air speed of 0.8, 1.0, 1.2 and 1.4 ms⁻¹ until its final moisture content reach to 30 % (d.b.). Besides the effects of drying air temperature and velocity, seven different thin-layer models were fitted to the experimental data of mangoes. The Modified Henderson and Pabis model were revealed to be the best. The value of R² of the Modified Henderson and Pabis model was 0.9978, indicating good fit and RMSE were also good 0.5879 %. Moisture diffusivity of mangoes have been determined experimentally and moisture diffusivity varied from 1.54×10^{-10} to 0.88×10^{-10} m² s⁻¹ and the higher temperature which the resulted in the increase value of the shrinkage.

Keywords: Thin layer drying, Mango, Moisture diffusion

บทนำ

มะม่วงน้ำดอกไม้ (Nam Dok Mai) ชื่อวิทยาศาสตร์ (*Mangifera indica* L.) เป็นมะม่วงท้องถิ่นในไทย ปัจจุบันพบปลูกในทุกภาค และมีการปลูกเพื่อการค้ามากในภาคกลาง ภาคเหนือ ภาคอีสาน ภาคตะวันออก และภาคตะวันตก มะม่วงน้ำดอกไม้ เป็นมะม่วงที่นิยมรับประทานทั้งในประเทศและต่างประเทศ โดยเฉพาะประเทศญี่ปุ่นและจีน เนื่องจากผลสุกมีสีเหลืองทอง สวยงาม เนื้อมีสีเหลืองอมครีม เนื้อแน่นปานกลาง มีความนุ่ม และรสหวาน นิยมรับประทานเป็นผลไม้สุกหรือใช้ทำขนมหวาน อาทิ ข้าวเหนียวมะม่วง ไอศกรีม และแยม และยังนิยมรับประทานมะม่วงอบแห้งด้วย แต่ปัญหาที่พบในพืชชนิดนี้คือความเสียหายที่เกิดจากเชื้อราทำให้เกิดการเน่าเสีย (Akpınar & Bicer, 2004) ระหว่างการเก็บผลผลิตหรือผลผลิตที่มีมากเกินไปเกินความต้องการของตลาดมะม่วงสุกทำให้มีราคาตกต่ำ ดังนั้นจึงนิยมแปรรูปมะม่วงสุกสำหรับจำหน่ายและส่งออกต่างประเทศเพื่อสร้างรายได้ให้เพิ่มมากขึ้นและแก้ไขผลผลิตล้นตลาดไปด้วย สำหรับการแปรรูปมะม่วงน้ำดอกไม้โดยการอบแห้งนั้น ควรทราบลักษณะเบื้องต้นของมะม่วงโดยเฉพาะเรื่องความชื้นในมะม่วงน้ำดอกไม้โดยจะมีความชื้นประมาณ 500-600% มาตรฐานแห้งในมะม่วงสุก ซึ่งมีความชื้นสูง ดังนั้นเพื่อลดปัญหาเชื้อราและเน่าเสียของผลผลิต สามารถทำได้โดยการลดความชื้นโดยการอบแห้งในมะม่วงน้ำดอกไม้ให้ความชื้นเหลือต่ำกว่า 30% มาตรฐานแห้ง จะสามารถแก้ปัญหาเชื้อราได้และเน่าเสียได้ เมื่อเก็บไว้ในสภาพแวดล้อมโดยทั่วไปจะสามารถเก็บได้ในระยะเวลาที่ยาวนานมากขึ้น (Ertekin & Yaldiz, 2004)

ดังนั้นเพื่อศึกษาสภาวะการอบแห้งหรือการลดความชื้นของมะม่วงน้ำดอกไม้ ผู้วิจัย จึงได้ทำการศึกษาการอบแห้งชั้นบางโดยการใช้ลมร้อน (Sahin & Dincer, 2005) ซึ่งการอบแห้งแบบชั้นบาง นิยมนำมาเพื่อศึกษาลักษณะเฉพาะของผลผลิตทางการเกษตร เช่น มันฝรั่ง (Aghbashlo et al., 2009) หัวหอม (Arslan & Özcan, 2010) และกล้วย (Da Silva et al., 2013) โดยการศึกษาในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาลักษณะเฉพาะของการอบแห้งของมะม่วงน้ำดอกไม้ เช่น อุณหภูมิ ความเร็วลม ที่เหมาะสม ในการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้ ปริมาณความชื้น ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นรวมทั้งหาแบบจำลอง ทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมกับการอบแห้งแบบชั้นบางของมะม่วงน้ำดอกไม้ซึ่งเป็นผลผลิต จากจังหวัดเลย โดยข้อมูลเหล่านี้จะสามารถนำไปเป็นข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบเพื่อสร้างโรงอบแห้ง สำหรับอบมะม่วงน้ำดอกไม้ต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

1. ขั้นตอนในการอบแห้งแบบชั้นบางของมะม่วงน้ำดอกไม้เป็นมะม่วงน้ำดอกไม้สุกที่เก็บ จากต้นมาเก็บไว้ในตู้เย็นเป็นเวลา 5 วัน ที่อุณหภูมิ 4°C ก่อนนำมาทำการทดลองนำมะม่วงน้ำดอกไม้ มาวางไว้ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 27°C จนกระทั่งอุณหภูมิของมะม่วงใกล้เคียงกับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมหรือเข้าสู่ อุณหภูมิสมดุล นำมะม่วงน้ำดอกไม้มาปอกเปลือกและหั่นเนื้อมะม่วงออกเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมลูกเต๋า ขนาด $1 \times 2 \times 0.5 \text{ cm}^3$ ดังภาพที่ 1-2 (Figure 1-2) แล้ววางบนถาดตะแกรงของเครื่องอบแห้ง แล้วทำ การอบแห้งอยู่ภายใต้สภาวะควบคุมของอุณหภูมิและความเร็วลม โดยทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 40, 50 และ 60°C อัตราเร็วลม 0.8, 1.0, 1.2 และ 1.4 ms^{-1} แล้วนำตัวอย่างที่ทำการอบแห้งไปหามวลแห้งด้วย ตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 103°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อหาปริมาณความชื้นมาตรฐานแห้ง (dry basis, d.b.) ที่ช่วงเวลาใด ๆ แล้วนำค่าปริมาณความชื้นแต่ละเวลามาทำการหาสัดส่วนความชื้น (Moisture Ratio, MR) เพื่อให้ปรับค่าเริ่มต้นให้มีค่าเท่ากัน ตามสมการที่ (1)



Figure 1 Nam Dok Mai Mangoes **Figure 2** Cube-shaped mangoes size $1 \times 2 \times 0.5 \text{ cm}^3$

$$MR = \frac{M - M_{eq}}{M_i - M_{eq}} \quad (1)$$

เมื่อ M และ M_i เป็นความชื้นมาตรฐานแห้ง (d.b.) ที่เวลาใด ๆ และความชื้นเริ่มต้นตามลำดับ M_{eq} คือค่าความชื้นสมดุลซึ่งมีค่าเข้าใกล้ศูนย์อย่างมาก ดังนั้นจึงสามารถจัดสมการที่ (1) ให้อยู่ในรูปอย่างง่ายเป็นดังสมการที่ (2) ดังนี้ (Pala et al., 1996)

$$MR = \frac{M}{M_i} \quad (2)$$

จากนั้นนำค่าอัตราส่วนความชื้น MR มาหาแบบจำลองที่เหมาะสมตามตารางที่ 1 โดยใช้การถดถอยชนิดไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear regression) เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ในแต่ละแบบจำลอง

2. อุปกรณ์ในการทดลองมีลักษณะดังภาพที่ 3 (Figure 3) ประกอบไปด้วย พัดลมขดลวดความร้อน ห้ออบแห้ง เครื่องมือวัดอุณหภูมิ (ยี่ห้อ APPA รุ่น APPA 55 accuracy $\pm 0.50\%$) เครื่องวัดอัตราเร็วลม (ยี่ห้อ SMART SENSOR AR826+) เครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์ (hygrometer ยี่ห้อ Testo รุ่น 635 accuracy $\pm 2.00\%$) อัตราการไหลของอากาศควบคุมโดยชุดควบคุมอัตราเร็วลม ชุดควบคุมอุณหภูมิประกอบไปด้วยขดลวดความร้อนวางในท่อ ใช้สายเทอร์โมคัปเปิล (K-type thermocouple) สำหรับวัดอุณหภูมิ เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล (ยี่ห้อ TANITA รุ่น KD-200 accuracy $\pm 1\%$) ตู้อบไฟฟ้า (ยี่ห้อ Memmert GMBH รุ่น ULE500 accuracy $\pm 0.50\%$)

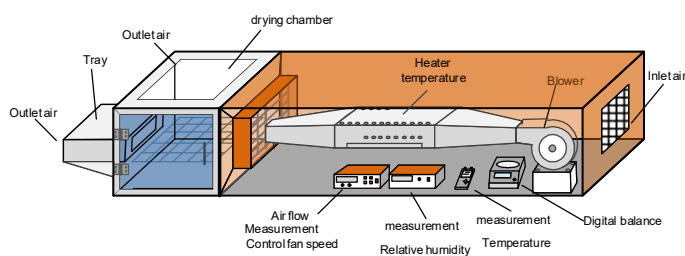


Figure 3 Schematic diagram of the laboratory dryer

3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งแบบชั้นบางนั้นสามารถนำมาทำนายโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังตารางที่ 1 (Table 1) โดยสามารถวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Statistica นำมาใช้ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองโดยการปรับสมการโมเดลให้สอดคล้องกับข้อมูลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (Root Mean Squared Error, RMSE) ใช้เป็นเกณฑ์ในการเลือกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เหมาะสมหรือไม่ โดยค่า R^2 ต้องมีค่าสูงและค่า RMSE ควรมีค่าต่ำหรือเข้าสู่นัย โดยค่า R^2 และค่า RMSE หาได้จากสมการที่ (3) และ (4) ตามลำดับ เมื่อ $MR_{exp,j}$ และ $MR_{pre,i}$ คือ ค่าอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลอง และค่าอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทำนาย ส่วน N คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด

Table 1 Thin-layer mathematical drying models

NO.	Model Name	Model Equation
1	Newton	$MR = \exp(-kt)$
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$
3	Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$
4	Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$
5	Two term	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt)$
6	Modified Page	$MR = \exp[-(kt)^n]$
7	Modified Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-pt)$

Remark Roberts et al. (2008), Singh et al. (2006), Hassan-Beygi et al. (2009), Doymaz & Ismail (2011)

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

$$R^2 = \left[\frac{N \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} \times MR_{pre,i}) - \left(\sum_{i=1}^N MR_{exp,i} \right) \left(\sum_{i=1}^N MR_{pre,i} \right)}{\sqrt{\left(N \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i})^2 - \left(\sum_{i=1}^N MR_{exp,i} \right)^2 \right) \left(N \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i})^2 - \left(\sum_{i=1}^N MR_{pre,i} \right)^2 \right)}} \right]^2 \quad (4)$$

4. การวิเคราะห์หาการหดตัวของมะม่วงน้ำดอกไม้ หาได้โดยการวัดขนาดของมะม่วงน้ำดอกไม้ ที่ทำการอบแห้งแบบชั้นบางรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ด้วยเวอร์เนียร์คาลิปเปอร์ สำหรับวัดความยาวและความหนา ทั้งก่อนและหลังการอบแห้งที่อุณหภูมิต่าง ๆ แล้วคำนวณหาปริมาตรในหน่วยลูกบาศก์มิลลิเมตร และทำการหาเปอร์เซ็นต์การหดตัวของมะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้ง ตามสมการที่ (5) เมื่อ V_i และ V_f คือปริมาตรก่อนและหลังการอบแห้ง (mm^3)

$$\text{การหดตัว(Shrinkage)} = \frac{V_i - V_f}{V_i} \times 100 \quad (5)$$

ผลการวิจัย

1. ลักษณะเฉพาะของมะม่วงน้ำดอกไม้ที่อบแห้งแบบชั้นบางนั้นจะพิจารณาจากลักษณะของปริมาณความชื้นที่เปลี่ยนแปลงเมื่อทำการอบแห้งที่อุณหภูมิแตกต่างกันแสดงดังภาพที่ 4 (Figure 4) โดยปริมาณความชื้นของมะม่วงน้ำดอกไม้ตัวอย่างที่อบแห้งที่อุณหภูมิและความเร็วลมต่าง ๆ เหลืออยู่ประมาณ 30 ถึง 50% มาตรฐานแห้ง โดยอัตราการอบแห้งจะมีค่าสูงเมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิสูง ซึ่งอุณหภูมิมีผลต่อการอบแห้งอย่างมาก

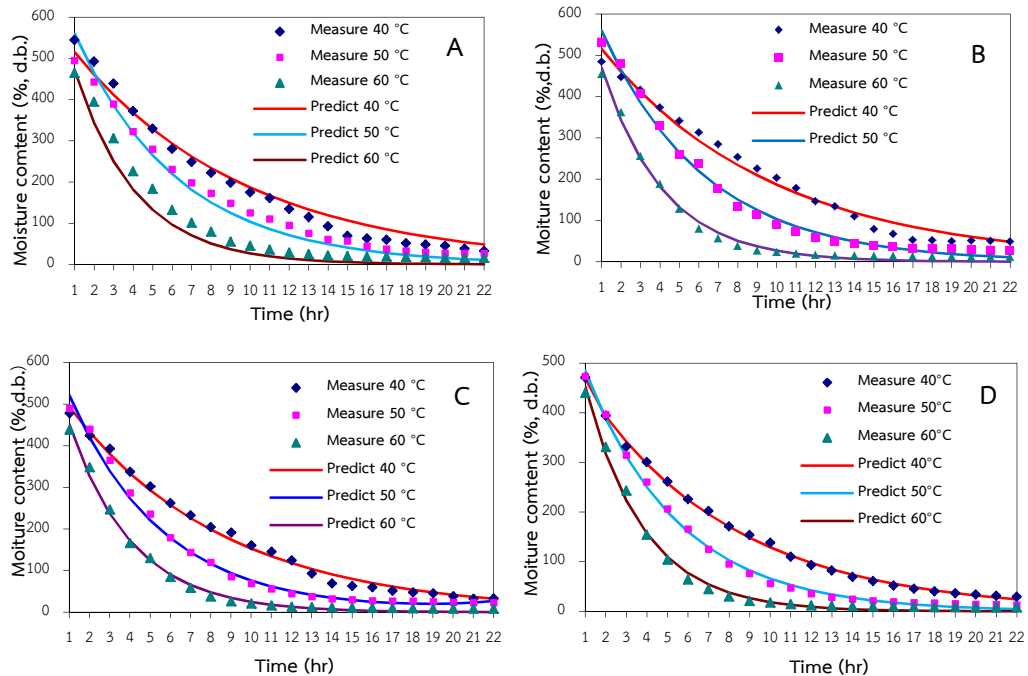


Figure 4 Effect of drying air temperature and velocity on drying time for Modifile
Handerson and Pabis model

- A) Air velocity at 0.8 ms^{-1} B) Air velocity at 1.0 ms^{-1}
C) Air velocity at 1.2 ms^{-1} D) Air velocity at 1.4 ms^{-1}

จากภาพที่ 4 (Figure 4) ผลการทดลอง ปริมาณความชื้นที่ลดลงต่อเวลาจะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามอัตรากรอบแห้งซึ่งขึ้นกับความชื้นและอุณหภูมิของอากาศ ซึ่งจะเห็นว่าปริมาณความชื้นลดลงตามเวลากรอบแห้ง โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถทำนายผลการทดลองได้ดีที่สุดคือแบบจำลองของ Modified Henderson and Pabis ที่อุณหภูมิ 60°C ความเร็วลม 1.4 ms^{-1} โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.99 และมีค่า RMSE เท่ากับ 0.58 % และค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังตารางที่ 2 (Table 2)

Table 2 Parameter value, coefficient of determination (R^2) and Root Mean Square Error (RMSE) value of the different models for Nam Dok Mai mangoes

Temp	Model	Parameter	R^2	RMSE(%)
40°C	Newton	$k = 0.1276$	0.9918	1.9297
	Page	$k = 0.1602, n = 0.8979$	0.9942	1.6092
	Henderson and Pabis	$k = 0.1255, a = 0.9849$	0.9919	1.9103
	Logarithmic	$k = 0.1358, a = 0.9838, c = 0.927$	0.9514	1.2790
	Two term	$k = 0.1653, a = 0.8703, b = 0.1541, g = 0.0341$	0.9785	0.8097
	Modified Page	$k = -0.1602, n = 0.8979$	0.9942	1.6092
	Modified Henderson and Pabis	$k = 0.1655, a = 0.4347, b = 0.1554, c = 0.4343, g = 0.0445, p = 0.1655$	0.9626	0.9297
50°C	Newton	$k = 0.2049$	0.9457	3.9876
	Page	$k = 0.3860, n = 0.6419$	0.9869	1.9564
	Henderson and Pabis	$k = 0.1785, a = 0.8969$	0.9534	3.6924
	Logarithmic	$k = 0.2135, a = 0.9060, c = 0.0312$	0.9764	2.6290
	Two term	$k = 0.3401, a = 0.7774, b = 0.2184, g = 0.0503$	0.9976	0.8398
	Modified Page	$k = -0.3860, n = 0.6419$	0.9869	1.9564
	Modified Henderson and Pabis	$k = 0.0504, a = 0.2185, b = 0.3886, c = 0.3886, g = 0.3402, p = 0.3402$	0.9976	0.8398
60°C	Newton	$k = 0.3406$	0.9123	4.2831
	Page	$k = 0.6545, n = 0.5059$	0.9912	1.3539
	Henderson and Pabis	$k = 0.2862, a = 0.8807$	0.9227	4.0196
	Logarithmic	$k = 0.3509, a = 0.8904, c = 0.0317$	0.9612	2.8496
	Two term	$k = 0.6004, a = 0.7900, b = 0.1953, g = 0.0565$	0.9966	0.8488
	Modified Page	$k = -0.6545, n = 0.5059$	0.9912	1.3539
	Modified Henderson and Pabis	$k = 0.4309, a = 0.6448, b = 0.1971, c = 0.1579, g = 3.0378, p = 0.0481$	0.9978	0.5879

2. สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น สามารถหาได้จาก กฎข้อที่สองของ Fick ดังสมการที่ (6) สามารถอธิบายการแพร่ความชื้นได้จากสมการ

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{\text{eff}} \nabla^2 M \quad (6)$$

เมื่อ D_{eff} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น ($m^2 s^{-1}$) ซึ่งแสดงถึงปริมาณความชื้นที่เคลื่อนที่ในผลิตภัณฑ์ M คือ ปริมาณความชื้นมาตรฐานแห้ง (dry basis) และ t คือ เวลา (s) ในการหาการแพร่ความชื้นประสิทธิผลของมะม่วงน้ำดอกไม้ จะใช้สมการสำหรับคำนวณที่ใช้สำหรับวัตถุทรงสี่เหลี่ยมดังสมการต่อไปนี้

$$MR = \frac{8}{p^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{(2n-1)^2} \exp\left(- (2n-1)^2 \frac{D_{eff} t}{z^2}\right) \quad (7)$$

เมื่อ n คือ จำนวนของเทอมอนุกรมฟูเรียร์ โดย $n=1, 2, 3, \dots$ โดย t คือเวลาในการอบแห้ง z คือ ความหนาของมะม่วงน้ำดอกไม้ตัวอย่างที่อบแห้ง สำหรับสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (D_{eff}) ของมะม่วงน้ำดอกไม้จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของลมร้อนที่ใช้ในการอบแห้งสามารถอธิบายได้โดยสมการของ Arrhenius-type ดังนี้

$$D_{eff} = 4.53 \times 10^{-2} e^{\left[\frac{4867.82}{T_{ab}} \right]} \quad (8)$$

โดยสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นซึ่งเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิแสดงดังภาพที่ 6 (Figure 6) โดยค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของมะม่วงน้ำดอกไม้ มีค่าในช่วง 1.54×10^{-10} ถึง $0.88 \times 10^{-10} m^2 s^{-1}$

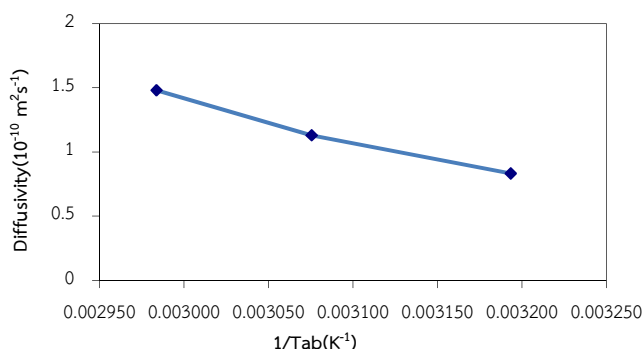


Figure 6 Variations of moisture diffusivity of long peppers as a function of the reciprocal of absolute drying air temperature (T_{ab})

3. การวิเคราะห์การหดตัว ($\Delta V\%$) โดยผลของการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของมะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งมีค่าเป็น 78.4, 66.3 และ 53.7% ที่อุณหภูมิ 60, 50, 40 °C ตามลำดับ ซึ่งพบว่าถ้าอุณหภูมิในการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การหดตัวมากขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 60 °C ที่ความเร็วลม 1.4 ms^{-1} ทำให้เกิดการหดตัวมากที่สุด โดยมีการเปลี่ยนปริมาตรไปถึง 78.4% และการหดตัวจะลดลงเมื่ออุณหภูมิของลมร้อนที่ใช้การอบแห้งลดลง

อภิปรายผล

จากการศึกษาการอบแห้งแบบชั้นบางพบว่าหากเพิ่มอุณหภูมิในการอบแห้งสูงขึ้นพร้อมกับอัตราเร็วลมที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยลง เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงจะทำให้ปริมาณความชื้นออกมาจากผลิตภัณฑ์ได้ง่ายมากขึ้น อีกทั้งน้ำที่เกาะติดกับผิวเนื้อของมะม่วงทำให้ความชื้นที่ขจัดออกได้ง่ายในช่วงเริ่มต้น และการรับพลังงานความร้อนอย่างต่อเนื่องนั้นทำให้เกิดการถ่ายเทความชื้นออกจากเนื้อมะม่วงเรื่อย ๆ อย่างคงที่ หากปริมาณความชื้นยังคงมีมากพอ เมื่อปริมาณของความชื้นเหลือไม่มากแล้ว อัตราความชื้นที่ออกจากวัสดุจะลดลงทำให้อัตราการอบแห้งลดลงด้วย โดยปริมาณความชื้นในแต่ละช่วงของวัสดุแต่ละชนิดก็จะมีค่าแตกต่างกัน โดยปริมาณความชื้นที่อุณหภูมิและความเร็วลมต่าง ๆ ในการทดลองนี้ทำให้ความชื้นของมะม่วงน้ำดอกไม้เริ่มคงที่ประมาณ 30% (d.b.) โดยใช้เวลาอบแห้งประมาณ 10 ชั่วโมง เช่นเดียวกับการอบแห้งองุ่น (Roberts et al., 2008) และการอบแห้งกล้วย (Da Silva et al., 2014) ซึ่งมีความชื้นสูงเช่นเดียวกัน

สำหรับแบบจำลองในการอบแห้งพบว่าแบบจำลอง Modified Henderson & Pabis ให้ผลการทำนายที่ดีขึ้น โดยพบว่า เมื่อปรับปรุงแบบจำลองเดิม Henderson & Pabis โดยเพิ่มจำนวนพจน์และตัวแปรเข้าไปในแบบจำลองเดิมจะทำให้การทำนายค่าที่เกิดจากการทดลองซึ่งอาจมีความคลาดเคลื่อนลุ่มอยู่ได้อย่างแม่นยำมากขึ้น สำหรับสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นนั้น การเพิ่มอุณหภูมิการอบแห้งสูงขึ้นจะส่งผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิในการอบแห้งด้วยลมร้อนเป็นตัวเร่งอัตราการระเหยของน้ำที่ผิวหน้าและมีค่าเท่ากับอัตราการเคลื่อนของน้ำภายในโครงสร้างของผิววัสดุที่มาเติมเต็มบริเวณผิวหน้า ความร้อนที่เกิดขึ้นจะทำให้มีการถ่ายเทมวลสารในการแพร่กระจายตัวของความชื้นสู่ผิววัสดุ และการหดตัวของมะม่วงน้ำดอกไม้ขึ้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในการอบแห้งเป็นหลัก ดังนั้นในการอบแห้งแบบชั้นบางนี้อาจใช้พลังงานจากแหล่งอื่นมาใช้ เช่น คลื่นไมโครเวฟมาช่วยเป็นพลังงานเสริมในการอบแห้งแบบชั้นบางนี้ได้ เราสามารถนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ไปใช้ทำนายผลการทดลองในอุณหภูมิอื่น ๆ ที่เราสนใจ โดยไม่ต้องทำการทดลองจึงทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายและเวลารวมทั้งสามารถนำข้อมูลที่ได้เพื่อเป็นข้อมูลเบื้องต้นไปใช้ในการออกแบบทำโรงอบแห้งขนาดต่าง ๆ ได้

สรุปผลการวิจัย

จากการทดลองอบแห้งแบบชั้นบางนี้และการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ตลอดจนศึกษาการหดตัวของมะม่วงน้ำดอกไม้ ผลการทดลองพบว่าปริมาณความชื้นของมะม่วงน้ำดอกไม้จะลดลงได้ดีที่สุดเมื่อทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 °C และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Modified Henderson and Pabis ที่ถูกปรับปรุงจากแบบจำลองของ Henderson & Pabis (1961) ซึ่งมีความแม่นยำขึ้นสามารถทำนายการลดลงของความชื้นในมะม่วงน้ำดอกไม้ได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุดเมื่อเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบอื่น ๆ โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.99 และค่า RMSE เท่ากับ

0.58 % และสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (D_{eff}) ของมะม่วงน้ำดอกไม้มีค่าเพิ่มมากขึ้นตามอุณหภูมิที่ทำการอบแห้ง ซึ่งสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น จะเป็นไปตามสมการของ Arrhenius-type และมีค่าในช่วง 1.54×10^{-10} ถึง $0.88 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ที่ความเร็วลม 1.4 m s^{-1} ส่วนร้อยละการหดตัว ($\Delta V\%$) ของมะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งมีค่าเป็น 78.4, 66.3 และ 53.7% ที่อุณหภูมิ 60, 50, 40°C ตามลำดับ

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ สาขาวิชาฟิสิกส์ และศูนย์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏเลยที่สนับสนุนเครื่องมือในการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- Aghbashlo M, Kianmehr MH, Arabhosseini A. Modeling of thin-layer drying of potato slices in length of continuous band dryer. *Energy Conservation and Management* 2009;50(5):1348-1355.
- Akpınar EK, Bicer Y. Modelling of the drying of eggplants in thin-layers. *International Journal of Food Science and Technology* 2004;39(3):1-9.
- Arslan D, Özcan MM. Study the effect of sun, oven and microwave drying on quality of onion slices. *LWT-Food Science and Technology* 2010;43(7):1121-1227.
- Da Siva WP, Silva C, Gama F, Gomes J. Mathematical models to describe thin-layer drying and to determine drying rate of whole bananas. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences* 2014;13(1):67-74.
- Doymaz I, Ismail O. Drying characteristics of sweet cherry. *Food and Bioproducts Processing* 2011;89(1):31-38.
- Ertekin C, Yaldiz O. Drying of eggplant and selection of a suitable thin-layer drying model. *Journal of Food Engineering* 2004;63(3):349-359.
- Hassan-Beygi SR, Aghbashlo M, Kianmehr MH, Massad J. Drying characteristics of walnut (*Juglan regia* L.) during convection drying. *International Agrophysics* 2009;23(2):129-135.
- Henderson SM, Pabis S. Grain drying theory. I. Temperature effect on drying coefficient. *Journal of Agricultural Engineering Research* 1961;6(3):169-174.
- Pala M, Mahmutoglu T, Saygi B. Effects of pretreatments on the quality of open-air and solar dried apricots. *Nahrung/Food* 1996;40(3):137-141.
- Roberts JS, Kidd DR, Padilla-Zakour O. Drying kinetics of grape seeds. *Journal of Food Engineering* 2008;89(4):460-465.
- Sahin AZ, Dincer I. Prediction of drying times for irregular shaped multi-dimensional moist solids. *Journal of Food Engineering* 2005;71(1):119-126.
- Singh S, Raina GS, Bawa AS, Saxena DG. Effect of pretreatments on drying and rehydration kinetics and colour of sweet potato slices. *Drying Technology* 2006;24(11):1487-1497.