

การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชิ้นซิงด้วยเครื่องอบแห้งสุญญากาศร่วมกับ
อินฟราเรด

Development of Mathematical Modeling for Ginger Slices Drying Kinetic
Using Infrared-Vacuum Dryer

กิตติศักดิ์ วิธินันทกิตต์^{1,*} ดวงสิริ สยมภาค² ณรงค์ อึ้งกิมบัว³ ภาณุพงศ์ บุญเพียร³ และ วีระพันธุ์ มานันตพงศ์¹
Kittisak Witinantakit^{1,*} Dhongsiri Sayompark² Narong Uengkimbuan³ Panupong Boonpain³ and
Weeraphan Manantaphong¹

¹ สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก ชลบุรี 20110

² สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอาหาร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก ชลบุรี 20110

³ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ชลบุรี 20131

¹Energy Technology, School of Engineering and Innovation, Rajamangala University of Technology
Tawan-ok, Choburi 20110

²Food Science and Technology, Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of
Technology Tawan-ok, Choburi 20110

³Department of Physics, Faculty of Science, Burapha University, Choburi 20131

* Corresponding author, e-mail: k_yong28@hotmail.com, Tel.: 086-386-1885

Received: 27 August 2021, Revised: 15 September 2021, Accepted: 20 September 2021, Published online: 25 December 2021

Abstract

The objective of this research was to develop mathematical modeling for ginger slices drying using infrared-vacuum dryer. Furthermore, drying kinetic, specific energy consumption, color and water activity were studied and the modeling was executed by empirical equations. The experiment was carried out by drying temperature of 50, 60 and 70°C with absolute pressure of 10 kPa consisting of 2 conditions of constant vacuum pressure and pulsed vacuum pressure with time ratio of vacuum pressure versus atmospheric pressure time at 15:2. The result shown that drying rate increased when drying by pulsed vacuum drying and increasing the drying temperature, whereas drying time and specific energy consumption decreased. The quality analysis of dried ginger slices at 70°C revealed the lowest of lightness, redness and yellowness. Moreover, ginger slices dried by pulsed vacuum drying had no statistical difference in the color of samples. In addition, the values of water activity of dried ginger slices were within standard at about 0.405-0.537. Finally, Mildilli's equation was suitable for predicting the

drying kinetics of ginger slices with the highest coefficient of determination (R^2) at 0.99947 whereas the lowest root means square error (RMSE) and sum of squared error (SSE) were 0.00722 and 0.00059, respectively.

Keywords: Ginger, Drying kinetic, Mathematical modeling, Pulsed vacuum, Specific energy consumption

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองอบแห้งชิ้นซิงด้วยเครื่องอบแห้งสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะสี ปริมาณน้ำอิสระ และพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัลเพื่อนำมาทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้ง โดยทดลองอบแห้งชิ้นซิงที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70°C และความดันสัมบูรณ์ 10 kPa ที่ 2 เงื่อนไข คือ ความดันสุญญากาศคงที่และความดันสุญญากาศแบบพัลส์ที่อัตราส่วนระหว่างช่วงเวลาความดันสุญญากาศต่อความดันบรรยากาศ 15:2 จากผลการทดลองพบว่า เมื่ออบแห้งชิ้นซิงด้วยความดันสุญญากาศแบบพัลส์หรือเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งส่งผลให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น ในขณะที่เวลาอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลง ด้านคุณภาพของชิ้นซิงหลังอบแห้งพบว่า ที่อุณหภูมิอบแห้ง 70°C มีแนวโน้มให้ค่าความสว่าง ค่าสีแดง และค่าสีเหลืองของชิ้นซิงต่ำที่สุด และการอบแห้งชิ้นซิงด้วยความดันสุญญากาศแบบพัลส์อุณหภูมิอบแห้งไม่มีผลต่อความแตกต่างของสีโดยรวมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนค่าปริมาณน้ำอิสระของชิ้นซิงทุกการทดลองอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0.405-0.537 นอกจากนี้สมการอบแห้งเอมพิริคัลของ Midilli สามารถทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งชิ้นซิงได้สอดคล้องกับผลการทดลองมากที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงสุดเท่ากับ 0.99947 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยและผลรวมกำลังสองความคลาดเคลื่อนต่ำที่สุดเท่ากับ 0.00722 และ 0.00059 ตามลำดับ

คำสำคัญ: ซิง จลนพลศาสตร์ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สุญญากาศแบบพัลส์ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

บทนำ

ซิง (Ginger) ชื่อวิทยาศาสตร์ *Zingiber officinale* Rosco เป็นพืชล้มลุก ส่วนที่ใช้รับประทานคือ เหง้าใต้ดิน สีน้ำตาลแกมเหลือง เนื้อในสีเหลืองหรือเหลืองอ่อน เหง้าแก่มีกลิ่นหอม รสเผ็ดร้อน ซิงเป็นทั้งเครื่องเทศและสมุนไพรไทย มีสรรพคุณช่วยขับเสมหะ ลดอาการจุกเสียด ท้องอืดเพื่อ ขับลม และช่วยเจริญอาหาร นิยมรับประทานสดหรือแปรรูปเป็นซิงผง ซิงแผ่น และซิงดอง เป็นต้น เพื่อให้ง่ายต่อการเก็บรักษาและใช้ประโยชน์ กระบวนการแปรรูปที่เหมาะสมวิธีการหนึ่งคือ การอบแห้ง โดยซิงที่ผ่านกระบวนการอบแห้งที่ดียังคงมีสีและคุณค่าทางโภชนาการใกล้เคียงกับซิงสด และเป็นการยืดอายุการเก็บรักษาซิงให้นานขึ้น เนื่องจากการอบแห้งเป็นการลดความชื้นของผลิตภัณฑ์และปริมาณน้ำอิสระอยู่ในเกณฑ์ที่จุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญได้ทำให้ผลิตภัณฑ์ไม่เน่าเสีย [1] ซิงแห้งนอกจากใช้ขงต้มเป็นชาสมุนไพรแล้ว ยังใช้เป็นส่วนประกอบในตำรับยาจากตำราการแพทย์แผนไทยและตำรับยาสามัญประจำบ้านแผนโบราณอีกด้วย [2] ดังนั้นการอบแห้งซิงจึงเป็นวิธีการพัฒนาผลิตภัณฑ์และสร้างมูลค่าเพิ่มให้สินค้าทางการเกษตร

การอบแห้งเป็นกระบวนการแปรรูปที่สำคัญ ซึ่งต้องคำนึงถึงลักษณะของวัสดุที่อบแห้ง เครื่องอบแห้งและวิธีการอบแห้งที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพตามที่ต้องการ ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยและสิ้นเปลืองพลังงานต่ำ ซึ่งเป็นการเพิ่มอัตราการผลิตและลดต้นทุนการอบแห้ง การอบแห้งแบบสุญญากาศ (Vacuum Drying) เป็นการลดความดันในห้องอบแห้งให้ต่ำกว่าความดันบรรยากาศส่งผลต่อจุดเดือดของน้ำซึ่งจะเดือดที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100°C ทำให้น้ำภายในวัสดุสามารถระเหยกลายเป็นไอได้ที่อุณหภูมิต่ำ [3] จากการศึกษาการอบแห้งซิงที่ความดันสัมบูรณ์คงที่ พบว่า การอบแห้ง

ที่ความดันสัมบูรณ์ต่ำจะใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่าที่ความดันสัมบูรณ์สูง [4] ซึ่งการเพิ่มอัตราการอบแห้งด้วยวิธีการลดความดันสัมบูรณ์ ยังมีอีกวิธีการหนึ่งคือ การอบแห้งด้วยสุญญากาศแบบพัลส์ (Pulsed Vacuum Drying) หรือการอบแห้งตามช่วงเวลาที่เป็นความดันสุญญากาศสลับกับช่วงเวลาที่เป็นความดันบรรยากาศ [5-8] จะส่งผลให้ช่องว่างภายในวัสดุเกิดการขยายตัว น้ำภายในวัสดุแพร่ออกไปที่ผิวได้ง่ายขึ้น [6, 8] จากเทคนิคดังกล่าวเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์คงที่โดยการอบแห้งดอกบัว [8] และการอบแห้งขึ้นซิง [9] พบว่า การอบแห้งด้วยสุญญากาศแบบพัลส์จะช่วยเพิ่มอัตราการอบแห้ง ลดเวลาและการใช้พลังงานในการอบแห้งได้ นอกจากนี้การเพิ่มอัตราการอบแห้งโดยใช้แหล่งความร้อนจากรังสีอินฟราเรดร่วมกับสุญญากาศ เมื่อวัสดุได้รับรังสีอินฟราเรดจะทำให้โมเลกุลของน้ำภายในวัสดุสั่นและเกิดความร้อน น้ำจะแพร่ออกมาสู่ผิวของวัสดุได้เร็วขึ้นอันจะส่งผลให้ใช้เวลาในการอบแห้งสั้นลง และมีสีใกล้เคียงกับวัสดุก่อนอบแห้ง [4]

การอธิบายกระบวนการอบแห้งโดยการทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เอมพิริคัลเป็นการทำนายการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของวัสดุอบแห้ง ซึ่งเป็นแบบจำลองที่นิยมใช้ในการทำนายการถ่ายเทมวลของวัสดุทางการเกษตรที่มีรูปแบบของสมการที่ไม่ซับซ้อน โดยใช้วิธีการปรับเส้นโค้งให้ผลการทำนายความชื้นสอดคล้องกับข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความชื้นจากผลการทดลอง ซึ่งแบบจำลองที่สามารถทำนายผลได้สอดคล้องกับการทดลองจะพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงสุด (R^2) และดัชนีความแม่นยำในการทำนายจะพิจารณาจากรากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) และผลรวมกำลังสองความคลาดเคลื่อน (SSE) ต้องมีค่าต่ำที่สุด [1, 4, 10] ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า แบบจำลองของ Modified Henderson and Pabis สามารถทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งขึ้นซิงด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดได้เหมาะสมที่สุด [4] ขณะที่แบบจำลองของ Midilli สามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของซิงตองแฉ้อมที่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดได้เหมาะสมที่สุด [1]

จากงานวิจัยการอบแห้งขึ้นซิงที่ความดันสุญญากาศคงที่ [4] และการอบแห้งขึ้นซิงด้วยความดันสุญญากาศแบบพัลส์ที่อุณหภูมิอบแห้ง 50°C [9] ถ้านำเอาข้อดีของการอบแห้งด้วยสุญญากาศแบบพัลส์และเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งให้สูงขึ้นโดยนำแหล่งความร้อนจากอินฟราเรดมาประยุกต์ใช้ในการอบแห้งซิง คาดว่าจะช่วยลดเวลาในการอบแห้งซิงได้เพิ่มขึ้น ใช้พลังงานน้อยลง และซิงหลังอบแห้งยังคงมีคุณภาพที่ดี ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเป็นการอบแห้งขึ้นซิงด้วยเครื่องอบแห้งสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดโดยใช้อุณหภูมิอบแห้งที่แตกต่างกัน ที่ความดันสุญญากาศคงที่และความดันสุญญากาศแบบพัลส์ เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งขึ้นซิง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้ง สี ปริมาณน้ำอิสระ และหาสมการอบแห้งเอมพิริคัลที่เหมาะสมในการทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งขึ้นซิง เพื่อใช้เป็นแนวทางศึกษาการอบแห้งกับวัสดุทางการเกษตรชนิดอื่นต่อไป

วิธีการวิจัย

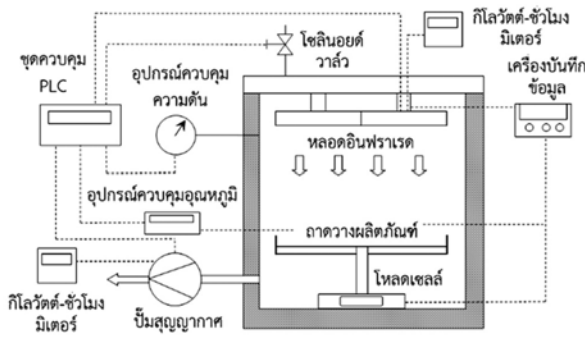
1. เครื่องอบแห้งสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด

เครื่องอบแห้งสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดดังภาพที่ 1(ก) ประกอบด้วยห้องอบแห้งทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 40 cm สูง 60 cm หุ้มฉนวนหนา 2 cm ติดตั้งหลอดอินฟราเรด 4 หลอด ยี่ห้อ Infrapara รุ่น A-1 ขนาด 250 W ที่ผาด้านบนของห้องอบแห้งโดยมีระยะห่างจากผาดวงผลิตภัณฑ์ประมาณ 20 cm ควบคุมอุณหภูมิอบแห้งโดยเครื่องควบคุมอุณหภูมิ Omron รุ่น E5CC แบบ PID มีความแม่นยำในการควบคุมอุณหภูมิ $\pm 1^{\circ}\text{C}$ โดยต่อเชื่อมกับสายเทอร์โมคัปเปิลชนิด K และสร้างสภาวะสุญญากาศด้วยปั๊มสุญญากาศขนาด 0.35 kW โดยใช้เครื่องควบคุมแรงดัน (Pressure Controller) ยี่ห้อ Panasonic รุ่น DP-101 ซึ่งจะทำงานควบคู่กับชุดควบคุม PLC ยี่ห้อ Mitsubishi รุ่น FX1s-20MT ในการสร้างสภาวะสุญญากาศแบบคงที่ (Vacuum Drying, VD) และสร้างสภาวะความดันสุญญากาศแบบพัลส์ (Pulsed Vacuum Drying, PVD) ที่อัตราส่วนพัลส์ (Pulsed Ratio) 15:2 หรือช่วงเวลาที่เป็นความดันสุญญากาศ 15 นาที สลับกับช่วงเวลาที่เป็นความดันบรรยากาศ 2 นาที โดยใช้โซลินอยด์วาล์ว Pneumatic Pressure รุ่น ADK11-15A-02C-AC220V ทำหน้าที่ปรับเปลี่ยนแรงดัน เมื่อทำการทดลองจะใช้ไหลด์เซลล์ความละเอียด 0.1 g เชื่อมต่อกับเครื่องบันทึกข้อมูล (Data

Logger) ยี่ห้อ Graphtec Midi Logger รุ่น GL820 เพื่อบันทึกน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ในระหว่างการอบแห้ง และวัดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้งด้วย Kitlowatt Hour Meter ความละเอียด 0.01 kWh ดังแสดงในภาพที่ 1 (ข)



(ก) เครื่องอบแห้งที่ใช้ในการทดลอง



(ข) แผนภาพเครื่องอบแห้ง

ภาพที่ 1 เครื่องอบแห้งสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด

2. วิธีการทดลอง

ซิงที่ใช้ในการทดลองเป็นซิงแก่อายุ 10-12 เดือน นำมาล้างทำความสะอาดทิ้งวางไว้ให้สะเด็ดน้ำ หั่นซิงตามแนวเส้นโยหนาประมาณ 3 mm ให้น้ำหนักประมาณ 200 g แล้วนำไปวางเรียงบนถาด จากนั้นนำไปอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรดโกลที่อุณหภูมิอบแห้ง 50 60 และ 70°C และความดันสัมบูรณ์ 10 kPa ที่ 2 เงื่อนไข คือ ความดันสุญญากาศคงที่ และความดันสุญญากาศแบบพัลส์ 15:2 หรือที่อัตราส่วนระหว่างช่วงเวลาที่มีความดันในห้องอบแห้งเป็นความดันสุญญากาศ 15 นาที ต่อช่วงเวลาที่มีความดันในห้องอบแห้งเป็นความดันบรรยากาศตามเวลาที่กำหนดจนสิ้นสุดกระบวนการอบแห้ง บันทึกค่าการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักและอุณหภูมิด้วย Data Logger อบแห้งซิงจนได้ความชื้นประมาณ 10-13% d.b. [11] เมื่อสิ้นสุดการทดลอง บันทึกค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าจาก Kilowatt Hour Meter แล้วนำตัวอย่างซิงไปหาความชื้น คุณภาพด้านสี และปริมาณน้ำอิสระ ต่อไป

3. การหาความชื้นของผลิตภัณฑ์

การหาความชื้นของซิงซิง โดยนำตัวอย่างซิงซิงซิงน้ำหนักแล้วนำไปอบแห้งในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 103°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง [12] เพื่อหาน้ำหนักแห้งของซิงซิง แล้วนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาปริมาณความชื้นโดยใช้สมการที่ (1) [13]

$$MC = \frac{w - d}{d} \quad (1)$$

เมื่อ	MC	คือ	ความชื้นมาตรฐานแห้ง (d.b.)
	w	คือ	น้ำหนักเปียกของซิงซิง (g)
	d	คือ	น้ำหนักแห้งของซิงซิง (g)

4. ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption) ที่ใช้ในการอบแห้ง สามารถหาได้โดยใช้ ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง คือ มวลวัสดุก่อนและหลังการอบแห้ง และปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่อ่านได้จาก Kilowatt Hour Meter มาคำนวณหาความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งได้จากสมการที่ 2 [8]

$$SEC = \frac{3.6E_p}{m_i - m_f} \quad (2)$$

เมื่อ	SEC	คือ	ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (MJ/g _{water evaporated})
	E_p	คือ	ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (kWh)
	m_i	คือ	มวลของชิ้นชั่งก่อนอบแห้ง (g)
	m_f	คือ	มวลของชิ้นชั่งหลังอบแห้ง (g)

5. การทดสอบคุณภาพด้านสี

ทดสอบคุณภาพด้านสีของชิ้นชั่งก่อนและหลังอบแห้งด้วยเครื่องวัดสี Colorimeter N3H รุ่น NR200 ค่าความละเอียด 0.01 บันทึกค่าสีตามมาตรฐาน CIE Lab (International Commission on Illumination) โดย L แสดงถึงความสว่างมีค่า 0-100 โดยค่า 0 คือ สีดำ และค่า 100 คือ สีขาว ส่วนค่า a^* แสดงสีเขียว ($-a^*$) ถึงสีแดง ($+a^*$) และค่า b^* แสดงสีน้ำเงิน ($-b^*$) ถึงสีเหลือง ($+b^*$) และวิเคราะห์หาค่าความแตกต่างของสีโดยรวมของชิ้นชั่งก่อนและหลังอบแห้ง ดังสมการที่ 3 [8]

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (3)$$

เมื่อ	ΔE	คือ	ความแตกต่างของสีโดยรวม
	ΔL^*	คือ	ความแตกต่างของความสว่าง
	Δa^*	คือ	ความแตกต่างของความเป็นสีแดงถึงสีเขียว
	Δb^*	คือ	ความแตกต่างของความเป็นสีเหลืองถึงสีน้ำเงิน

6. การทดสอบค่าปริมาณน้ำอิสระ

นำตัวอย่างชิ้นชั่งของจากการอบแห้งที่เงื่อนไขต่างกันมาวิเคราะห์ปริมาณน้ำอิสระ (Water Activity, a_w) ด้วยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณน้ำอิสระยี่ห้อ AquaLab 3TE ช่วงการอ่านค่า 0.03 ถึง 1.00 ค่าความละเอียด 0.001 โดยบดตัวอย่าง 5 g ใส่ในภาชนะของเครื่องเพื่อวัดค่าปริมาณน้ำอิสระ ซึ่งผลิตภัณฑ์ประเภทอาหารแห้งต้องมีปริมาณน้ำอิสระไม่เกิน 0.6 จุลินทรีย์ประเภทเชื้อราจึงไม่สามารถเจริญเติบโตได้ และส่งผลต่ออายุการเก็บรักษาและความปลอดภัยของอาหาร [10]

7. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัล

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัลเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ที่มีรูปแบบในการวิเคราะห์ที่ไม่ซับซ้อน และนิยมใช้ในการศึกษาจลนพลศาสตร์การถ่ายเทมวลในกระบวนการอบแห้งวัสดุทางการเกษตร โดยแบบจำลองเอมพิริคัลที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้ แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัล [1, 4, 10]

ชื่อสมการ	สมการ
Newton	$MR = \exp(-kt)$
Page	$MR = \exp(-kt^n)$
Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$
Verma et al.	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-gt)$
Midilli	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$

* a b g k และ n คือ ค่าคงที่จากการวิเคราะห์สมการเอมพิริคัล และ t คือ เวลาในการอบแห้ง (นาที)

การทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นโดยใช้แบบจำลองเอมพิริคัลจะแสดงในรูปของอัตราส่วนความชื้น (Moisture Ratio) ซึ่งเป็นสัดส่วนของปริมาณน้ำที่เหลืออยู่ภายในวัสดุที่กำลังอบแห้งกับปริมาณน้ำทั้งหมดที่อยู่ในวัสดุก่อนอบแห้ง สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 4 และเมื่อพิจารณาจากสมการที่ (3) พบว่า ความชื้นสมดุลของวัสดุมีค่าน้อยกว่าความชื้นที่เวลาใดๆ และความชื้นเริ่มต้นของวัสดุค่อนข้างมาก ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์แบบจำลอง สามารถหาอัตราส่วนความชื้นได้ดังสมการที่ 5 [10]

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_i - M_{eq}} \quad (4)$$

หรือ

$$MR = \frac{M_t}{M_i} \quad (5)$$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น (decimal)
 M_t คือ ความชื้นที่เวลาใดๆ (d.b.)
 M_i คือ ความชื้นเริ่มต้น (d.b.)
 M_{eq} คือ ความชื้นสมดุล (d.b.)

การทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งขึ้นซึ่งโดยใช้สมการเอมพิริคัล จะใช้วิธีวิเคราะห์ถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear Regression) ร่วมกับค่าอัตราส่วนความชื้นจากการทดลองในการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสมการในตารางที่ 1 ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวิเคราะห์สามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของขึ้นซึ่งได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองหรือไม่ จะพิจารณาจากดัชนีบ่งชี้ความสามารถในการทำนาย คือ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination, R^2) รากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error, RMSE) และผลรวมกำลังสองความคลาดเคลื่อน (Sum of Squared Error, SSE) ดังสมการที่ 6-8 [1, 4, 10] โดยสมการเอมพิริคัลที่มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงที่สุด ค่าผลรวมกำลังสองความคลาดเคลื่อนและรากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยต่ำที่สุด จะเป็นสมการเอมพิริคัลที่เหมาะสมที่สุดสำหรับทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งขึ้นซึ่ง

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - \overline{MR_{exp}})^2} \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \left[\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2 \right]} \quad (7)$$

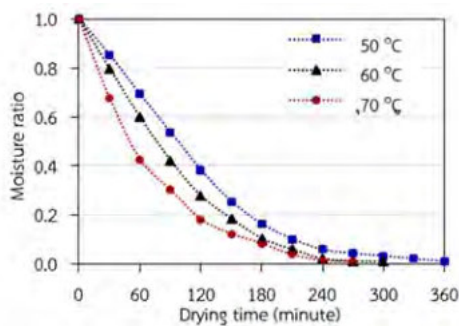
$$SSE = \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2 \quad (8)$$

เมื่อ $MR_{exp,i}$ คือ อัตราส่วนความชื้นจากการทดลอง (decimal)
 $MR_{pre,i}$ คือ อัตราส่วนความชื้นที่คำนวณได้จากสมการเอมพิริคัล (decimal)
 N คือ จำนวนข้อมูลในการทดลอง

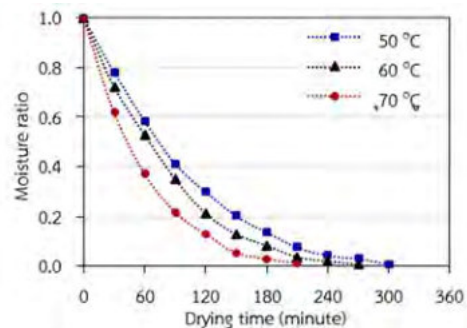
ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

1. จลนพลศาสตร์การอบแห้งชิ้นซิง

การอบแห้งชิ้นซิงที่อุณหภูมิอบแห้ง 50 60 และ 70°C และความดันสัมบูรณ์ 10 kPa แบบสุญญากาศคงที่ (VD) และสุญญากาศแบบพัลส์ (PVD) 15:2 ดังภาพที่ 2(ก) และ 2(ข) ตามลำดับ โดยอบแห้งชิ้นซิงจากความชื้นเริ่มต้นประมาณ 1,229.47% d.b. จนได้ความชื้นสุดท้ายประมาณ 10-13% d.b. จากผลการทดลองพบว่า เส้นกราฟการอบแห้งมีลักษณะเป็นรูปแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลที่ลดลงกับเวลาการอบแห้ง [1] โดยในช่วง 1-2 ชั่วโมงแรกของการอบแห้ง เส้นกราฟจะมีความลาดชันมากและปริมาณความชื้นของชิ้นซิงจะลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากในช่วงเริ่มต้นชิ้นซิงมีปริมาณความชื้นสูง เมื่อความดันสัมบูรณ์ในห้องอบแห้งลดลงจนมีค่า 10 kPa ซึ่งน้ำจะเดือดที่อุณหภูมิประมาณ 45.8 °C [4] และชิ้นซิงได้รับความร้อนจากรังสีอินฟราเรดเพื่อใช้ในการระเหยน้ำ ทำให้น้ำบริเวณผิวชิ้นซิงระเหยออกไปอย่างรวดเร็ว เมื่อผิวของชิ้นซิงเริ่มแห้งและความชื้นของเส้นกราฟจะลดลงในช่วงท้าย ๆ ของการอบแห้ง เนื่องจากผิวหน้าของชิ้นซิงแห้งและน้ำที่อยู่ภายในชิ้นซิงเคลื่อนที่ออกมาที่ผิวช้ากว่าการระเหยน้ำออกจากผิวทำให้อัตราการอบแห้งลดลง



(ก) สุญญากาศคงที่



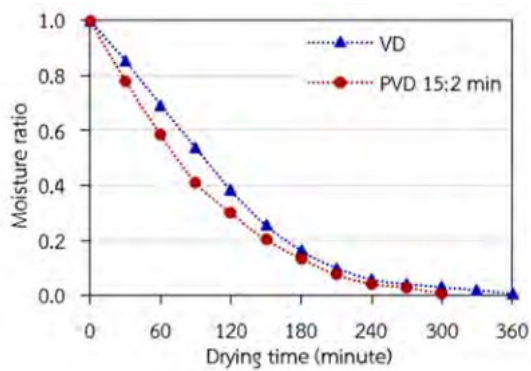
(ข) สุญญากาศแบบพัลส์ 15:2

ภาพที่ 2 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของชิ้นซิงที่อบแห้งด้วยความดันสัมบูรณ์ 10 kPa โดยอบแห้งแบบสุญญากาศคงที่และสุญญากาศแบบพัลส์ 15:2

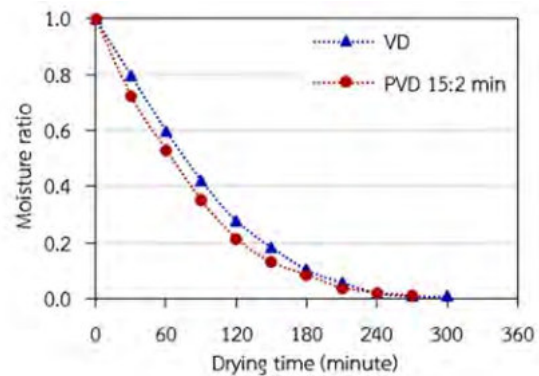
นอกจากนี้การเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งให้สูงขึ้นจะทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยลง โดยการอบแห้งแบบสุญญากาศคงที่ อุณหภูมิอบแห้ง 50 60 และ 70°C ใช้เวลาอบแห้ง 360 300 และ 270 นาที ตามลำดับ ดังภาพที่ 2(ก) และการอบแห้งสุญญากาศแบบพัลส์ใช้เวลาอบแห้ง 300 270 และ 210 นาที ตามลำดับ ดังภาพที่ 2(ข) ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งจะทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลมีค่าสูงขึ้นด้วย ส่งผลให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้นและ

ทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งขึ้นขีงน้อยลง [1, 4] ดังนั้นอุณหภูมิอบแห้งจึงมีผลต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งขีงอย่างชัดเจน โดยการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70°C จะใช้เวลาในการอบแห้งน้อยที่สุด

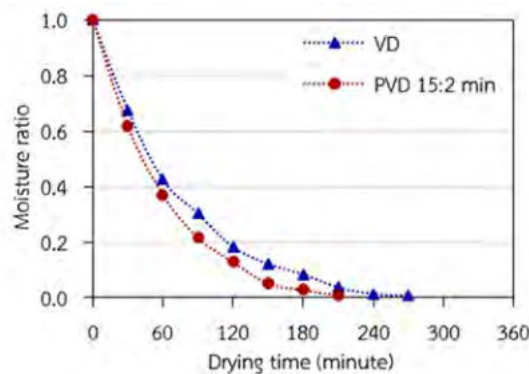
เมื่อพิจารณาการอบแห้งขีงแบบสุญญากาศขีงที่เปรียบเทียบบั้กับสุญญากาศแบบพัลส์ 15:2 ที่อุณหภูมิอบแห้ง 50 60 และ 70°C ดังภาพที่ 3(ก) 3(ข) และ 3(ค) ตามลำดับ พบว่า การอบแห้งที่สุญญากาศแบบพัลส์มีการลดลงของอัตราส่วนความชื้นเร็วกว่าและใช้เวลาอบแห้งน้อยกว่าแบบสุญญากาศขีงที่ทุกอุณหภูมิการอบแห้ง เนื่องจากการอบแห้งที่สุญญากาศแบบพัลส์เป็นการทำงานของความดันสุญญากาศ (15 นาที) สลับกับความดันบรรยากาศ (2 นาที) ทำให้ความดันในห้องอบแห้งเกิดการเปลี่ยนแปลงตามจังหวะพัลส์ตลอดเวลากการอบแห้ง ส่งผลต่อช่องว่างและรูพรุนขนาดเล็กในขีงขีงเกิดการขยายตัว ทำให้น้ำภายในขีงขีงแพร่กระจายมาที่ผิวได้ง่ายขีง อัตราการอบแห้งสูงขีงและความชื้นลดลงเร็วขีง [6, 8-9] นอกจากนี้การอบแห้งแบบสุญญากาศขีงที่ความดันในห้องอบแห้งจะคงที่ ขณะที่การอบแห้งสุญญากาศแบบพัลส์ ความดันในห้องอบแห้งจะเปลี่ยนแปลงตามจังหวะพัลส์ทำให้อากาศบริเวณขีงขีงเกิดการไหลเวียน ส่งผลให้ความชื้นถ่ายเทออกจากผิวของขีงได้ขีงขีง ทำให้อัตราการอบแห้งสูงขีงและใช้เวลาในการอบแห้งน้อยลง [14]



(ก) อุณหภูมิอบแห้ง 50°C



(ข) อุณหภูมิอบแห้ง 60°C

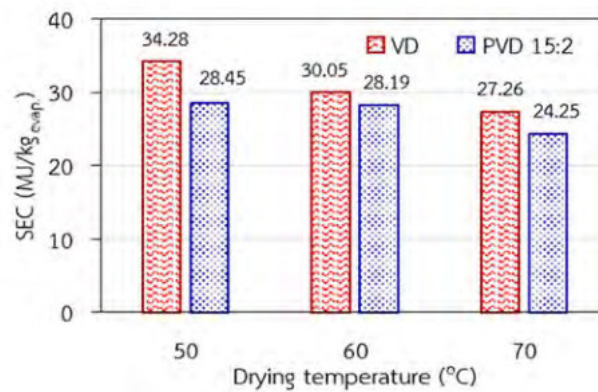


(ค) อุณหภูมิอบแห้ง 70°C

ภาพที่ 3 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของขีงขีงที่อบแห้งด้วยความดันสัมบูรณ์ 10 kPa และอุณหภูมิอบแห้ง 50 60 และ 70°C

2. ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

เมื่อนำค่าน้ำหนักของขึ้นขิงก่อนและหลังอบแห้ง และปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้งมาคำนวณหาค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ดังภาพที่ 4 พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งขึ้นขิงให้สูงขึ้นจาก 50 เป็น 60°C และจาก 60 เป็น 70°C จะทำให้ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่อบแห้งแบบความดันสุญญากาศคงที่มีค่าลดลงโดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 12.32 และ 9.31 ตามลำดับ และการอบแห้งที่ความดันสุญญากาศแบบพัลส์มีค่าลดลงโดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 0.90 และ 13.99 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งจะทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้นส่งผลให้น้ำระเหยได้เร็วขึ้นและทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งสั้นลง นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบวิธีการอบแห้งแบบสุญญากาศคงที่และสุญญากาศแบบพัลส์ที่อุณหภูมิการอบแห้งเดียวกัน พบว่า การอบแห้งที่สุญญากาศแบบพัลส์มีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำกว่าการอบแห้งแบบสุญญากาศคงที่ โดยที่อุณหภูมิอบแห้ง 50 60 และ 70°C จะมีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลงโดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 16.99 6.19 และ 11.03 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากการอบแห้งขึ้นขิงที่สุญญากาศแบบพัลส์ส่งผลต่อการระเหยน้ำของขิงได้ดีกว่าและทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งสั้นลง จึงทำให้ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะน้อยลงตามไปด้วย [8-9] โดยการอบแห้งขึ้นขิงที่สุญญากาศแบบพัลส์และอุณหภูมิอบแห้ง 70°C มีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะน้อยที่สุดเท่ากับ 24.25 MJ/kg_{water-evap.}



ภาพที่ 4 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้งขึ้นขิง

3. สีและปริมาณน้ำอิสระ

ตารางที่ 2 ปริมาณน้ำอิสระและสีของขึ้นขิงก่อนและหลังอบแห้ง

Method	T (°C)	a _w	L*	a*	b*	ΔE
Fresh		0.994±0.004 ^a	76.98±3.13 ^a	1.66±0.50 ^c	6.87±3.69 ^a	N/A
VD	50	0.491±0.083 ^{bc}	72.63±2.64 ^b	4.28±1.05 ^a	4.52±2.05 ^{ab}	6.24±2.66 ^b
	60	0.537±0.079 ^b	73.16±2.81 ^b	3.12±0.99 ^b	3.35±2.23 ^{bc}	6.69±2.18 ^b
	70	0.529±0.050 ^{bc}	68.54±2.80 ^c	2.36±1.83 ^{bc}	1.03±2.35 ^c	11.24±3.00 ^a
PVD 15:2	50	0.443±0.024 ^{bc}	73.37±3.73 ^b	1.77±1.15 ^c	2.87±2.28 ^{bc}	6.45±3.34 ^b
	60	0.458±0.080 ^{bc}	73.22±5.74 ^b	1.88±1.39 ^c	4.16±5.07 ^b	8.17±4.49 ^b
	70	0.405±0.048 ^c	71.21±3.31 ^{bc}	1.81±1.19 ^c	1.73±2.28 ^c	8.72±3.36 ^b

a-c means in the same column with different superscripts are significantly different (p<0.05)

ปริมาณน้ำอิสระของชั้นขิงหลังอบแห้งมีค่าอยู่ในช่วง 0.405-0.537 ดังตารางที่ 2 ซึ่งมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคือ มีค่าไม่เกิน 0.6 จุลินทรีย์ประเภทเชื้อราไม่สามารถเจริญได้ ทำให้สามารถเก็บรักษาชั้นขิงหลังอบแห้งไว้ได้นาน [10] เมื่อพิจารณาที่ค่าสี พบว่า ชั้นขิงอบแห้งมีค่าความสว่างใกล้เคียงกันและมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับขิงสด โดยเฉพาะที่อุณหภูมิอบแห้ง 70°C จะมีค่าความสว่างต่ำที่สุด เนื่องจากอุณหภูมิการอบแห้งที่สูงขึ้นทำให้ชั้นขิงหลังอบแห้งมีสีที่คล้ำขึ้น ส่วนชั้นขิงที่อบแห้งด้วยสุญญากาศแบบพัลส์มีค่าสีแดงใกล้เคียงกับขิงสด ขณะที่การอบแห้งแบบสุญญากาศคงที่ ค่าสีแดงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งการอบแห้งแบบสุญญากาศคงที่จะใช้เวลาในการอบแห้งนานกว่าสุญญากาศแบบพัลส์ ส่วนค่าสีเหลืองของชั้นขิงมีค่าลดลงทุกการทดลอง นอกจากนี้เมื่อพิจารณาความแตกต่างของเอนทัลปี (ΔE) พบว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (p>0.05) ยกเว้นการอบแห้งแบบสุญญากาศคงที่ ที่อุณหภูมิ 70°C จะมีความแตกต่างของเอนทัลปีโดยรวมมากที่สุด เนื่องจากเป็นการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงและใช้เวลาในการอบแห้งนานกว่าสุญญากาศแบบพัลส์จึงส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีอย่างชัดเจน

4. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัล

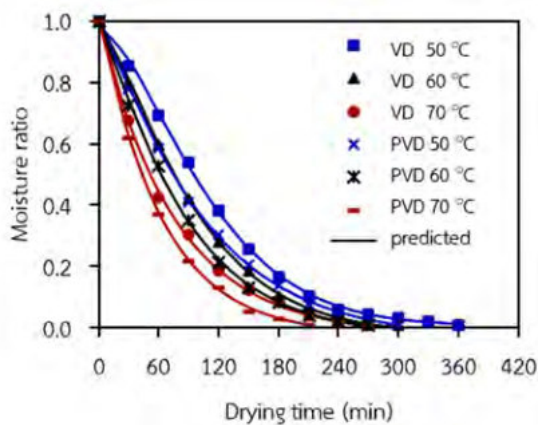
ตารางที่ 3 ค่าคงที่ของสมการเอมพิริคัล

Model	Con.	T (°C)	Constant		R ²	RMSE	SSE	
Newton	VD	50	k= 0.00866		0.97120	0.05621	0.04108	
		60	k= 0.01061		0.98134	0.04502	0.02229	
		70	k= 0.01388		0.99831	0.01283	0.00165	
	PVD	50	k= 0.01032		0.99053	0.03100	0.01057	
		60	k= 0.01231		0.99160	0.02950	0.00871	
		70	k= 0.01699		0.99796	0.01473	0.00174	
Average					0.98849	0.03155	0.01434	
Page	VD	50	k= 0.00103	n= 1.43374	0.99919	0.00940	0.00115	
		60	k= 0.00221	n= 1.33076	0.99917	0.00949	0.00099	
		70	k= 0.01101	n= 1.05146	0.99885	0.01059	0.00112	
	PVD	50	k= 0.00382	n= 1.20869	0.99919	0.00907	0.00090	
		60	k= 0.00492	n= 1.19905	0.99873	0.01149	0.00132	
		70	k= 0.01144	n= 1.09179	0.99938	0.00809	0.00052	
Average					0.99909	0.00969	0.00100	
Henderso n and Pabis	VD	50	a= 1.07831	k= 0.00926	0.97804	0.04908	0.03131	
		60	a= 1.05482	k= 0.01113	0.98492	0.04047	0.01801	
		70	a= 1.00802	k= 0.01399	0.99839	0.01252	0.00157	
	PVD	50	a= 1.03772	k= 0.01069	0.99232	0.02791	0.00857	
		60	a= 1.02874	k= 0.01263	0.99266	0.02760	0.00762	
		70	a= 1.00986	k= 0.01714	0.99809	0.01425	0.00162	
Average					0.99074	0.02864	0.01145	
Verma et al.	VD	50	a= 9.98493	k= 0.01635	g = 0.01800	0.99848	0.01292	0.00217
		60	a= 5.70171	k= 0.00562	g = 0.00491	0.99565	0.02174	0.00520
		70	a= 1.00050	k= 0.01390	g = -	0.99837	0.01260	0.00159
	PVD	50	a= -0.62900	k= 0.02519	g = 0.01360	0.99891	0.01050	0.00121
		60	a= -0.82488	k= 0.02714	g = 0.01661	0.99866	0.01180	0.00139
		70	a= -0.03460	k= 0.00015	g = 0.01564	0.99972	0.00550	0.00024
Average					0.99830	0.01251	0.00197	

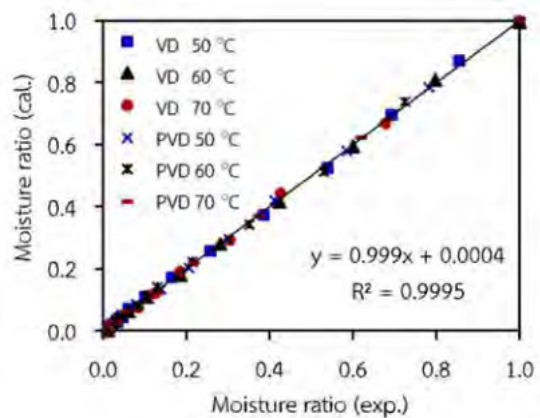
	50	a=0.98920	k=0.00084	n=1.47262	b=0.00001	0.99929	0.00881	0.00101	
VD	60	a=0.99602	k=0.00254	n=1.29379	b=-0.00006	0.99960	0.00658	0.00048	
	70	a=1.00133	k=0.01304	n=1.00718	b=-0.00007	0.99922	0.00871	0.00076	
	50	a=0.99911	k=0.00471	n=1.15523	b=-0.00009	0.99974	0.00513	0.00029	
Midilli	PVD	60	a=0.99591	k=0.00574	n=1.15717	b=-0.00008	0.99919	0.00916	0.00084
	70	a=0.99972	k=0.01362	n=1.04315	b=-0.00010	0.99977	0.00495	0.00020	
	Average						0.99947	0.00722	0.00059

เมื่อนำอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากผลการทดลองอบแห้งขึ้นซึ่งที่ความดันสัมบูรณ์ 10 kPa แบบความดันสุญญากาศคงที่ (VD) และความดันสุญญากาศแบบพัลส์ (PVD) 15:2 และอุณหภูมิอบแห้ง 50 60 และ 70°C ไปวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองคณิตศาสตร์เอมพิริคัลจำนวน 5 สมการ ได้แก่ แบบจำลอง Newton, Page, Henderson and Pabis, Verma et al. และ Midilli ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์สมการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear regression) ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมในการทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของขึ้นซึ่งที่เหมาะสมที่สุด จะพิจารณาจากความแม่นยำในการทำนายซึ่งจะต้องมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) สูงที่สุด และพิจารณาจากค่าความผิดพลาดในการทำนายซึ่งต้องมีค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) และผลรวมกำลังสองความคลาดเคลื่อน (SSE) ต่ำที่สุด [1, 4, 10]

จากการวิเคราะห์พบว่า แบบจำลองคณิตศาสตร์เอมพิริคัลทั้ง 5 สมการ มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจในช่วง 0.97120-0.99977 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.00495-0.05621 และผลรวมกำลังสองความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 0.00020-0.04018 แสดงดังในตารางที่ 3 ซึ่งสมการเอมพิริคัลของ Midilli สามารถทำนายผลการเปลี่ยนแปลงความชื้นได้สอดคล้องกับผลการทดลองที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงสุด ($R^2=0.99947$) ค่าเฉลี่ยรากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยต่ำที่สุด (RMSE=0.00722) และค่าเฉลี่ยผลรวมกำลังสองความคลาดเคลื่อนต่ำที่สุด (SSE=0.00059) สอดคล้องกับงานวิจัยการศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งซึ่งต้องแช่แข็ง ซึ่งพบว่าแบบจำลองของ Midilli มีความเหมาะสมในการทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นมากที่สุด [1] และเมื่อนำค่าการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลองและค่าอัตราส่วนความชื้นที่คำนวณได้จากสมการของ Midilli มาสร้างกราฟเปรียบเทียบกันดังภาพที่ 5 (ก) พบว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันทุกการทดลอง นอกจากนี้เมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นจากผลการทดลองกับผลการคำนวณด้วยสมการของ Midilli แสดงดังรูปที่ 5 (ข) พบว่า มีความสัมพันธ์ของข้อมูลเกาะกลุ่มกันเป็นแนวเส้นตรง และมีความลาดชันของเส้นแนวโน้ม 45 องศา แสดงว่าแบบจำลองของ Midilli สามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของขึ้นซึ่งได้เหมาะสมที่สุด



(ก) อัตราส่วนความชื้นกับเวลา



(ข) อัตราส่วนความชื้นจากผลการทดลอง และผลการทำนาย

ภาพที่ 5 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นของขึ้นชิงจากผลการทดลองและผลการทำนายด้วยแบบจำลอง Midilli ที่อบแห้งด้วยสุญญากาศแบบคงที่และสุญญากาศแบบพัลส์ 15:2

สรุปผลการวิจัย

การอบแห้งขึ้นชิงด้วยเครื่องอบแห้งสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70°C และความดันสัมบูรณ์ 10 kPa ที่ 2 เงื่อนไข คือ ความดันสุญญากาศคงที่และความดันสุญญากาศแบบพัลส์ที่อัตราส่วนระหว่างช่วงเวลาที่เป็นความดันสุญญากาศต่อช่วงเวลาที่เป็นความดันบรรยากาศ 15:2 พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งขึ้นชิงให้สูงขึ้นมีผลทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานลดลง และการอบแห้งขึ้นชิงที่ความดันสุญญากาศแบบพัลส์สามารถอบแห้งขึ้นชิงได้เร็วกว่าที่ความดันสุญญากาศคงที่ เป็นผลให้ระยะเวลาในการอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานลดลงเช่นเดียวกัน จึงสรุปได้ว่าการอบแห้งขึ้นชิงที่ความดันสุญญากาศแบบพัลส์และอุณหภูมิอบแห้ง 70°C ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยที่สุด และมีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำที่สุดเท่ากับ 24.25 MJ/kg_{water-evap.} สำหรับด้านคุณภาพของขึ้นชิงพบว่า ปริมาณน้ำอิสระของขึ้นชิงทุกการทดลองมีค่าอยู่ระหว่าง 0.405-0.537 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน คือ มีค่าไม่เกิน 0.6 การใช้อุณหภูมิต่างกันในการอบแห้งขึ้นชิงที่ความดันสุญญากาศแบบพัลส์ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของค่าความแตกต่างของสีโดยรวม และอุณหภูมิต่างกัน 70°C ส่งผลต่อค่าความสว่าง ค่าสีแดง และค่าสีเหลืองของขึ้นชิงมีแนวโน้มต่ำที่สุด นอกจากนี้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัลที่ใช้ทำนายการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของขึ้นชิงได้เหมาะสม คือ สมการของ Midilli ซึ่งมีความแม่นยำในการทำนายสูงสุด โดยมีค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงสุดเท่ากับ 0.99947 และมีค่าผิดพลาดในการทำนายต่ำที่สุด โดยมีค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยต่ำที่สุดเท่ากับ 0.00722 และผลรวมกำลังสองความคลาดเคลื่อนต่ำที่สุดเท่ากับ 0.00059

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก ที่สนับสนุนงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] รัชฎา แยมศรวล, ชนิษฐา รุตรีตนมงคล และฤทธิชัย อัครวาชัย. (2561). ศึกษาแบบจำลองและผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีกายภาพของชิงตองแช่อบแห้ง. *วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย*. 24(1), 47-57.
- [2] โชติกา เทียบคำ, ศุภชัย ตียวรรณท์ และธนีสร์ ปทุมานนท์. (2561). “ชิงแห้ง” สมุนไพรที่ใช้ทางเภสัชกรรมไทยตามศาสตร์การแพทย์แผนไทย. *วารสารมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์*. 20(พิเศษ), 53-62.
- [3] ศรีมา แจ้คำ, กิตติศักดิ์ วิธินันทกิตต์, จิรวัดน์ สิตรานนท์ และศัพันธ์ สุวรรณทัต. (2562). การศึกษาและเปรียบเทียบการอบแห้งสมุนไพรด้วยระบบสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรดและอากาศร้อน. *วารสารวิชาการพลังงานทดแทนสู่ชุมชน*. 2(2), 71-77.
- [4] อำไพศักดิ์ ทิบุญมา และศักชัย จงจำ. (2553). การอบแห้งชิงด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด. *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา*. 15(2), 76-86.
- [5] Xie, Y., Gao, Z., Liu, Y. and Xiao, H. (2017). Pulsed vacuum drying of rhizome dioscoreae slices. *LWT-Food Science and Technology*. 80, 237-249.
- [6] Zhang, W., Pan, Z., Xiao, H., Zheng, Z., Chen, C. and Gao, Z. (2018). Pulsed vacuum drying (PVD) technology improves drying efficiency and quality of *Poria cubes*. *Drying Technology*. 36(8), 908-921.
- [7] Liu, Z.L., Wei, Z.Y., Vidyarthi, S.K., Pan, Z., Zielinska, M., Deng, L.Z., Wang, Q.H., Wei, Q. and Xiao, H.W. (2021). Pulsed vacuum drying of kiwifruit slices and drying process optimization based on artificial neural network. *Drying Technology*. 39(3). 405.417.
- [8] วรวิภา มาณะงาน และกิตติศักดิ์ วิธินันทกิตต์. (2563). การอบแห้งดอกบัวด้วยเทคนิคสุญญากาศแบบพัลส์และอินฟราเรดร่วมกับการฝังในซิลิกาทราย. *วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต*. 10(3), 84-98.
- [9] กิตติศักดิ์ วิธินันทกิตต์, วีระพันธุ์ มานันตพงศ์, จิรวัดน์ สิตรานนท์ และเอกภูมิ บุญธรรม. (2564). จลนพลศาสตร์การอบแห้งชิงด้วยเครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบจิ้งหะ. *วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม*. 3(1), 21-31.
- [10] ศรีมา แจ้คำ และกิตติศักดิ์ วิธินันทกิตต์. (2564). การอบแห้งแป้งทำยายม่อมด้วยโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ*. 16(2), 94-105.
- [11] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2526). *มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม: ชิงแห้ง (มอก. 458-2526)*. กรุงเทพฯ.
- [12] AOAC. (2000). *Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists*. 17th ed. Maryland: Gaithersburg.
- [13] สมชาติ โสภณธรรมฤทธิ. (2540). *การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท*. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [14] Xie, L., Mujumdar, A.S., Fang, X.M., Wang, J., Dai, J.W., Du, Z.L., Xiao, H.W., Lui, Y. and Gao, Z.J. (2017). Far-infrared radiation heating assisted pulsed vacuum drying (FIR-PVD) of wolfberry (*Lycium barbarum* L.): Effects on drying kinetics and quality attributes. *Food and Bioproducts Processing*. 102, 320-331.