



การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของผลิตภัณฑ์เกษตรอบแห้งรูปร่างแตกต่างกัน

Mathematical Models Developing of Different Pattern of Dried Agricultural Products

อาภาภรณ์ จอมหล้าพิริติกุล^{1*} และ ประยูร จอมหล้าพิริติกุล¹

¹สาขาวิชาวิศวกรรมหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูป คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตดอนแก่น

อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40000

*Corresponding Author, E-mail: sesaku_cmu@hotmail.com

Received: 24 January 2018 | Revised: 12 June 2018 | Accepted: 24 August 2018

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของผลิตภัณฑ์เกษตรอบแห้งรูปร่างแตกต่างกันที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อน ตามหลักพื้นฐานการถ่ายเทความร้อนและการแพร่ของมวล แบบ 3 มิติ ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยโปรแกรมสำเร็จรูป COMSOL MULTIPHYSICS เพื่อวิเคราะห์การกระจายความชื้น ระยะเวลาการอบแห้ง การหดตัว การสิ้นเปลืองพลังงาน และ อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (SMER) อบแห้งที่อุณหภูมิ 60 70 และ 80 °C ตัวอย่างเป็นแครอทที่มีปริมาตร 1 cm³ มี 2 รูปร่าง คือ 0.5x0.5x4 cm³ และ 0.5x2x1 cm³ จากการศึกษาพบว่า การหดตัวของทั้งสองรูปร่างที่ระยะเวลาอบแห้งนานกว่า 150 นาที มีค่าต่างกันเล็กน้อย และในด้านพลังงานพบว่าผลิตภัณฑ์รูปร่าง 0.5x0.5x4 cm³ ที่อุณหภูมิอบแห้ง 60 °C มีความสิ้นเปลืองพลังงานน้อยกว่า มีค่า 37 kJ และให้ค่า SMER มากกว่า มีค่า 1.95 kg/kWh เมื่อทำการเปรียบเทียบความชื้นและการหดตัวของแบบจำลองและการทดลอง มีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยอยู่ในระดับที่ยอมรับได้

ABSTRACT

The objective of this research was to develop a mathematical model for different pattern of agricultural products drying by hot air based on 3D heat transfer and mass diffusion with the finite element method and COMSOL MULTIPHYSICS software to determine moisture distribution, drying time, shrinkage, energy consumption and specific moisture evaporation rate (SMER). The study was conducted by using drying temperature levels at 60, 70 and 80 °C. The samples were two patterns of 1 cm³ volume carrots. They were 0.5x0.5x4 cm³ and 0.5x2x1 cm³. The results indicated that the shrinkage values of two patterns were slightly different at over 150 minutes drying time. In terms of energy consumption, the 0.5x0.5x4 cm³ size at a drying temperature of 60 °C had the lower energy consumption which was 37 kJ and the higher SMER value which was 1.95 kg / kWh. When moisture and shrinkage values of the model and the experiment were compared, the small errors were found with acceptability.

คำสำคัญ: แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ไฟไนต์เอลิเมนต์ อบแห้ง แครอท

Keywords: Mathematical model, Finite element, Drying, Carrot

บทนำ

ปัจจุบันการอบแห้งผลผลิตเกษตรเป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ยืดระยะเวลาการเก็บรักษาผลผลิตให้นานขึ้น อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับผลผลิตเกษตรให้มีความมั่นคงและยั่งยืน แต่กระบวนการอบแห้งเป็นกระบวนการที่จำเป็นต้องใช้พลังงานมากและส่งผลกระทบต่อด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์ จึงมีงานวิจัยหลายเรื่องที่ทำการศึกษาวิธีการที่จะทำให้ประหยัดพลังงานและส่งผลกระทบต่อด้านคุณภาพให้น้อยที่สุด เพื่อเป็นการคงคุณภาพและลดต้นทุนการผลิต

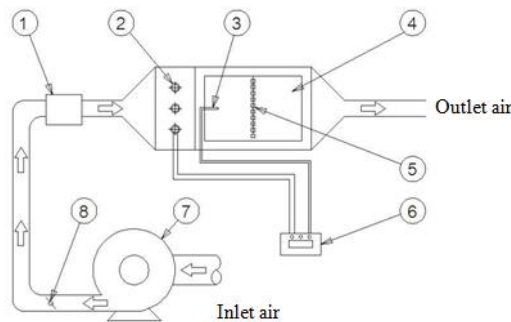
งานวิจัยที่ผ่านมาได้ศึกษาเทคนิคต่างๆ ให้ประหยัดพลังงาน และทำการทดลองเพื่อลองผิดลองถูกหลายครั้ง จนกว่าจะได้สภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมและประหยัดพลังงาน ทำให้เสียเวลา สิ้นเปลืองพลังงานและสูญเสียตัวอย่างในการทดลองจำนวนมาก จากที่กล่าวมาจึงมีงานวิจัยหลายเรื่องได้ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการอบแห้งด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จากหลักการพื้นฐานการถ่ายเทความร้อนและการแพร่ของมวลของผลิตภัณฑ์เกษตรด้วยกลไกการพาความร้อน (Gornicki and Kaleta., 2007; Bialobrzewski et al., 2008; Kittiworrawatt and Devahastin., 2009; Kaya et al., 2009; Souraki et al., 2009) การศึกษาปัจจัยการอบแห้งที่มีผลต่อพลังงานในด้านของรูปร่างผลิตภัณฑ์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จากงานวิจัยของ Kaya et al. (2006) ได้ศึกษาอัตราส่วนภาพ (aspect ratios) ของผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาตรต่างกัน ต่อการกระจายความชื้นและอุณหภูมิ และ Lopez et al. (2018) ได้ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่อการหดตัวและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเจลทรงปริซึมสี่เหลี่ยม และทรงกระบอก จากที่กล่าวมายังไม่ได้มีการศึกษาการเปลี่ยนแปลงผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาตรเท่ากัน แต่รูปร่างแตกต่างกัน

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ โดยโปรแกรมสำเร็จรูป COMSOL Multiphysics วิเคราะห์การอบแห้งผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างต่างกัน แต่ปริมาตรเท่ากัน โดยผลิตภัณฑ์ตัวอย่างที่ใช้คือแครอท เพื่อศึกษาการกระจายความชื้น ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง การสิ้นเปลืองพลังงาน อัตราการระเหยน้ำ จากการศึกษาจะทำให้ได้รูปร่างที่เหมาะสมต่อการอบแห้ง และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรอื่นๆต่อไปได้

วิธีดำเนินการวิจัย

การทดลองเพื่อยืนยันความถูกต้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษารูปร่างผลิตภัณฑ์อบแห้ง โดยให้แครอทมีปริมาตร 1 cm^3 มีรูปร่างที่แตกต่างกัน 2 แบบ คือ $0.5\times0.5\times4\text{ cm}^3$ และ $0.5\times1\times2\text{ cm}^3$ แบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ส่วน คือ

1. การวิเคราะห์ความชื้น นำแครอทสดมาล้างปอกเปลือก และหั่นเป็นชิ้นขนาด $0.5\times0.5\times4\text{ cm}^3$ และ $0.5\times1\times2\text{ cm}^3$ ทำการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนจากงานวิจัยของ Jomlapelatikul et al. (2016) ดังรูปที่ 1 โดยมีขนาดของห้องอบแห้ง $40\times70\times40\text{ cm}^3$ ให้ความร้อนด้วยฮีตเตอร์ขนาด 15 kW พัดลมเป่าอากาศแบบหอยโข่ง วัดอุณหภูมิในห้องอบแห้งด้วยเทอร์โมคัปเปิลชนิด K มีความแม่นยำ $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ วัดความเร็วลมอากาศ รุ่นTESCO 425, Taipei, Taiwan ด้วยความแม่นยำ $\pm 0.03\text{ m/s}$ กำหนดอุณหภูมิในการอบแห้ง 60 70 และ $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ความเร็วลม 0.5 m/s อบแห้งที่เวลา 30 60 90 120 และ 150 นาที จากนั้นนำตัวอย่างที่อบแห้งไปวิเคราะห์หาความชื้นใน แต่ละเวลาทั้ง 3 อุณหภูมิ และทำการทดลอง 3 ซ้ำ จากนั้นเปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลอง



รูปที่ 1 ไดอะแกรมของเครื่องอบแห้งลมร้อน ดังหมายเลข

1. โซโครมิเตอร์ 2. ฮีตเตอร์ 3. เทอร์โมคัปเปิล 4. ห้องอบแห้ง 5. แครอท 6. กล้องควบคุมอุณหภูมิ 7. พัดลม และ 8. วาล์วควบคุมลม

2. การวิเคราะห์การหดตัวด้วยการแทนที่ของ n-heptane นำแครอทอบแห้งในแต่ละเวลาตามข้อ 1. มาหาปริมาตรการหดตัว ด้วยวิธีการแทนที่ของ n-heptane โดยการหั่นเป็นชิ้นเล็กๆ แล้วนำไปใส่ลงในบิวเรตที่เติม n-heptane ไว้ พร้อมกับวัดปริมาตรที่เปลี่ยนแปลง บันทึกผล แล้วนำข้อมูลที่ได้มาหาปริมาตรการหดตัวเพื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลอง

การศึกษาแบบจำลอง

หลักการและการสร้างแบบจำลอง ใช้หลักการพื้นฐานสมการการส่งถ่ายความร้อนและการแพร่ของมวล รวมถึงสมมติฐานต่างๆได้มีการประยุกต์ใช้จากงานวิจัยของ (Jomlapelatikul et al., 2016) ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. การส่งถ่ายความร้อนแบบจำลองการนำความร้อนอธิบายโดยสมการที่ (1)

$$r C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (1)$$

ค่าความหนาแน่นของแครอท $r = 1154 \text{ kgm}^{-3}$ และค่าความจุความร้อนของแครอท $C_p = 3736 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ การเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิของค่าการนำความร้อนของแครอท (k), ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$), (Gomez et al. 2004).

$$k = 0.5464 + 0.0012T - 2.0 \times 10^{-6}T^2 \quad (2)$$

2. การส่งถ่ายความร้อน ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (D_{eff}) คือ สมบัติเฉพาะทางกายภาพที่มีความสามารถในการเคลื่อนที่ของน้ำสามารถเขียนสมการจาก Fick's second law ดังนี้

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \nabla \cdot (D_{eff} \nabla X) \quad (3)$$

เมื่อ D_{eff} (m^2s^{-1}) คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น พัฒนาจากงานวิจัยของ Souraki et al. (2009)

$$D_{eff} = \exp \left[-0.97 - \left(\frac{3459.8}{T + 273} \right) + 0.059X \right] / 3600 \quad (4)$$

3. ที่สภาวะเริ่มต้นของอุณหภูมิและความชื้น

$$T(x, y, z)|_{t=0} = T_0 \quad (5)$$

$$X(x, y, z)|_{t=0} = X_0 \quad (6)$$

4. สภาวะเงื่อนไขขอบ การอบแห้งที่ผิวของแครอท สมมติให้มีการสูญเสียความร้อนดังสมการที่ (7) และสมการที่ (8) เป็นการสูญเสียความชื้นด้วยการพาความร้อนทั่วทั้งพื้นผิว

$$-n \cdot k \nabla T = h_T (T_a - T) + H \cdot (D_{eff} \nabla X) \quad (7)$$

$$-n \cdot (D_{eff} \nabla X) = h_m (X_e - X) \quad (8)$$

เมื่อเอนทาลปีของน้ำ อ้างอิงโดย Hii et al. (2013)

$$H = -0.0469 T^2 - 13.493 T + 5220 \quad (9)$$

เมื่อสัมประสิทธิ์การส่งถ่ายความร้อน (h_T) และสัมประสิทธิ์การส่งถ่ายความมวล (k_m) พัฒนาจากงานวิจัยของ Botelho et al. (2011)

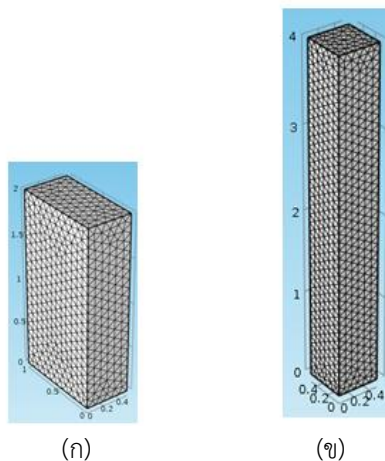
$$h_T = 0.624T + 16.7261 \quad (10)$$

$$k_m = 0.001T + 0.0043 \quad (11)$$

เมื่อ T , T_a และ T_0 คืออุณหภูมิ (K) ที่ เวลาใดๆ อุณหภูมิอากาศ และอุณหภูมิเริ่มต้นตามลำดับ ส่วน X , X_0 และ X_e คือ ปริมาณความชื้น (g น้ำ/gมวลแห้ง) ที่ เวลาใดๆ ความชื้นเริ่มต้น และความชื้นสมดุล ตามลำดับ

ประมวลผลโดยโปรแกรมสำเร็จรูป COMSOL Multiphysics ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในแบบจำลอง 3 มิติ มีโครงสร้างของแบบจำลองเป็นรูปสามเหลี่ยม จำนวนเอลิเมนต์ที่ใช้พิจารณาจากวิธี mesh independent test เลือกจำนวนเอลิเมนต์น้อยที่สุด ที่ทำให้การประมวลผลคลาดเคลื่อนไม่เกิน 1 เปอร์เซ็นต์ ลักษณะรูปร่างของโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 2 การวิเคราะห์ผลของแบบจำลองแบ่งออกเป็น 3 กรณี ดังนี้

1. การวิเคราะห์ผลความชื้นของแบบจำลองอุณหภูมิที่ใช้อบแห้ง คือ 60 70 และ 80 °C อบแห้งในช่วงเวลา 30 60 90 120 และ 150 นาที นำการวิเคราะห์ผลความชื้นมาเปรียบเทียบกับผลการทดลอง เพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลอง



รูปที่ 2 โครงสร้างปริมาตร 1 cm³ 2 รูปร่าง: (ก) 0.5x1x2 cm³ และ (ข) 0.5x0.5x4 cm³

2. การวิเคราะห์การหดตัวของแครอททั้งสองรูปร่าง เพื่อหาความสอดคล้องและเหมาะสมของแบบจำลอง โดยนำความชื้นจากการทำนายที่เวลา 30 60 90 120 และ 150 นาที มาหาปริมาณการหดตัว โดยการคำนวณหาปริมาณการหดตัวตามสมมติฐานคือ ปริมาณน้ำที่ระเหยเท่ากับปริมาตรที่หดตัว (Janjai et al., 2010) จากนั้นนำมาพล็อตกราฟและเปรียบเทียบกับผลการทดลอง

3. การวิเคราะห์ความสิ้นเปลืองพลังงานในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ โดยประมวลผลแบบจำลองการอบแห้งทั้ง 3 อุณหภูมิ ให้เหลือความชื้นสุดท้าย 10% มาตรฐานเปียก จะทำให้ทราบระยะเวลาในการอบแห้ง และนำมาคำนวณพลังงานความร้อน (kJ) ตามสมการที่ (12)

$$Q = m \dot{C}_p \Delta T_a \Delta t \quad (12)$$

เมื่อ	m	คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (kg/s)
	C_p	คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (kJ/kg K)
	ΔT_a	คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิอากาศระหว่างอุณหภูมิแวดล้อมและอุณหภูมิอบแห้ง (K)
	Δt	คือ ระยะเวลาในการอบแห้ง (s)

งานวิจัยนี้ได้ตั้งสมมติฐานให้ความสิ้นเปลืองพลังงานทั้งหมดมาจากฮีตเตอร์ เนื่องจากระบบการหุ้มฉนวนดีมากไม่มีการสูญเสียความร้อน ความสิ้นเปลืองพลังงานของโบเวอร์และอุปกรณ์ทางไฟฟ้าอย่างอื่นเมื่อเปรียบเทียบกับฮีตเตอร์มีค่าน้อยมาก (Soysal et al., 2001 และ Hazervazifeh et al., 2016) จากนั้นนำค่าความสิ้นเปลืองพลังงานไปคำนวณหาอัตราการระเหยน้ำจำเพาะต่อไป

อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (SMER) คือ พลังงานที่ต้องการในการระเหยน้ำหนึ่งกิโลกรัม สามารถคำนวณได้จากสมการ (13) อ้างอิงโดย Chua et al. (2002)

$$SMER = \frac{w_i - w_f}{Q} \quad (13)$$

เมื่อ w_i และ w_f คือ น้ำหนักเริ่มต้นและน้ำหนักสุดท้ายของตัวอย่าง ตามลำดับ

Q คือ พลังงานความร้อน (kJ)

นำผลการวิเคราะห์ความสิ้นเปลืองพลังงานความร้อน และค่า SMER ของรูปร่าง 0.5x1x2 cm³ และ 0.5x0.5x4 cm³ มาเปรียบเทียบกับแบบจำลองแคโรทอปแห้งทรงกลมและทรงลูกบาศก์ที่มีปริมาตรเท่ากับ 1 cm³ เท่ากัน ในงานวิจัยของ (Jomlapelatikul et al., 2016 และ Jomlapelatikul et al., 2017) ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ระยะเวลาอบแห้ง การสิ้นเปลืองพลังงาน และค่า SMER ของรูปร่างต่างๆ ที่ความชื้นสุดท้าย 10 % w.b.

รูปร่างที่มีปริมาตร 1 (cm ³)	ระยะเวลาอบแห้ง (min)			การสิ้นเปลืองพลังงาน (kJ)			SMER (kg/kWh)		
	60 °C	70 °C	80 °C	60 °C	70 °C	80 °C	60 °C	70 °C	80 °C
0.5x0.5x4	218	198	180	37	43	48	1.95	1.67	1.50
0.5x1x2	262	208	202	44	45	53	1.64	1.60	1.36
1x1x1	392	210	185	66	45	49	1.09	1.60	1.47
(Jomlapelatikul et al., 2016)									
ทรงกลม	407	237	212	68	51	56	1.06	1.41	1.29
(Jomlapelatikul et al., 2017)									

การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อน

ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (E) ระหว่างการทดลองและการทำนายค่าจากแบบจำลอง ได้จากสมการ (14) อ้างอิงโดย Hii et al. (2013)

จำนวนข้อมูลทั้งหมด

$$E(\%) = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^n \frac{|Experimental\ value - Predicted\ value|}{Experimental\ value} \quad (14)$$

เมื่อ N คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด

i คือ ลำดับข้อมูลเริ่มต้นตั้งแต่ 1 ถึง n

n คือ ลำดับข้อมูลสุดท้าย

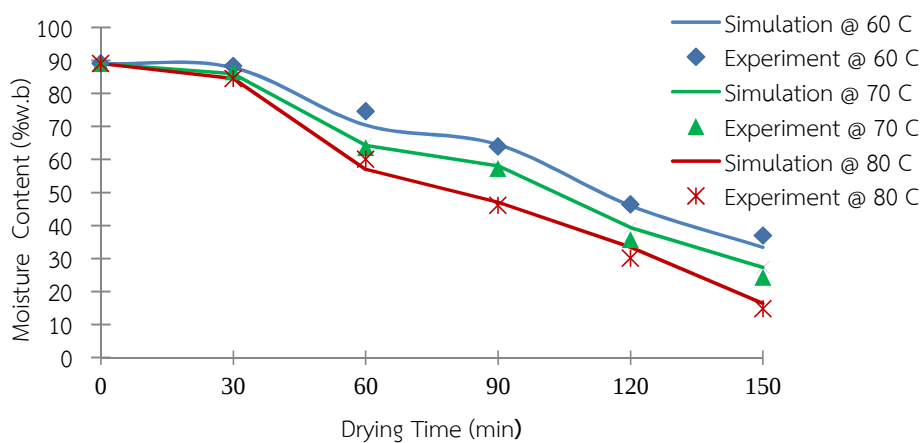
งานวิจัยที่ผ่านมาใช้เกณฑ์การประเมินค่าความคลาดเคลื่อน (%E) โดยค่าที่ยอมรับได้มีค่าไม่เกิน 10% (Park et al., 2002)

ผลและการวิจารณ์ผล

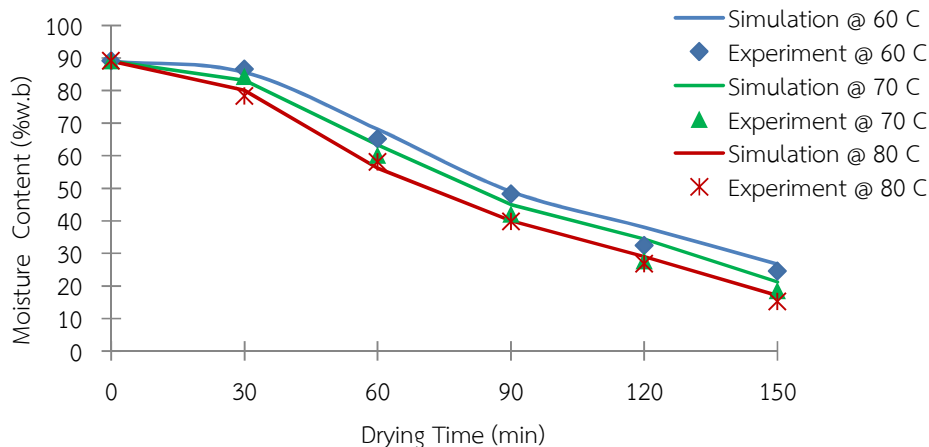
วิเคราะห์ผลความชื้น

เปรียบเทียบความชื้นที่เวลาต่างๆ ดังรูปที่ 3 ระหว่างแบบจำลองและการทดลองเพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลอง ของรูปร่าง 0.5x1x2 cm³ และ 0.5x0.5x4 cm³ พบว่าความคลาดเคลื่อนของรูปร่าง 0.5x1x2 cm³ คือ 2.8 4.5 และ 5.1 เปอร์เซ็นต์ และรูปร่าง 0.5x0.5x4 cm³ คือ 5.6 8.9 และ 4.6 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 60 70 และ 80 °C ตามลำดับ โดยทั้งสองรูปร่างมีความ

คลาดเคลื่อนไม่เกิน 10% อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ (Park et al., 2002) เมื่อพิจารณาการกระจายความชื้นตามรูปที่ 4-6 (ก) และ(ข) บริเวณผิวและแกนกลางของแครอทตามลำดับ ที่ระยะเวลาอบแห้ง 100 นาที อุณหภูมิ 60 70 และ 80 °C ของทั้งสองรูปร่าง พบว่าที่ผิวแครอท โดยเฉพาะบริเวณขอบจะมีความชื้นน้อยกว่าบริเวณแกนกลาง เนื่องจากการกระจายความชื้นจะมีการกระจายจากด้านในมายังขอบ ดังนั้นด้านขอบจะมีการระเหยน้ำออกมาก่อน และที่อุณหภูมิ 80 °C จะมีความชื้นน้อยที่สุด นั่นเป็นเพราะว่าอุณหภูมิสูงจะสามารถไล่ความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์ได้เร็วกว่าอุณหภูมิต่ำ (สุรจิตร, 2560) และเมื่อเปรียบเทียบที่อุณหภูมิเดียวกันรูปร่าง 0.5x0.5x4 cm³ จะมีความชื้นน้อยกว่ารูปร่าง 0.5x1x2 cm³ อย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากรูปร่าง 0.5x0.5x4 cm³ มีรูปร่างที่บางและยาวกว่า ทำให้สามารถระเหยน้ำที่ผิวได้ดีกว่า ส่วนการกระจายความชื้นที่แกนกลางแครอทดังรูปที่ 4-6 (ข) เมื่อเปรียบเทียบที่อุณหภูมิเดียวกันรูปร่าง 0.5x0.5x4 cm³ จะมีความชื้นน้อยกว่ารูปร่าง 0.5x1x2 cm³ มีลักษณะคล้ายคลึงกับบริเวณผิวแต่ที่บริเวณแกนกลางจะมีความชื้นมากกว่าบริเวณผิว เนื่องจากน้ำบริเวณแกนกลางของผลิตภัณฑ์ยังไม่สามารถดึงออกได้หมด ต้องใช้ระยะเวลาการอบแห้งให้นานขึ้น น้ำจากข้างในผลิตภัณฑ์จึงสามารถดึงออกมายังผิวและระเหยสู่ภายนอกได้มากขึ้น

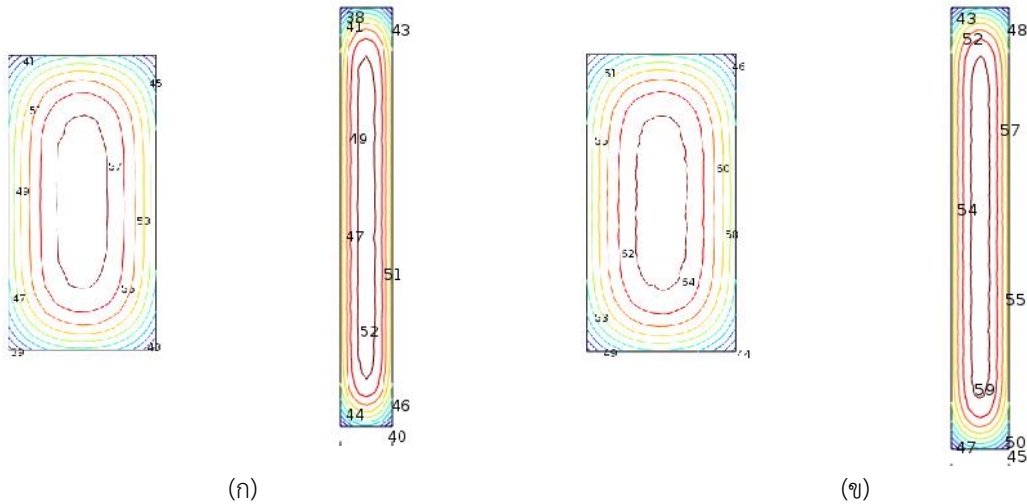


(ก)

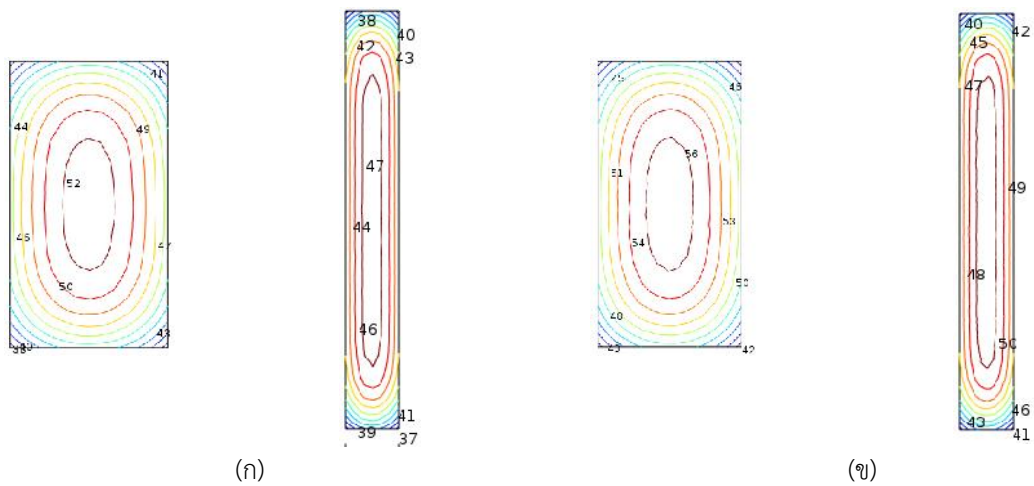


(ข)

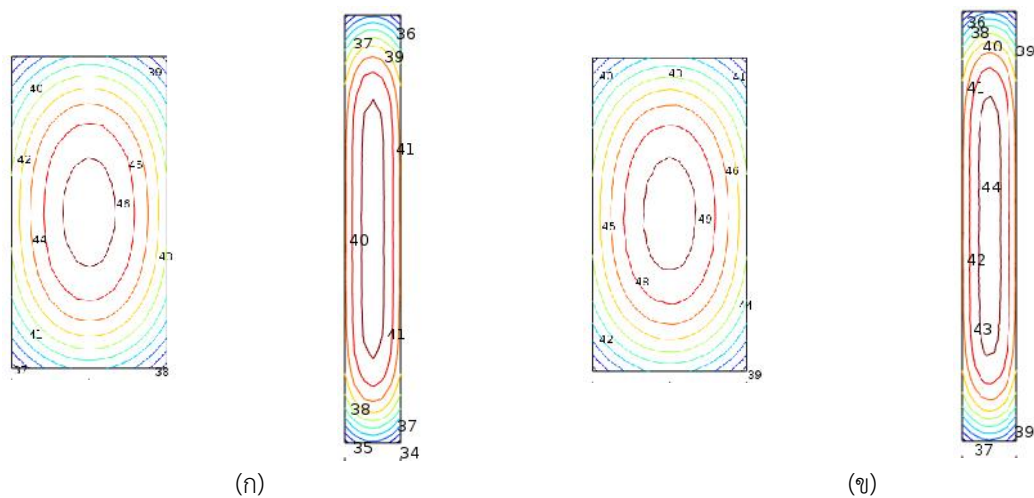
รูปที่ 3 การเปรียบเทียบความชื้นของแครอทระหว่างการทดลองและแบบจำลองของรูปร่าง (ก) รูปร่าง 0.5x1x2 cm³ และ (ข) รูปร่าง 0.5x0.5x4 cm³



รูปที่ 4 การกระจายความชื้นของแครอทรูปร่าง $0.5 \times 1 \times 2 \text{ cm}^3$ และ $0.5 \times 0.5 \times 4 \text{ cm}^3$ ตามลำดับ ที่อุณหภูมิอบแห้ง $60 \text{ }^\circ\text{C}$ และระยะเวลา 100 นาที (ก) บริเวณผิว และ (ข) แกนกลาง



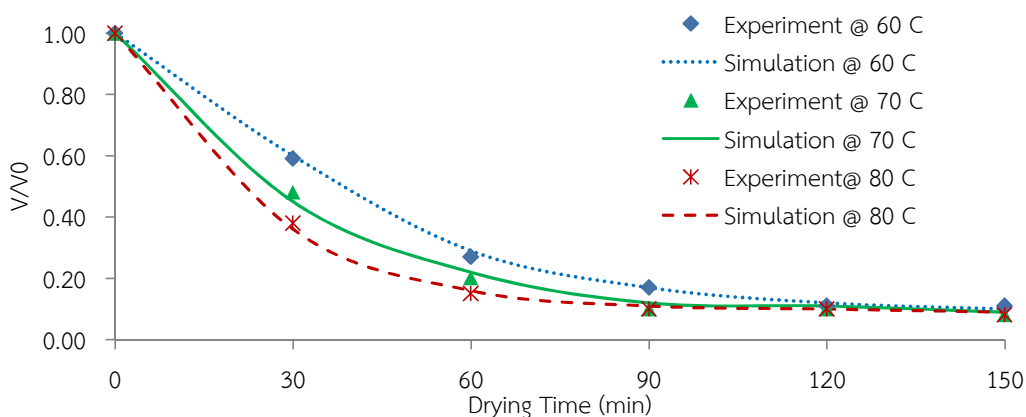
รูปที่ 5 การกระจายความชื้นของแครอทรูปร่าง $0.5 \times 1 \times 2 \text{ cm}^3$ และ $0.5 \times 0.5 \times 4 \text{ cm}^3$ ตามลำดับ ที่อุณหภูมิอบแห้ง $70 \text{ }^\circ\text{C}$ และระยะเวลา 100 นาที (ก) บริเวณผิว และ (ข) แกนกลาง



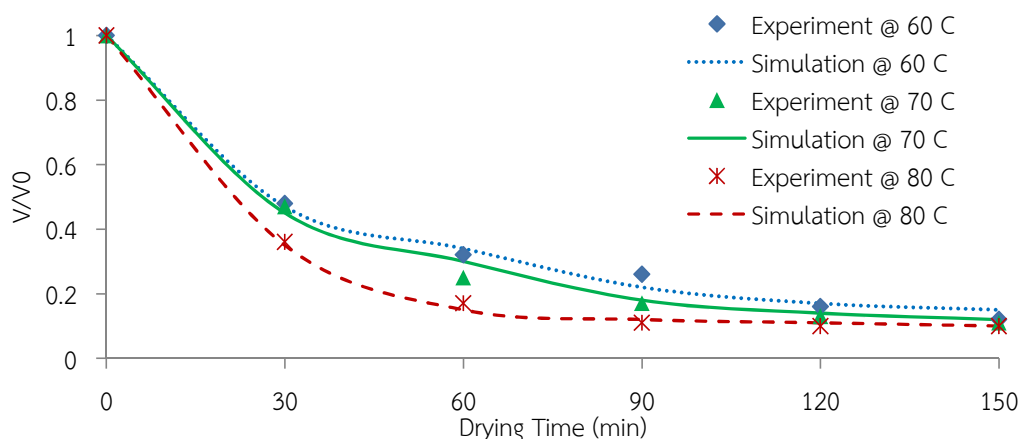
รูปที่ 6 การกระจายความชื้นของแครอทรูปร่าง $0.5 \times 1 \times 2 \text{ cm}^3$ และ $0.5 \times 0.5 \times 4 \text{ cm}^3$ ตามลำดับ ที่อุณหภูมิอบแห้ง $80 \text{ }^\circ\text{C}$ และระยะเวลา 100 นาที (ก) บริเวณผิว และ (ข) แกนกลาง

วิเคราะห์ผลการหดตัว

ในการอบแห้งแครอทพบว่า แครอทมีการหดตัวเล็กน้อยเมื่อเวลาในการอบแห้งนานขึ้น โดยการหดตัวเกิดจากน้ำในผลิตภัณฑ์ที่ถูกระเหยออกไป ทำให้เกิดช่องว่างขึ้น ซึ่งจะทำให้ผิวผลิตภัณฑ์เกิดการยุบตัวแทนที่น้ำในช่องว่างนั้น (Yadollahinia and Jahangiri, 2009) โดยการหดตัวของพื้นผิวตรงกลางมากกว่าที่ส่วนขอบแครอท (อัศวิน, 2546) ทำให้แครอทมีการเสียรูปร่างและขนาดเล็กน้อย จากการวิเคราะห์การหดตัวใช้หลักการตามสมมติฐานคือปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงจากการหดตัวเท่ากับปริมาณน้ำที่ระเหย แล้วนำมาเปรียบเทียบกับค่าการทดลอง ที่อุณหภูมิอบแห้ง 60 70 และ 80 °C ของ 2 รูปร่าง คือ $0.5 \times 1 \times 2 \text{ cm}^3$ และ $0.5 \times 0.5 \times 4 \text{ cm}^3$ มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของทั้ง 3 อุณหภูมิอบแห้ง มีค่าประมาณ 6.69 และ 5.54 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ซึ่งถือว่ามีความน่าเชื่อถือ และลักษณะแนวโน้มของกราฟ ดังรูปที่ 7 และ 8 แสดงความสัมพันธ์ของการหดตัวเมื่อเวลาอบแห้งผ่านไปของทั้งสองรูปร่าง จะสังเกตได้ว่าเมื่อเวลาในการอบแห้งและอุณหภูมิสูงขึ้นทำให้การหดตัวของทั้งสองรูปร่างมากขึ้น (Udomkun et al., 2016) นั่นคือ V/V_0 มีค่าน้อยลง ซึ่งกราฟจะมีแนวโน้มลดลงโดยเฉพาะในช่วง 60 นาทีแรก และหลังจากนั้นจะหดตัวอย่างช้าๆ ตามความชื้นที่ลดลงอย่างต่อเนื่อง สามารถอธิบายได้จากพฤติกรรมการระเหยนํ้าออกจากผลิตภัณฑ์เป็นผลให้ช่องว่างภายในเกิดการหดตัวและส่งผลให้มีการสูญเสียรูปร่างของผลิตภัณฑ์ การคำนวณตามสมมติฐานการหดตัวจะน้อยกว่าการทดลองซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของอาภาภรณ์และคณะ (2560)



รูปที่ 7 การหดตัวของ $0.5 \times 1 \times 2 \text{ cm}^3$



รูปที่ 8 การหดตัวของ $0.5 \times 0.5 \times 4 \text{ cm}^3$

วิเคราะห์ผลด้านพลังงาน

เมื่อพิจารณาตารางที่ 1 เปรียบเทียบระยะเวลาอบแห้ง การสิ้นเปลืองพลังงาน และค่า SMER ที่อุณหภูมิ 60 °C และ 80 °C ของรูปร่างทั้งหมด พบว่าที่อุณหภูมิการอบแห้งสูงจะใช้ระยะเวลาการอบแห้งสั้นกว่า และรูปร่าง $0.5 \times 0.5 \times 4 \text{ cm}^3$ จะใช้ระยะเวลาการอบแห้งสั้นกว่ารูปร่างอื่น และเมื่อนำระยะเวลาการอบแห้งไปคำนวณการสิ้นเปลืองพลังงานและ SMER พบว่ารูปร่าง $0.5 \times 0.5 \times 4 \text{ cm}^3$ อบแห้งที่อุณหภูมิ 60 °C มีความสิ้นเปลืองพลังงานน้อยที่สุด และมีค่า SMER มากที่สุด ซึ่งเป็นผลดีในด้านการประหยัดพลังงาน

สรุปผลการวิจัย

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งลมร้อนในผลิตภัณฑ์เกษตร ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยผลิตภัณฑ์ตัวอย่าง คือ แครอท ที่มีปริมาตรเท่ากัน 1 cm^3 แต่มีรูปร่างแตกต่างกัน คือ รูปร่าง $0.5 \times 1 \times 2 \text{ cm}^3$ และ $0.5 \times 0.5 \times 4 \text{ cm}^3$ กำหนดอุณหภูมิอบแห้ง 60 °C และ 80 °C เพื่อวิเคราะห์ผลการกระจายความชื้น ระยะเวลาการอบแห้ง และการหดตัว พบว่าที่อุณหภูมิอบแห้งเท่ากัน รูปร่าง $0.5 \times 0.5 \times 4 \text{ cm}^3$ จะมีความชื้นและระยะเวลาอบแห้งน้อยกว่ารูปร่าง $0.5 \times 1 \times 2 \text{ cm}^3$ ลักษณะการหดตัวของทั้งสองรูปร่างมีความแตกต่างกันเล็กน้อย โดยมีการหดตัวอย่างรวดเร็วในช่วง 60 นาทีแรก จากการเปรียบเทียบผลของแบบจำลองทั้ง 2 รูปร่าง กับการทดลองมีความสอดคล้องกันและมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงน่าเชื่อถือได้

จากการวิเคราะห์การสิ้นเปลืองพลังงาน และค่า SMER ของทั้ง 2 รูปร่าง และเปรียบเทียบกับทรงลูกบาศก์และทรงกลม จากงานวิจัยของ Jomlapelatikul et al. (2016) และ Jomlapelatikul et al. (2017) ตามลำดับ พบว่าในด้านพลังงานรูปร่าง $0.5 \times 0.5 \times 4 \text{ cm}^3$ ที่อุณหภูมิอบแห้ง 60 °C จะมีความสิ้นเปลืองพลังงานน้อยที่สุด และมีค่า SMER มากที่สุด

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น ที่ให้การสนับสนุนสถานที่ เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง และขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่สนับสนุนโปรแกรมสำเร็จรูป COMSOL Multiphysics

เอกสารอ้างอิง

- สุรจิตร พระเมือง. (2560). การแพร่ความชื้นและปริมาณพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งผลปาล์มน้ำมัน. วารสารวิทยาศาสตร์ มข. 45(4): 896-903.
- อัศวิน ชินธรรมมิตร. (2546). การพัฒนากรรมวิธีการอบแห้งแครอทและเนื้อไก่ โดยการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ. 154 หน้า.
- อาภาภรณ์ จอมเหล่าพิตรกุล. (2559). การจำลองการถ่ายเทความชื้นและการหดตัวของผลิตภัณฑ์เกษตรด้วยการอบแห้งแบบสองขั้นตอน. วิทยานิพนธ์ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต. มหาวิทยาลัยมหาสารคาม. มหาสารคาม. 80 หน้า.
- Bialobrzewski, I., Zielinska, M., Mujumdar, A. S., and Markowski, M. (2008). Heat and mass transfer during drying of a bed of shrinking particles- Simulation for carrot cubes dried in a spout- fluidized-bed drier. *Int. J. Heat. Mass Tran.* 51(19-20): 4704-4716.
- Botelho, F. M., Correa, P. C., Goneli, A. L. D., Martins, M. A., Magalhes, F. E. A., and Campos, S. C. (2011). Periods of constant and falling-rate for infrared drying of carrot slices. *Rev. Bras. Eng. Agr. Amb.* 15(8): 845-852.
- Chua, K. J., Chou, S. K., Hawlader, M. N. A., Mujumdar, A. S. and Ho, J. C. (2002). Modelling the moisture and temperature distribution within an agricultural product undergoing time-varying drying schemes. *Biosyst. Eng.* 81(1): 99-111.
- Crank, J. (1975). *The Mathematics of Diffusion*. London: Oxford University Press. pp. 267-268.
- Gomez, F., Toledo, R. T., Wadso, L. and Gekas, V. (2004). Isothermal calorimetry approach to evaluate tissue damage in carrot slices upon thermal processing, *J. Food Eng.* 65(2): 165-173.
- Gornicki, K., and Kaleta, A. (2007). Drying curve modeling of blanched carrot cubes under natural convection condition. *J. Food Eng.* 82(2): 160-170.

- Hazervazifeh, A., Nikbakht, A. M. and Moghaddam, P. A. (2016). Novel hybridized drying methods for processing of apple fruit: Energy conservation approach. *Energy*. 103: 679-687.
- Hii, C. L., Law, C. L. and Law, M. C. (2013). Simulation of heat and mass transfer of cocoa beans under stepwise drying conditions in a heat pump dryer. *Appl. Therm. Eng.* 54(1): 264-271.
- Janjai, S., Mahayothee, B., Lamlert, N., Bala, B. K., Precoppe, M., Nagle, M. and Muller. J. (2010). Diffusivity, shrinkage and simulated drying of litchi fruit (*Litchi Chinensis* Sonn.). *J. Food Eng.* 96(2): 214-221.
- Jomlaperatikul, A., Wiset, L. and Poomsa-ad, N. (2017). Simulation of heat and mass transfer of carrot for stepwise drying. In: *The 9th International Conference on Sciences, Technology and Innovation for Sustainable Well- Being (STISWB)* 26-28 June 2017. Kunming University of Sciences and Technology, China. 328-331.
- Jomlaperatikul, A., Wiset, L., Duangkhamchan, W., and Poomsa-ad, N. (2016). Model-based investigation of heat and mass transfer for selecting optimum intermediate moisture content in stepwise drying. *Appl. Therm. Eng.* 107: 987-993.
- Kaya, A., Aydin, O. and Demirtas, C. (2009). Experimental and theoretical analysis of drying carrots. *Desalination*. 237(1-3): 285-295.
- Kaya, A., Aydin, O. and Dincer, I. (2006). Numerical modeling of heat and mass transfer during forced convection drying of rectangular moist objects. *Int. J. Heat Mass Transf.* 49(17-18): 3094-3103.
- Kittiworawatt, S. and Devahastin, S. (2009). Improvement of a mathematical model for low-pressure superheated steam drying of a biomaterial. *J. Chem. Eng. Sci.* 64(11): 2644-2650.
- Lopez-Mendez, E. M., Ortiz-Garcia-Carrasco, B., Ruiz-Espinosa, H., Sampieri-Croda, A., Garcia-Alvarado, M. A., Ochoa-Velasco, C. E., Escobedo-Morales, A., and Ruiz-Lopez., I. I. (2018). Effect of shape change and initial geometry on water diffusivity estimation during drying of gel model systems. *J. Food Eng.* 216: 52-64.
- Park, K. J., Vohnikova, Z. and Reis-Brod, F. P. (2002). Evaluation of drying parameters and desorption isotherms of garden mint leaves (*Mentha Crispa* L.). *J. Food Eng.* 51(3): 193-199.
- Soysal, Y. and Oztekin, S. (2001). Technical and economic performance of a tray dryer for medicinal and aromatic plants. *J. Agric. Eng Res.* 79(1): 73-79.
- Souraki, B. A., Andres, A. and Mowla, D. (2009). Mathematical modeling of microwave-assisted inerted medium fluidized bed drying of cylindrical carrot samples. *J. Chem. Eng. Process.* 48(1): 296-305.
- Udomkun, P., Nagle, M., Argyropoulos, D., Mahayothee, B., and Müller, J. (2016). Multi-sensor approach to improve optical monitoring of papaya shrinkage during drying. *J. Food Eng.* 189: 82-89.
- Yadollahinia, A. and Jahangiri, M. (2009). Shrinkage of potato slice during drying. *J. Food Eng.* 94(1): 52-58.

