



สมบัติทางกายภาพและเชิงความร้อนของพลับ

Physical and thermal properties of Persimmon Fruit

ธนิดา เกตุวิจิตรชัย อารีย์ อัจฉริยวิริยะ และ ศิวะ อัจฉริยวิริยะ

Thanida Ketwijitchai, Aree Achariyaviriya and Siva Achariyaviriya

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Department of Mechanical Engineering, Chiang Mai University, Chiang Mai, Thailand, 50200

E-mail : ni.ketwijitchai@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของพารามิเตอร์ต่างๆ สำหรับการอบแห้งพลับ โดยพารามิเตอร์ประกอบไปด้วยความชื้นสมดุล ความร้อนแฝงในการระเหยน้ำออกจากพลับ ความร้อนจำเพาะ และความหนาแน่น ซึ่งพารามิเตอร์เหล่านี้จำเป็นสำหรับการนำไปใช้วิเคราะห์และจำลองการอบแห้งพลับ ในส่วนของการหาค่าความชื้นสมดุลของพลับทำการทดลองโดยใช้วิธีทางสถิติ โดยใช้สารละลายเกลืออิ่มตัวทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในช่วง 0.112-0.959 ที่ช่วงอุณหภูมิ 45-65 °C ส่วนการหาค่าความร้อนแฝงในการระเหยน้ำออกจากพลับใช้แบบจำลองความชื้นสมดุลที่ทำการพัฒนาขึ้นในการคำนวณ การหาค่าความร้อนจำเพาะโดยใช้แคลอรีมิเตอร์ และความหนาแน่นจากความสัมพันธ์ระหว่างมวลต่อปริมาตร ผลจากการทดลองพบว่าค่าความชื้นสมดุลจะมีค่าลดลงเมื่อค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศต่ำลงและอุณหภูมิในการอบแห้งสูงขึ้น โดยมีแบบจำลองตามรูปแบบของ Modified Oswin เป็นรูปแบบที่เหมาะสมที่สุด ส่วนความร้อนแฝงของการระเหยน้ำออกจากพลับจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อค่าความชื้นของพลับต่ำลง และในส่วนของการหาความร้อนจำเพาะและความหนาแน่นจะมีค่าลดลงเมื่อพลับมีค่าความชื้นต่ำลง

ABSTRACT

The objective of this research is to develop a mathematical model for persimmon fruit drying. The parameters considered in this research are the equilibrium moisture content, latent heat of vaporization for persimmon fruit, specific heat and density. These parameters can be used to analyze and simulate the process of drying persimmon fruit. The static method by saturated salt solution was used experimentally to determine the equilibrium moisture content. The relative humidity of air was controlled between 0.112 - 0.959 at a temperature of 45-65 °C. The latent heat of vaporization for persimmon fruit was determined from the equilibrium moisture content model. The specific heat was determined using a calorimeter and the density was determined by the relationship of weight to volume. The results show that, the equilibrium moisture content decreased when the relative humidity of air decreased and increased with the drying temperature. The best fit with the experiment data was the Modified Oswin model. The latent heat of vaporization for persimmon fruit increased with a decrease in the moisture content. Finally, the specific heat and density decreased when the moisture content decreased.

1. บทนำ

พลับ มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Diospyros kaki L.* เป็นผลไม้ที่มีประโยชน์ต่อสุขภาพให้แคลอรีต่ำ เส้นใยอาหารสูง ประกอบไปด้วยสารต่อต้านอนุมูลอิสระซึ่งช่วย

เรื่องการชะลอริ้วรอย และเสริมสร้างภูมิคุ้มกันโรค [1] พลับถูกนำเข้ามาเพาะปลูกครั้งแรกในประเทศไทยเมื่อปี พ.ศ. 2471 โดยนำเข้ามาจากประเทศจีน [2] ปัจจุบันพลับเป็นที่นิยมปลูกในเขตภาคเหนือของประเทศไทยในจังหวัด

เขียงใหม่และเขียงรายเนื่องจากมีสภาพอากาศหนาวเย็นเหมาะสมแก่การเพาะปลูก โดยมีมูลนิธิโครงการหลวงเป็นหน่วยงานที่ให้การสนับสนุน พันธุ์พืชที่นิยมปลูกส่วนใหญ่จะมีทั้งพืชฝาด (Astringent) ซึ่งผลจะมีรสฝาด เพราะมีสารแทนนินชนิดละลายน้ำได้เป็นส่วนประกอบอยู่ ตัวอย่างพันธุ์พืชฝาดได้แก่ พันธุ์ชื้อโจ หรือ P2 พันธุ์ซาซิมิและพันธุ์โทเนวาเซ่ เป็นต้น และนอกจากนี้พืชอีกชนิดหนึ่งคือ พืชหวาน (Non-Astringent) ผลจะมีรสหวานไม่มีรสฝาด ตัวอย่างพันธุ์พืชหวานได้แก่พันธุ์ฟูยู พันธุ์จิคร พันธุ์ชิและพันธุ์เฮยะคุมะ เป็นต้น [3] พืชจะออกผลในช่วงระยะเวลาที่จำกัด คือ ช่วงเดือนกรกฎาคมถึงกันยายน [4] ซึ่งตรงกับช่วงฤดูฝนของประเทศไทย จึงประสบปัญหาการนำผลออกมาจากจำหน่าย เนื่องจากแหล่งเพาะปลูกพืชส่วนใหญ่จะอยู่ในแถบภูเขาสูงการคมนาคมจึงไม่สะดวก ส่งผลให้เกิดการเน่าเสียของผลผลิตพืชขึ้น ดังนั้นจึงมีการแปรรูปพืชเพื่อยืดระยะเวลาการเก็บรักษาให้ได้นานขึ้น

กรรมวิธีที่ได้รับความนิยมในการแปรรูปพืช ได้แก่ การทำพื้แห้งโดยใช้วิธีการแขวนตากตามแบบของประเทศญี่ปุ่นและจีน แต่วิธีการดังกล่าวนี้มีข้อเสียในการแปรรูป คือ การไม่สามารถควบคุมสภาพแวดล้อมขณะทำการตากแห้งพื้ได้ เช่น อุณหภูมิและปริมาณแสงแดดในแต่ละวัน จึงส่งผลให้คุณภาพพื้แห้งที่ได้ในการทำแต่ละครั้งจึงไม่คงที่ ทั้งส่วนของสีพื้พื้ ความนิ่มของเนื้อพื้เป็นต้น ดังนั้นจึงมีการเปลี่ยนวิธีการทำพื้แห้งโดยการหันมาใช้เครื่องอบแห้งแทน

การอบแห้งนั้นมีพารามิเตอร์ที่จำเป็นอย่างยิ่งได้แก่ ความชื้นสมดุล ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำออกจากพื้ ความร้อนจำเพาะ และความหนาแน่น ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์และจำลองกระบวนการอบแห้ง เพื่อนำข้อมูลที่ได้ออกมาหาสภาวะการอบแห้งตลอดจนถึงการออกแบบเครื่องอบแห้งซึ่งจะนำไปสู่การใช้พลังงานในการอบแห้งอย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

ความชื้นสมดุล (Equilibrium Moisture content, M_{eq}) คือ ความชื้นที่ทำให้ความดันไอน้ำในวัสดุเท่ากับ

ความดันไอน้ำในอากาศที่อยู่โดยรอบ วิธีการหาค่าความชื้นสมดุลที่ได้รับความนิยม คือ วิธีแบบสถิต (Static Method) เป็นการใส่สารละลายเกลืออิ่มตัวทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง [5] โดยงานวิจัยของ เทวรัตน์ และ สมยศ [6] ได้ทำการศึกษาการหาค่าสมการความชื้นสมดุลของพื้ ซึ่งมีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Zingiber cassumunar Roxb* โดยใช้วิธีการทางสถิต พบว่าที่อุณหภูมิในการอบแห้งเดียวกันค่าความชื้นสมดุลของพื้จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่มีค่าสูงขึ้น แต่ที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเดียวกันค่าความชื้นสมดุลของพื้จะมีค่าลดลงเมื่อค่าอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งสูงขึ้น จากนั้นได้สร้างแบบจำลองความชื้นสมดุลของพื้ตามรูปแบบของ Modified GAB ขึ้น โดยพบว่าแบบจำลองตามรูปแบบดังกล่าวสามารถทำนายค่าความชื้นสมดุลของพื้ได้ดี

ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำออกจากวัสดุ (Latent Heat of Vaporization for Material, h'_{fg}) คือ ค่าพลังงานความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำ 1 kg ในวัสดุ สามารถคำนวณได้จากแบบจำลองความชื้นสมดุลตามวิธีของ Othmer [7] โดยมีงานวิจัยของ Bolloris et.al. [8] ได้ทำการศึกษาค่าความร้อนแฝงของการระเหยน้ำออกจากข้าว โดยใช้วิธีการคำนวณดังกล่าวข้างต้น พบว่าข้าวที่มีค่าความชื้นต่ำจะมีค่าความร้อนแฝงของการระเหยน้ำออกจากข้าวสูงกว่าข้าวที่มีค่าความชื้นสูง

ความร้อนจำเพาะ คือ ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการทำให้วัสดุหนึ่งหน่วยมวลมีอุณหภูมิสูงขึ้น 1 °C ที่ความดันหรือปริมาตรคงที่ อุปกรณ์ที่นิยมใช้ในการหาค่าความร้อนจำเพาะ คือ แคลอรีมิเตอร์ที่ทำงานโดยใช้หลักการสมดุลพลังงานในการหาค่าความร้อนจำเพาะ โดยงานวิจัยของ ศักดิ์รินทร์ [9] ได้ทำการศึกษาค่าความร้อนจำเพาะของมะม่วงแช่อิ่มโดยใช้แคลอรีมิเตอร์พบว่าเมื่อค่าความชื้นของมะม่วงแช่อิ่มลดลง ค่าความร้อนจำเพาะจะลดลง

สำหรับความหนาแน่นจริง คือ อัตราส่วนมวลต่อปริมาตรของวัสดุ สำหรับวิธีการหาค่ามวลทำได้โดยการชั่ง

น้ำหนักและวิธีการหาปริมาตรทำได้โดยการแทนที่น้ำสำหรับงานวิจัยของ อรุณรัตน์ และวิชิตดา [10] ได้ทำการหาความหนาแน่นจริงของสับปะรดสดพบว่าเมื่อสับปะรดมีค่าความชื้นลดลงจะส่งผลให้ความหนาแน่นลดลงตามไปด้วย

จะเห็นได้ว่างานวิจัยที่เกี่ยวข้องตามที่กล่าวมาในข้างต้นได้ทำการศึกษาพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้ง เพื่อนำไปใช้เป็นข้อมูลในการจำลองสภาวะการอบแห้ง แต่ก็ยังไม่มียานวิจัยใดที่ศึกษาพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งพลับ ซึ่งเป็นผลไม้ที่มีความชื้นเริ่มต้นสูง 550-650% มาตรฐานแห้ง จึงทำให้ต้องใช้พลังงานในการอบแห้งที่สูงตามไปด้วย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งพลับเพื่อนำไปวิเคราะห์ จำลองสภาวะการอบแห้งและใช้ในการพัฒนาการอบแห้งพลับให้มีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

2.1 ความชื้นสมดุล

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองเพื่อหาค่าความชื้นสมดุลของพลับ โดยใช้วิธีการทางสถิติ ประกอบไปด้วยขวดโหลแก้วทนความร้อนสามารถปิดได้สนิทโดยมีแผ่นยางกันการรั่วซึม ภายในมีตะแกรงสำหรับวางตัวอย่างเครื่องอบแห้งที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ และสารละลายเกลืออิ่มตัว 6 ชนิด ได้แก่ ลิเทียมคลอไรด์ (LiCl), แมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), แมกนีเซียมไนเตรดเฮกซะไฮเดรต ($\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), โซเดียมคลอไรด์ (NaCl), โพแทสเซียมไนเตรด (KNO_3) และโพแทสเซียมซัลเฟต (K_2SO_4) สำหรับใช้ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในขวดโหล แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเหนือสารละลายเกลืออิ่มตัวชนิดต่างๆ ที่อุณหภูมิต่างๆ คัดแปลงจาก [11]

T (°C)	LiCl	$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	NaCl	KNO_3	K_2SO_4
45	0.116	0.319	0.484	0.751	0.863	0.959
55	0.114	0.313	0.457	0.745	0.830	0.955
65	0.112	0.306	0.431	0.737	0.793	0.951

ทำการทดลองโดยนำตัวอย่างพลับมาสไลด์ให้เป็นแผ่นบางๆ วางลงบนตะแกรงเหนือสารละลายเกลืออิ่มตัวที่บรรจุไว้ในขวดโหลแสดงดังรูปที่ 1 โดยสารละลายเกลืออิ่มตัวแต่ละชนิดจะถูกควบคุมอุณหภูมิให้เท่ากับ 45 °C, 55 °C และ 65 °C โดยใช้เครื่องอบแห้ง เพื่อควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเหนือสารละลายเกลืออิ่มตัว จากนั้นทำการชั่งน้ำหนักพลับในแต่ละขวดโหลทุกๆ 24 h จนกว่าน้ำหนักของพลับจะมีค่าคงที่ ซึ่งแสดงว่าถึงสภาวะสมดุลแล้ว จึงนำพลับดังกล่าวไปหาค่ามวลแห้ง โดยการอบที่อุณหภูมิ 103 °C เป็นเวลา 72 h จากนั้นนำค่าน้ำหนักพลับที่สภาวะสมดุลกับค่ามวลแห้งมาคำนวณหาความชื้น โดยความชื้นดังกล่าวจะถูกเรียกว่าความชื้นสมดุล โดยจะทำการทดลองซ้ำทั้งหมด 2 ครั้ง

จากงานวิจัยของ ไพโรจน์ และคณะ [12] ได้ระบุว่าพลับมีความจำเป็นที่จะต้องใช้ช่วงอุณหภูมิในการอบแห้งที่ค่อนข้างต่ำ เพื่อป้องกันผลกระทบด้านคุณภาพหลังการอบแห้ง ดังนั้นเพื่อให้สามารถนำข้อมูลผลการวิจัยไปใช้งานต่อไป งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ช่วงอุณหภูมิเท่ากับ 45 °C, 55 °C และ 65 °C ในการทำการทดลอง



รูปที่ 1 พลับที่บรรจุในขวดโหลเหนือสารละลายเกลืออิ่มตัว

เมื่อได้ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นสมมูลที่ความความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิต่างๆ นำข้อมูลดังกล่าวไปใช้ในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมมูลต่อไป โดยใช้รูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามตารางที่ 2 สำหรับการหาค่าคงที่ a, b และ c ของแต่ละรูปแบบทำได้โดยนำข้อมูลผลการทดลองมาทำการวิเคราะห์สมการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear regression)

ตารางที่ 2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมมูลที่ใช้ในการพัฒนา

	Model	Ref.
Henderson	$M_{eq} = \left(\frac{\ln(1 - \phi)}{-aT} \right)^{\frac{1}{b}}$	[13]
Modified Henderson	$M_{eq} = \left(\frac{-\ln(1 - \phi)}{a(T + b)} \right)^{\frac{1}{c}}$	[14]
Halsey	$M_{eq} = \left(\frac{-a}{T \ln(\phi)} \right)^{\frac{1}{b}}$	[15,16]
Oswin	$M_{eq} = a \left(\frac{\phi}{1 - \phi} \right)^b$	[17]
Modified Oswin	$M_{eq} = (a + bT) \left(\frac{\phi}{1 - \phi} \right)^b$	[18]

ϕ คือ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ, ทศนิยม

T คือ อุณหภูมิ, °C

a, b, c คือ ค่าคงที่

2.2 ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ

2.2.1 การหาค่าความร้อนแฝงของการระเหยน้ำออกจากผนัง

การคำนวณค่าความร้อนแฝงของการระเหยน้ำออกจากผนังตามวิธีของ Othmer [7] สามารถทำได้โดยนำแบบจำลองความชื้นสมมูลที่สามารถหาค่าการคำนวณได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุดมาใช้ในการคำนวณค่าความร้อนแฝงของการระเหยน้ำออกจากผนัง โดยกำหนดค่าความชื้นของผนังที่ต้องการหาค่าความร้อนแฝงหนึ่งค่าและค่าอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งหลายๆ อุณหภูมิแทนค่าลงในแบบจำลองความชื้นสมมูลเพื่อคำนวณหาค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (Relative humidity, ϕ)

ออกมาหลายๆค่า จากนั้นใช้ค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์ที่ใช้ในการอบแห้งโดยการคำนวณจากสมการที่ (1) ในการคำนวณค่าความดันไออิ่มตัว (Saturated vapor pressure, P_{vs}) ตามสมการที่ (2) ทำการแทนค่าความดันไออิ่มตัวกับค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศลงในสมการที่ (3) เพื่อหาค่าความดันไอ (Vapor pressure, P_v) ใช้สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันไอและค่าความดันไออิ่มตัวของ Othmer [7] ตามสมการที่ (4) หาค่าอัตราส่วนระหว่างค่าความร้อนแฝงของการระเหยน้ำออกจากผนังกับค่าความร้อนแฝงของการระเหยน้ำอิสระ ($\frac{h'_{fg}}{h_{fg}}$) และค่าคงที่ (q) โดยการวิเคราะห์สมการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear regression) จากนั้นนำค่าอัตราส่วนระหว่างค่าความร้อนแฝงของการระเหยน้ำออกจากผนังกับค่าความร้อนแฝงของการระเหยน้ำอิสระ ($\frac{h'_{fg}}{h_{fg}}$) ดังกล่าวมาใช้ในการคำนวณค่าความร้อนแฝงของการระเหยน้ำออกจากผนังโดยการคูณด้วยค่าความร้อนแฝงของการระเหยน้ำอิสระ (h_{fg}) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5)

$$T_{abs} = T + 273.15 \quad (1)$$

$$\ln(P_{vs}) = 52.576 - \frac{6796.5}{T_{abs}} - 5.028 \ln(T_{abs}) \quad (2)$$

$$\phi = \frac{P_v}{P_{vs}} \quad (3)$$

$$\ln(P_v) = \left(\frac{h'_{fg}}{h_{fg}} \right) \ln(P_{vs}) + q \quad (4)$$

$$h_{fg} = 2502 - 2.386T \quad (5)$$

เมื่อ T_{abs} คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์, K
 P_{vs} คือ ความดันไออิ่มตัว, kPa
 P_v คือ ความดันไอ, kPa
 h'_{fg} คือ ค่าความร้อนแฝงของการระเหยน้ำออกจากผนัง, kJ / kg_{water}
 h_{fg} คือ ค่าความร้อนแฝงของการระเหยน้ำอิสระ, kJ / kg_{water}

q คือ ค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ

2.2.2 การหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงของการระเหยน้ำออกจากพลับกับค่าความชื้น

สำหรับความร้อนแฝงของการระเหยน้ำออกจากพลับนั้น จะมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้น ดังนั้นจึงมีการพัฒนาแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงของการระเหยน้ำออกจากพลับกับค่าความชื้นของพลับขึ้นเพื่อให้สะดวกต่อการนำไปใช้งานมากขึ้น โดยทำการเปลี่ยนค่าความชื้นของพลับที่ใช้ในการในหัวข้อ 2.2.1 เป็นค่าความชื้นอื่นๆ อีกหลายๆ ค่า จากนั้นใช้ข้อมูลผลการคำนวณดังกล่าวสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงของการระเหยน้ำออกจากพลับกับค่าความชื้นของพลับตามรูปแบบสมการที่ (6) โดยหาค่าคงที่ a และ b จากการวิเคราะห์สมการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear regression)

$$h'_{fg} = h_{fg}(1 + a \exp(bM)) \quad (6)$$

เมื่อ M คือ ค่าความชื้นของพลับ, ทศนิยม
a, b คือ ค่าคงที่

2.3 ความร้อนจำเพาะ

การหาค่าความร้อนจำเพาะแบบวิธีของผสม โดยใช้แคลอรีมิเตอร์ ซึ่งทำด้วยทองแดง รูปที่ 2 ทำการทดลองโดยนำพลับไปอบแห้ง เพื่อเตรียมตัวอย่างพลับที่ความชื้นต่างๆ แบ่งพลับเป็นสองส่วน ส่วนหนึ่งนำไปหาค่าความชื้น อีกส่วนหนึ่งใช้หาค่าความร้อนจำเพาะโดยหั่นพลับให้เป็นชิ้นขนาดเล็กเพื่อช่วยในการถ่ายเทความร้อนให้ดีขึ้น ใส่พลับลงในแคลอรีมิเตอร์ที่บรรจุน้ำร้อนที่ทราบค่าอุณหภูมิ ซึ่งแคลอรีมิเตอร์จะถูกบรรจุอยู่ในฉนวนไม้เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนออกสู่สิ่งแวดล้อม หลังจากนั้นใช้แท่งกวนกวนจนเข้าสู่สมดุล อ่านค่าอุณหภูมิที่สมดุล และคำนวณหาค่าความร้อนจำเพาะของพลับโดยใช้หลักสมดุลพลังงานตามสมการที่ (7) จากนั้นนำข้อมูลผลการทดลองไปพัฒนาแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่าง

ค่าความร้อนจำเพาะและค่าความชื้นของพลับต่อไป โดยในการทดลองดังกล่าวได้ทำการทดลองซ้ำทั้งหมด 3 ครั้ง

$$[m_c c_c (T_e - T_c)] + [m_p c_p (T_e - T_p)] + [m_w c_w (T_e - T_w)] = 0 \quad (7)$$

โดยที่	m_c	คือ	มวลของแคลอรีมิเตอร์, kg
	m_p	คือ	มวลของตัวอย่างพลับ, kg
	m_w	คือ	มวลของน้ำตัวกลาง, kg
	c_c	คือ	ความร้อนจำเพาะของแคลอรีมิเตอร์ มีค่าเท่ากับ 0.38, kJ/kg·K
	c_p	คือ	ความร้อนจำเพาะของตัวอย่างพลับ, kJ/kg·K
	c_w	คือ	ความร้อนจำเพาะตัวกลางที่เป็นน้ำ มีค่าเท่ากับ 4.18, kJ/kg·K
	T_c	คือ	อุณหภูมิของแคลอรีมิเตอร์เริ่มต้น, °C
	T_p	คือ	อุณหภูมิของตัวอย่างพลับเริ่มต้น, °C
	T_w	คือ	อุณหภูมิของน้ำตัวกลางเริ่มต้น, °C
	T_e	คือ	อุณหภูมิที่สภาวะสมดุลของระบบ, °C



รูปที่ 2 แคลอรีมิเตอร์

2.4 ความหนาแน่น

การหาค่าความหนาแน่นจริง ทำการทดลองโดยเตรียมพลับที่ค่าความชื้นต่างๆ จากนั้นหาปริมาตรของพลับโดยใช้วิธีการแทนที่น้ำและหาค่ามวลโดยใช้เครื่องชั่ง

ที่มีความละเอียด ± 0.001 กรัม จากนั้นใช้สมการความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักต่อปริมาตรของวัสดุตามสมการที่ (8) เพื่อคำนวณหาความหนาแน่นของวัสดุตามความชื้นต่างๆ จากนั้นนำข้อมูลผลการทดลองไปพัฒนาแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นและค่าความชื้นของวัสดุต่อไป โดยในการทดลองดังกล่าวได้ทำการทดลองซ้ำทั้งหมด 3 ครั้ง

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (8)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของตัวอย่างวัสดุ, kg/m^3
 m คือ มวลของตัวอย่างวัสดุ, kg
 V คือ ปริมาตรของตัวอย่างวัสดุ, m^3

3. ผลการวิเคราะห์และวิจารณ์

ในส่วนการวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลองนั้นจะใช้หลักการทางด้านสถิติเพื่อแสดงความน่าเชื่อถือของผลการทดลอง ได้แก่ ค่าเฉลี่ยของพารามิเตอร์ตามผลการทดลอง (Mean, $\bar{y}$) และค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standard Error, SE) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (9) และ (10)

การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของพารามิเตอร์สำหรับการอบแห้งวัสดุใช้วิธีการวิเคราะห์สมการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non-Linear Regression) และแบบเชิงเส้น (Linear Regression) ในการหาค่าคงที่ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่างๆ และใช้หลักการทางสถิติในการเปรียบเทียบความแม่นยำของแต่ละแบบจำลอง ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2) ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error, RMSE) และค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Percentage Error, MAPE) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (11), (12) และ (13) ดังต่อไปนี้

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i)}{n} \quad (9)$$

$$SE = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}}}{\sqrt{n}} \quad (10)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{y} - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\bar{y} - \hat{y}_i)^2} \quad (11)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (12)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{\hat{y}_i - y_i}{\hat{y}_i} \right| \times 100 \quad (13)$$

เมื่อ $\bar{y}$ คือ ค่าเฉลี่ยของพารามิเตอร์ตามผลการทดลอง
 y_i คือ ค่าพารามิเตอร์ตามผลการทดลอง
 $\hat{y}_i$ คือ ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
 n คือ จำนวนข้อมูล

3.1 ความชื้นสมดุล

จากการทดลองหาค่าความชื้นสมดุลของวัสดุได้ข้อมูลผลการทดลองดังตารางที่ 3 พบว่าเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศมีค่าสูงขึ้นค่าความชื้นสมดุลจะมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย โดยลักษณะการเพิ่มขึ้นของค่าความชื้นสมดุลในช่วงค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศต่ำๆ จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นทีละเล็กละน้อย ค่าความชื้นสมดุลของวัสดุในช่วงนี้จึงมีค่าที่ต่างกันไม่มาก แต่ที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศสูงๆ การเพิ่มขึ้นของค่าความชื้นสมดุลจะเพิ่มมากขึ้น และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จะส่งผลให้ค่าความชื้นสมดุลลดลง

จากข้อมูลผลการทดลองในตารางที่ 3 สามารถทำการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุลได้โดยนำข้อมูลผลดังกล่าวมาวิเคราะห์ด้วยวิธีการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น เพื่อหาค่าคงที่ของแต่ละรูปแบบซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 2 และวิเคราะห์ความแม่นยำของแต่ละรูปแบบที่ทำการพัฒนาขึ้นด้วยหลักการทางด้านสถิติ โดยสามารถ

แสดงผลการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุลและผลการวิเคราะห์ทางด้านสถิติดังตารางที่ 4

ตารางที่ 3 ข้อมูลผลการทดลองความชื้นสมดุลของพลับที่อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศต่างๆ

T (°C)	ϕ	1	2	$\bar{M}_{eq} \pm SE$
45	0.116	0.099	0.110	0.104 ± 0.00
	0.319	0.128	0.127	0.128 ± 0.00
	0.484	0.234	0.227	0.230 ± 0.00
	0.751	0.387	0.378	0.383 ± 0.00
	0.863	0.507	0.520	0.513 ± 0.01
	0.959	1.326	NA	1.326 ± 0.00
55	0.114	0.090	0.096	0.093 ± 0.00
	0.313	NA	0.103	0.103 ± 0.00
	0.457	0.209	0.232	0.220 ± 0.10
	0.745	0.363	0.374	0.368 ± 0.01
	0.830	0.495	0.485	0.490 ± 0.05
	0.955	1.002	0.994	0.998 ± 0.00
65	0.112	0.059	0.050	0.054 ± 0.00
	0.306	0.104	0.119	0.111 ± 0.01
	0.431	0.172	0.196	0.184 ± 0.01
	0.737	0.348	0.358	0.353 ± 0.01
	0.793	0.464	0.466	0.465 ± 0.00
	0.951	0.704	0.692	0.698 ± 0.01

ตารางที่ 4 ค่าคงที่ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์รูปแบบต่างๆของความชื้นสมดุล

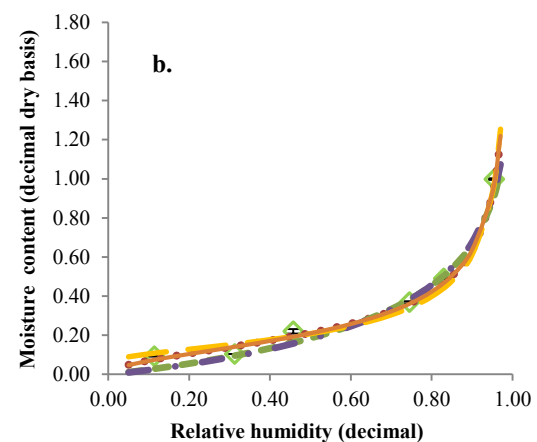
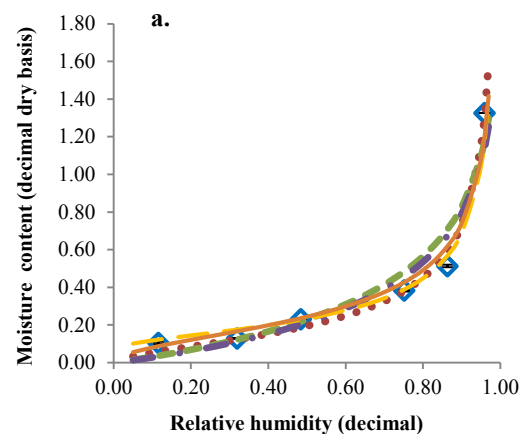
Model	Constant	R ²	RMSE	MAPE
Henderson	a 0.061044	0.947	0.076	24.484
	b 0.935314			
Modified Henderson	a 0.043187	0.937	0.073	25.039
	b 21.044940			
	c 0.912696			
Halsey	a 2.483391	0.945	0.062	18.649
	b 1.736398			
Oswin	a $0.001645T+0.121642$	0.990	0.040	18.474
	b $-0.010387T+1.069577$			
Modified Oswin	a 0.395577	0.991	0.056	13.962
	b -0.03379			
	c 1.974396			

จากตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ความแม่นยำของแต่ละรูปแบบโดยใช้หลักการทางด้านสถิติพบว่ารูปแบบของ Modified Oswin ให้ค่า R² สูงที่สุดเท่ากับ 0.991 และค่า MAPE ต่ำที่สุดเท่ากับ 13.962 ส่วนรูปแบบที่ให้ค่า RMSE ต่ำที่สุด คือ รูปแบบของ Oswin โดยมีค่าเท่ากับ 0.040

ทำการเปรียบเทียบแบบจำลองความชื้นสมดุลที่ทำการพัฒนาขึ้นแต่ละรูปแบบกับข้อมูลผลการทดลองดังรูปที่ 3 พบว่ารูปแบบของ Modified Oswin ที่ทำการพัฒนาขึ้นแสดงดังสมการที่ (14) สามารถทำนายค่าความชื้นสมดุลได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ทางด้านสถิติในส่วน of ค่า R² และค่า MAPE

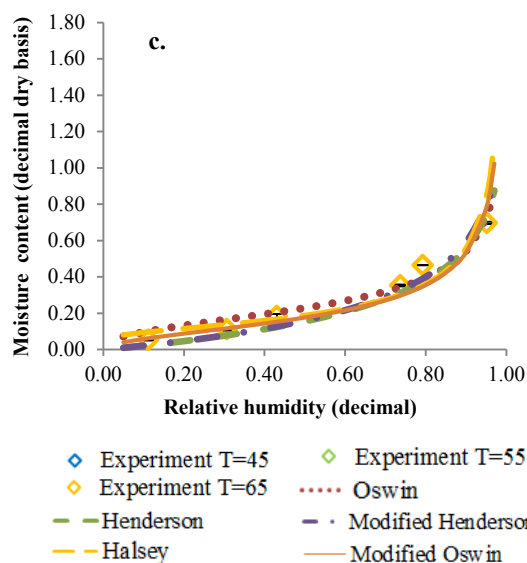
$$M_{eq} = (0.395577 - 0.003379T) \left(\frac{\phi}{1-\phi} \right)^{\frac{1}{1.974396}} \quad (14)$$

สำหรับการเปรียบเทียบผลการทำนายค่าความชื้นสมดุลของพลับเฉพาะรูปแบบของ Modified Oswin ที่ทำการพัฒนาขึ้นแสดงดังสมการที่ (14) ที่อุณหภูมิ 45-65 °C กับข้อมูลผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4 พบว่าแบบจำลองรูปแบบของ Modified Oswin ที่พัฒนาขึ้นดังกล่าวสามารถใช้งานได้ดีในทุกค่าอุณหภูมิ



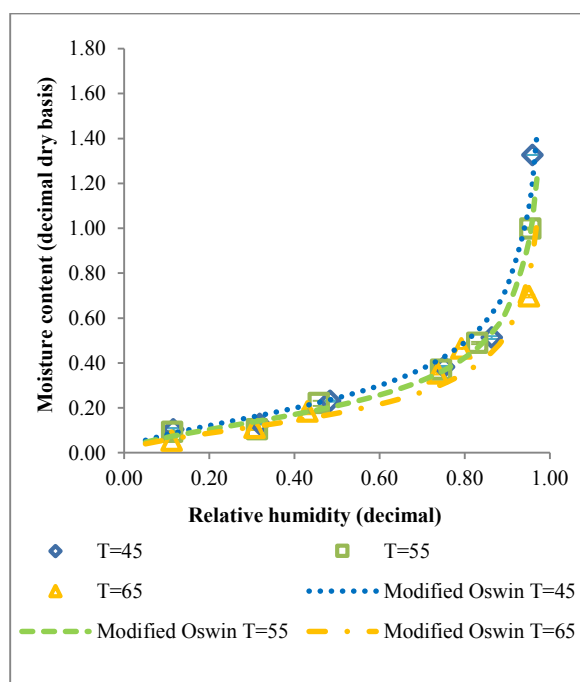
รูปที่ 3 เปรียบเทียบแบบจำลองความชื้นสมดุลที่ทำการพัฒนาขึ้นแต่ละรูปแบบที่แต่ละอุณหภูมิ

a. 45 °C b. 55 °C c. 65 °C



รูปที่ 3 เปรียบเทียบแบบจำลองความชื้นสมดุลที่ทำการพัฒนาขึ้นแต่ละรูปแบบที่แต่ละอุณหภูมิ (ต่อ)

a. 45 °C b. 55 °C c. 65 °C



รูปที่ 4 การเปรียบเทียบข้อมูลการทดลองความชื้นสมดุลของปลั๊กกับการทำนายค่าโดยใช้รูปแบบของ Modified Oswin

3.2 ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ

จากการนำแบบจำลองความชื้นสมดุลตามรูปแบบของ Modified Oswin ที่ทำการพัฒนาขึ้นแสดงดังสมการที่ (14) มาทำการคำนวณหาความร้อนแฝงของการระเหยน้ำออกจากปลั๊กที่อุณหภูมิอบแห้งและที่ปลั๊กความชื้นต่างๆ ตามวิธีของ Othmer [7] โดยผลการคำนวณแสดงดังตารางที่ 5 พบว่าเมื่อความชื้นของปลั๊กต่ำลงจะต้องใช้พลังงานความร้อนของการระเหยน้ำออกจากปลั๊กสูงขึ้น เนื่องจากปลั๊กที่มีค่าความชื้นต่ำปริมาณน้ำที่มีอยู่ในเนื้อปลั๊กจะต่ำส่งผลให้มีการเคลื่อนที่ของน้ำในเนื้อปลั๊กออกมาได้ยากกว่าปลั๊กที่มีความชื้นสูง ค่าความร้อนแฝงของการระเหยน้ำออกจากปลั๊กจึงมีค่าสูง และการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจะมีค่าความร้อนแฝงของการระเหยน้ำออกจากปลั๊กต่ำกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ

ตารางที่ 5 ผลการคำนวณค่าความร้อนแฝงของการระเหยน้ำออกจากปลั๊กจากแบบจำลองความชื้นสมดุล

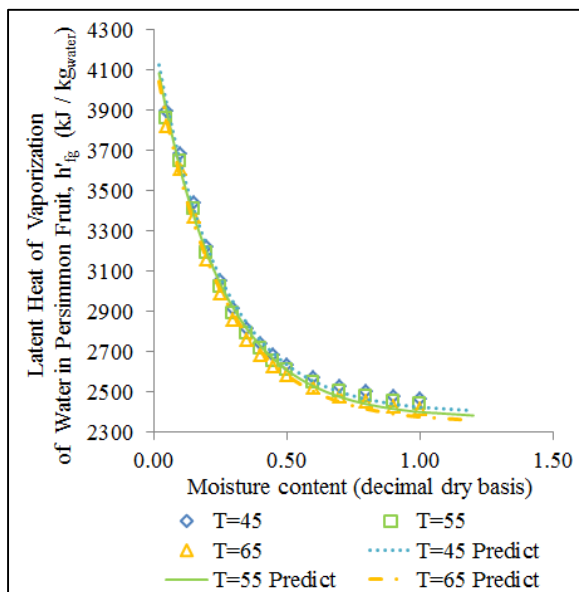
M	$\frac{h'_{fg}}{h_{fg}}$	h'_{fg} (kJ/kg _{water})		
		T = 45 (°C)	T = 55 (°C)	T = 65 (°C)
0.05	1.628	3898.43	3859.58	3820.74
0.10	1.538	3683.86	3647.16	3610.45
0.15	1.436	3439.77	3405.50	3371.22
0.20	1.346	3222.99	3190.88	3158.76
0.25	1.274	3049.86	3019.48	2989.09
0.30	1.218	2917.27	2888.21	2859.14
0.35	1.176	2816.84	2788.77	2760.71
0.40	1.144	2740.49	2713.18	2685.87
0.45	1.120	2681.83	2655.11	2628.39
0.50	1.101	2636.19	2609.92	2583.66
0.60	1.074	2571.40	2545.77	2520.15
0.70	1.056	2528.99	2503.79	2478.59
0.80	1.044	2499.95	2475.04	2450.13
0.90	1.035	2479.28	2454.57	2429.87
1.00	1.029	2464.09	2439.53	2414.98
2.00	1.008	2412.91	2388.87	2364.83

สำหรับการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความร้อนแฝงการระเหยน้ำออกจากปลั๊ก โดยใช้การวิเคราะห์สมการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความร้อนแฝงการระเหยน้ำออกจากปลั๊ก

ที่มีความสัมพันธ์กับค่าความชื้นตามรูปแบบสมการที่ (6) ได้ตามสมการที่ (15) ดังต่อไปนี้

$$h'_{fg} = h_{fg} [1 + 0.785194 \exp(-4.100157M)] \quad (15)$$

แบบจำลองความร้อนแฝงการระเหยนํ้าออกจากผลไม้มาก่อนที่พัฒนาขึ้นดังสมการที่ (15) สามารถทำนายค่าความร้อนแฝงของการระเหยนํ้าออกจากผลไม้มาก่อนที่ความชื้นต่างๆ ได้ใกล้เคียงกับข้อมูลการคำนวณในตารางที่ 5 โดยสามารถแสดงการเปรียบเทียบได้ดังรูปที่ 5 พบว่าแบบจำลองความร้อนแฝงของการระเหยนํ้าออกจากผลไม้มาก่อนที่ทำการพัฒนาขึ้นสามารถให้ค่า $R^2 = 0.970$, $RMSE = 25.899$ และ $MAPE = 0.821$ โดยแบบจำลองดังกล่าวสามารถใช้งานได้ดีในช่วงค่าความชื้นผลไม้มาก่อนที่ 0.05 – 2.00 dry basis



รูปที่ 5 เปรียบเทียบผลการทำนายค่าความร้อนแฝงของการระเหยนํ้าออกจากผลไม้มาก่อนที่กับข้อมูลผลการคำนวณโดยใช้แบบจำลองความชื้นสมดุล

3.3 ความร้อนจำเพาะ

การทดลองหาความร้อนจำเพาะของผลไม้มาก่อนที่ความชื้นต่างๆ โดยใช้วิธีของผสม ซึ่งใช้หลักการสมดุลพลังงานในการคำนวณ แสดงข้อมูลผลการทดลองดังตารางที่ 6 พบว่า

เมื่อความชื้นของผลไม้มาก่อนที่ลดลงส่งผลให้ค่าความร้อนจำเพาะมีค่าลดลงตามไปด้วย เนื่องจากผลไม้มาก่อนที่มีนํ้าเป็นองค์ประกอบสูง ในช่วงความชื้นสูงๆ ปริมาณนํ้าในผลไม้มาก่อนที่มีอยู่มาก ผลไม้มาก่อนจึงมีค่าความร้อนจำเพาะที่สูงใกล้เคียงกับค่าความร้อนจำเพาะของนํ้า แต่เมื่อความชื้นลดลงปริมาณนํ้าในผลไม้มาก่อนมีน้อยลงค่าความร้อนจำเพาะของผลไม้มาก่อนจึงมีค่าลดลง

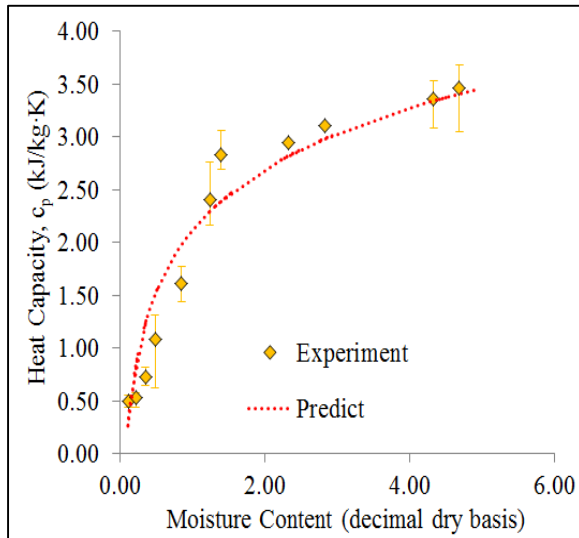
ตารางที่ 6 ข้อมูลผลการทดลองความร้อนจำเพาะ

M	$\bar{M} \pm SE$	c_p (kJ/kg K)	$\bar{c}_p \pm SE$ (kJ/kg K)	M	$\bar{M} \pm SE$	c_p (kJ/kg K)	$\bar{c}_p \pm SE$ (kJ/kg K)
4.88		3.66		0.96		1.78	
4.67	4.68 ± 0.11	3.05	3.46 ± 0.21	0.83	0.85 ± 0.06	1.63	1.62 ± 0.10
4.50		3.68		0.75		1.44	
4.39		3.54		0.50		0.62	
4.51	4.33 ± 0.13	3.45	3.36 ± 0.14	0.53	0.48 ± 0.03	1.31	1.08 ± 0.23
4.08		3.09		0.42		1.31	
2.74		3.12		0.36		0.82	
2.93	2.83 ± 0.10	3.09	3.11 ± 0.02	0.33	0.35 ± 0.01	0.65	0.73 ± 0.05
NA		NA		0.36		0.72	
2.21		2.96		0.25		0.57	
2.51	2.32 ± 0.09	2.94	2.94 ± 0.01	0.21	0.22 ± 0.02	0.44	0.53 ± 0.05
2.25		2.93		0.19		0.58	
1.35		2.75		0.15		0.49	
1.29	1.40 ± 0.08	2.69	2.84 ± 0.11	0.11	0.12 ± 0.01	0.55	0.50 ± 0.03
1.56		3.06		0.11		0.44	
1.29		2.76					
1.20	1.24 ± 0.03	2.16	2.40 ± 0.18				
1.23		2.29					

จากข้อมูลผลการทดลองดังตารางที่ 6 สามารถนำมาพัฒนาแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนจำเพาะกับความชื้นของผลไม้มาก่อนที่ โดยใช้วิธีวิเคราะห์สมการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นได้ดังสมการที่ (16)

$$c_p = 0.837276 \ln(M) + 2.114951 \quad (16)$$

จากแบบจำลองความร้อนจำเพาะของผลไม้มาก่อนที่ทำการพัฒนาขึ้นได้ดังสมการที่ (16) สามารถทำนายค่าความร้อนจำเพาะของผลไม้มาก่อนที่ความชื้นต่างๆ เปรียบเทียบกับข้อมูลผลการทดลองได้ดังรูปที่ 6 พบว่าแบบจำลองความร้อนจำเพาะของผลไม้มาก่อนที่ทำการพัฒนาขึ้นสามารถทำนายค่าได้ใกล้เคียงกับข้อมูลจากผลการทดลอง โดยมีค่า $R^2 = 0.893$, $RMSE = 0.378$ และ $MAPE = 31.948$ ซึ่งสามารถใช้งานได้ดีในช่วงค่าความชื้นผลไม้มาก่อนที่ 0.11-4.88 dry basis



รูปที่ 6 เปรียบเทียบค่าความร้อนจำเพาะที่ได้จากการทำนายโดยใช้แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นกับข้อมูลผลการทดลองที่แต่ละค่าความชื้น

3.4 ความหนาแน่น

การทดลองหาค่าความหนาแน่นจริงของพลับที่ค่าความชื้นต่างๆ แสดงข้อมูลผลการทดลองดังตารางที่ 7 พบว่าความหนาแน่นของพลับจะมีค่าลดลงเมื่อค่าความชื้นของพลับลดลง เนื่องจากเหตุผลเดียวกันกับค่าความร้อนจำเพาะในหัวข้อที่ 3.3 คือ พลับที่มีค่าความชื้นสูงๆ ปริมาณน้ำในพลับมีอยู่จำนวนมาก พลับจึงมีค่าความหนาแน่นใกล้เคียงกับความหนาแน่นของน้ำ แต่เมื่อความชื้นลดลง ปริมาณน้ำในพลับมีน้อยลงค่าความหนาแน่นพลับจึงลดลง

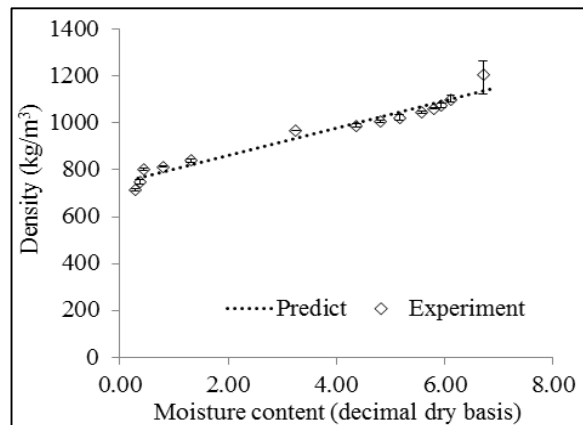
จากข้อมูลผลการทดลองดังตารางที่ 7 สามารถนำมาพัฒนาแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกับความชื้นของพลับ โดยใช้วิธีวิเคราะห์สมการถดถอยแบบเป็นเชิงเส้นได้ดังสมการที่ (17) ดังต่อไปนี้

$$\rho = 744.6833 + 58.3500M \quad (17)$$

ตารางที่ 7 ข้อมูลผลการทดลองความหนาแน่น

M	$\bar{M} \pm SE$	ρ (kg/m ³)	$\bar{\rho} \pm SE$ (kg/m ³)	M	$\bar{M} \pm SE$	ρ (kg/m ³)	$\bar{\rho} \pm SE$ (kg/m ³)
6.83		1223.81		4.46		996.21	
6.72	6.71 ± 0.08	1264.46	1203.95 ± 41.87	4.45	4.37 ± 0.09	990.56	988.72 ± 4.94
6.57		1123.57		4.20		979.41	
6.17		1116.83		3.36		969.07	
6.09	6.11 ± 0.03	1091.18	1099.10 ± 8.57	3.23	3.25 ± 0.06	966.90	967.00 ± 1.16
6.08		1091.08		3.17		965.04	
6.00		1085.01		1.40		847.66	
5.92	5.94 ± 0.03	1070.86	1073.28 ± 6.19	1.27	1.31 ± 0.05	845.85	841.27 ± 5.51
5.89		1063.97		1.26		830.31	
5.85		1066.45		0.85		815.69	
5.81	5.80 ± 0.03	1060.00	1061.21 ± 2.74	0.78	0.80 ± 0.02	811.98	812.75 ± 1.52
5.74		1057.19		0.78		810.58	
5.60		1048.38		0.46		806.20	
5.56	5.58 ± 0.02	1039.74	1044.06 ± 4.32	0.43	0.44 ± 0.01	804.09	803.23 ± 2.01
NA		NA		0.42		799.39	
5.26		1036.30		0.39		758.36	
5.14	5.16 ± 0.05	1016.90	1021.93 ± 7.29	0.36	0.37 ± 0.01	755.68	750.88 ± 6.19
5.08		1012.59		0.35		738.60	
4.88		1010.59		0.30		721.39	
4.78	4.18 ± 0.03	1004.18	1005.93 ± 2.35	0.27	0.28 ± 0.01	712.44	714.67 ± 3.42
4.78		1003.04		0.27		710.18	

จากแบบจำลองความหนาแน่นของพลับที่ทำการพัฒนาขึ้นดังสมการที่ (17) สามารถทำนายค่าความหนาแน่นเทียบกับข้อมูลผลการทดลองได้ดังรูปที่ 7 พบว่าแบบจำลองความหนาแน่นที่ทำการพัฒนาขึ้นสามารถทำนายค่าได้ใกล้เคียงกับข้อมูลจากผลการทดลอง โดยมีค่า $R^2 = 0.795$, $RMSE = 33.822$ และ $MAPE = 2.808$ ซึ่งสามารถใช้งานได้ดีในช่วงค่าความชื้นพลับเท่ากับ 0.27-6.83 dry basis



รูปที่ 7 เปรียบเทียบค่าความหนาแน่นที่ได้จากการทำนายโดยใช้แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นกับข้อมูลผลการทดลองที่แต่ละค่าความชื้น

4. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาพารามิเตอร์ที่จำเป็นสำหรับการอบแห้งพลับ พบว่าค่าความชื้นสมดุลจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเพิ่มขึ้น แต่จะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุลในรูปแบบของ Modified Oswin สามารถทำนายค่าได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด ส่วนพารามิเตอร์อื่นๆ ได้แก่ ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำออกจากพลับ ความร้อนจำเพาะ และความหนาแน่นจะเป็นพารามิเตอร์ที่มีความสัมพันธ์ขึ้นอยู่กับค่าความชื้นของพลับ โดยความ

ร้อนแฝงของการระเหยน้ำออกจากพลับจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความชื้นของพลับและอุณหภูมิในการอบแห้งต่ำลง ส่วนความร้อนจำเพาะและความหนาแน่นของพลับจะมีค่าลดลงเมื่อค่าความชื้นของพลับลดลง

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัยและภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ได้สนับสนุนทุนวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Frynn. ลูกพลับ สรรพคุณและประโยชน์ของลูกพลับ 34 ข้อ. [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา : <http://frynn.com>, 2557.
- [2] พนม เกิดแสง. การพัฒนาคุณภาพพลับพันธุ์ไฮยาคัมเพื่อการจำหน่ายแบบพลับหวาน. สำนักส่งเสริมและฝึกอบรม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา : <http://www.eto.ku.ac.th>, 2558.
- [3] บริษัท นวกิจบ้านเมือง จำกัด. ปลุกพลับสร้างรายได้แทนฝืนศูนย์พัฒนาโครงการหลวงแม่แฮสร้างอาชีพเสริมรายได้ให้กับครอบครัว. [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: <http://www.banmuang.co.th>, 2557.
- [4] สถานีวิทยุคอยขุข. โครงการพลับเพื่อคุณ. [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา : <http://doipui.aerdi.ku.ac.th>, 2557.
- [5] Brooker, D.B., F.W. Bakker-Arkeman and C.W. Hall. Drying Cereal Grains. The AVI Publ. Co. Inc. Westport. Connecticut. USA., 1981; 265.
- [6] เทวรัตน์ ทิพย์วิมล และ สมยศ เชิญอักษร. ความชื้นสมดุลและจลศาสตร์การอบแห้งพลับ. การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยครั้งที่ 10, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา, 2552.
- [7] Othmer, D.F. Correlation vapor pressure and latent heat data. *Ind. Eng. Chem.*, 1940; 32: 841-846.
- [8] Billis, M.A., Siebenmorgen, T. J. and Mauromoustakos, A. Estimating the theoretical energy required to dry rice. *Journal of Food Engineering*, 2011; 107: 253-261.
- [9] ศักดิ์รินทร์ รัสศรี. การอบแห้งมะม่วงแช่อิ่มโดยใช้ปั๊มความร้อน. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2541.
- [10] อรุณรัตน์ เว้นบาป และวิมลดา อุ๋นสะอาด. การศึกษาพารามิเตอร์สำหรับวิเคราะห์การอบแห้งสับประรด. *วารสารรำไพพรรณี*, 2553; 4(3): 64-70.
- [11] สมชาติ โสภณธนฤทธิ์. การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2540.
- [12] ไพโรจน์ วิริยจริ, ธรา ศรีสกุล และ สุจินดา ศรีวัฒนะ. ระยะเวลาในการทำแห้งที่เหมาะสมสำหรับการผลิตพลับกึ่งแห้ง. *วารสารเกษตร*, 2539; 12(2): 175-186.
- [13] Henderson, S.M. A basic concept of equilibrium. *Agri. Eng.*, 1952; 33: 29-31.
- [14] Pfost, H.B., S.G. Maurer, D.S. Chung and G.A. Milliken. Summarizing and reporting equilibrium moisture data for grains. *ASAE paper*, no. 76-3520, St. Joseph, Mich, 1976.

- [15] Halsey, G. Physical adsorption on non-uniform surfaces. *J. chem. Phy.*, 1948; 16: 931.
- [16] Halsey, G. The role of surface heterogeneity in adsorption. *Adv. In Catalysis*, 1952; 4: 211.
- [17] Oswin, G.R. The kinetics of package life. Lll., The isotherm. *J. Chem. Ind. (London)*, 1946; 64: 419.
- [18] Chia-Chung, C. Modification of Oswin EMC/ERH equation. *J. Agri. Res. China*, 1990; 39(4): 367-376.