

จลนพลศาสตร์การอบแห้งขึ้นชั้นด้วยเครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบจังหวะ

THE DRYING KINETIC OF GINGER SLICES USING PULSED VACUUM DRYER

กิตติศักดิ์ วิธินันทกิจ^{1*}, วีระพันธุ์ มานันตพงษ์¹, จิรวัดน์ สิตรานนท์¹, เอกภูมิ บุญธรรม²

Kittisak Witinantakit^{1*}, Weeraphan Manantaphong¹, Jirawat Sitranon¹,
Eakpoom Boonthum²

¹สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี 20110

²คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม อ.เมือง จ.พิษณุโลก ประเทศไทย 65000

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

²Faculty of Industrial Technology, Pibulsongkram Rajabhat University, Muang, Phitsanulok, Thailand, 65000

*Corresponding author e-mail: k_yong28@hotmail.com

วันที่เข้าระบบ 1 มิถุนายน 2564

วันที่แก้ไขบทความ 27 มิถุนายน 2564

วันที่ตอบรับบทความ 27 มิถุนายน 2564

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งขึ้นชั้นที่อุณหภูมิ 50°C ความดันสมบูรณ์ในห้องอบแห้งคงที่ 10 kPa และความดันในห้องอบแห้งแบบจังหวะโดยใช้อัตราส่วนระหว่างช่วงเวลาความดันสุญญากาศต่อความดันบรรยากาศหรืออัตราส่วนพัลส์ 10:2 และ 15:2 นาที่ และวิเคราะห์คุณภาพด้านสีและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ จากการทดลองพบว่า การอบแห้งขึ้นชั้นโดยใช้ความดันในห้องอบแห้งแบบจังหวะสามารถอบแห้งขึ้นชั้นได้เร็วกว่าความดันในห้องอบแห้งคงที่ นอกจากนี้เมื่อช่วงเวลาความดันสุญญากาศเพิ่มขึ้นจาก 10:2 เป็น 15:2 นาที่ ส่งผลให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น เวลาในการอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะน้อยลง โดยการอบแห้งขึ้นชั้นที่อัตราส่วนพัลส์ 15:2 นาที่ มีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ($SEC=28.84 \text{ MJ/kg}_{\text{water-evap}}$) น้อยที่สุด สำหรับค่าสีของชิ้นหลังอบแห้งพบว่า ความสว่างมีค่าใกล้เคียงกันทุกการทดลอง ส่วนค่าสีแดงและสีเหลืองของชิ้นที่อบแห้งด้วยความดันสุญญากาศคงที่จะมีค่าสูงที่สุด

คำสำคัญ: จิง, ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ, จลนพลศาสตร์, สุญญากาศแบบจังหวะ, รังสีอินฟราเรดย่านไกล

Abstract

The objective of this research was to study of drying kinetics, color quality and specific energy consumption of ginger at drying temperature of 50°C, constant vacuum pressure at absolute pressure of 10 kPa and pulsed vacuum with pulse ratio of 10:2 and 15:2 minute, the ratio of vacuum pressure time and atmosphere pressure time. The result found that ginger was dried by pulsed vacuum drying could be achieved faster than constant vacuum drying. Moreover, increasing in pulse ration from 10:2 to 15:2 minute would affect to increased drying rate whereas drying time and specific energy consumption were decreased. The pulse ration at 15:2 minute had minimal specific energy consumption, $SEC=28.84 \text{ MJ/kg}_{\text{water-evap}}$. The color of ginger revealed the brightness value was similar in every experiments. The red and yellow values of the ginger dried by constant vacuum pressure were the highest.

Keywords: Ginger, Specific energy consumption, Kinetic, Pulsed vacuum, Far Infra-red

1. บทนำ

ขิง (Ginger) ชื่อวิทยาศาสตร์ Zingiber officinale Rosco เป็นไม้ล้มลุก มีเหง้าใต้ดิน สีสน้ำตาลแกมเหลือง เนื้อในสีเหลืองหรือเหลืองอ่อน ขิงเป็นสมุนไพรไทยชนิดหนึ่งที่ประโยชน์เป็นทั้งอาหารและยารักษาโรค เหง้าขิงมีรสหวาน เผ็ดและขม มีสรรพคุณช่วย ขับเสมหะ ขับลม ลดอาการจุกเสียดท้องอืดเฟ้อ แก้กลิ้นไส้อาเจียนและช่วยเจริญอาหาร (บุญยง อมรดลใจ, 2559) ปัจจุบันนอกจากใช้ขิงสดในการประกอบอาหารแล้ว ยังถูกนำไปแปรรูปโดยผ่านกระบวนการที่เหมาะสมเพื่อรักษาสรรพคุณของขิง และให้ง่ายต่อการเก็บรักษาและใช้ประโยชน์ เช่น ขิงผงสำหรับชงดื่ม ยาแคปซูลหรือขิงแผ่น เป็นต้น

การแปรรูปขิงโดยการอบแห้งเป็นวิธีการหนึ่งที่ยิยมใช้ในอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นกระบวนการที่สำคัญ ซึ่งต้องคำนึงถึงลักษณะของวัสดุที่อบแห้งและเลือกวิธีการอบแห้งที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพตามที่ต้องการ และควรอบแห้งได้อย่างรวดเร็วโดยใช้พลังงานในการอบแห้งที่ไม่สูงมากนักซึ่งเป็นการเพิ่มอัตราการผลิตและลดต้นทุนอบแห้ง การอบแห้งแบบสุญญากาศ (Vacuum drying) เป็นการอบแห้งที่อาศัยหลักการลดความดันในห้องอบแห้งส่งผลให้จุดเดือดของน้ำต่ำกว่า 100°C ซึ่งการลดจุดเดือดน้ำจะแปรผกผันกับระดับความเป็นสุญญากาศ เมื่อความดันต่ำลงจะทำให้

น้ำระเหยกลายเป็นไอที่อุณหภูมิต่ำได้ง่ายขึ้น สามารถเพิ่มอัตราการอบแห้งรวมถึงช่วยลดพลังงานในการอบแห้ง (อำไพศักดิ์ ทิบุญมา และศักดิ์ชัย จงจำ, 2553; กิตติศักดิ์ วิธินันทกิตต์ และ ศรีมา แจ้คำ, 2562) นอกจากนี้การอบแห้งด้วยเทคนิคสุญญากาศแบบจังหวะหรือการอบแห้งสุญญากาศแบบพัลส์ (Pulsed vacuum drying) โดยระบบควบคุมความดันของเครื่องอบแห้งจะเปลี่ยนแปลงสถานะความดันในห้องอบแห้งเป็นจังหวะระหว่างความดันสุญญากาศสลับกับความดันบรรยากาศตามช่วงเวลาที่กำหนด (Xie *et al.*, 2017) ทำให้ช่องว่างขนาดเล็กภายในวัสดุเกิดการขยายตัวทำให้น้ำภายในวัสดุแพร่ออกไปที่ผิวและระเหยได้ง่ายขึ้น ช่วยเพิ่มอัตราการอบแห้ง ลดเวลาและการใช้พลังงานได้ (วรอุฒิ มานะงาน และกิตติศักดิ์ วิธินันทกิตต์, 2563) ถึงแม้ว่าวัสดุที่อบแห้งด้วยสุญญากาศจะให้น้ำระเหยได้ที่อุณหภูมิต่ำ แต่ถ้าต้องการเพิ่มอัตราการอบแห้งหรือลดเวลาในการอบแห้งจำเป็นต้องมีพลังงานความร้อนมาช่วยในการอบแห้ง ซึ่งอินฟราเรดเป็นแหล่งพลังงานความร้อนที่นิยมใช้ เนื่องจากรังสีอินฟราเรดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สามารถแผ่ทะลุเข้าไปในเนื้อวัสดุ ส่งผลให้โมเลกุลของวัสดุเกิดการสั่นสะเทือนแล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนเกิดขึ้นในวัสดุ ทำให้อุณหภูมิในเนื้อวัสดุสูงขึ้นและน้ำเกิดการแพร่ไปยังผิววัสดุได้เร็วขึ้น ช่วยลดเวลาในการอบแห้งและช่วยลดการสูญเสียคุณภาพของวัสดุหลังอบแห้ง (อำไพศักดิ์ ทิบุญมา และศักดิ์ชัย จงจำ, 2553)

ดังนั้นจากข้อได้เปรียบดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะอบแห้งขึ้นจึงโดยใช้สุญญากาศแบบคงที่และสุญญากาศแบบจังหวะร่วมกับรังสีอินฟราเรดย่านไกล เพื่อศึกษาอัตราส่วนพัลส์ต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้ง คุณภาพด้านสีและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้ง

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

2.1 เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งซึ่งด้วยเทคนิคสุญญากาศแบบจังหวะ

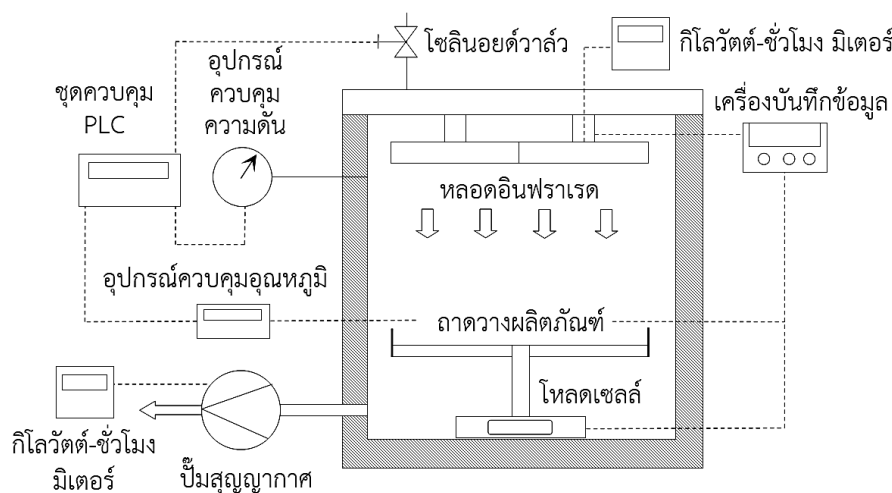
2.2 เพื่อศึกษาสีของขึ้นจึงหลังอบแห้ง และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

การอบแห้งซึ่งด้วยสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรดย่านไกลที่อุณหภูมิอบแห้ง 50°C ความดันสัมบูรณ์คงที่ 10 kPa และสุญญากาศแบบจังหวะที่ความดันสัมบูรณ์ 10 kPa อัตราส่วนพัลส์ 10:2 และ 15:2 นาที จากความชื้นเริ่มต้นประมาณ 1,230% d.b. จนได้ความชื้นสุดท้ายประมาณ 10-13% d.b. (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2526) และทดสอบคุณภาพด้านสี ปริมาณน้ำอิสระและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้ง ซึ่งมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

3.1 เครื่องอบแห้งสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดไกล

เครื่องอบแห้งสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดไกลที่ใช้ในการทดลองดังภาพที่ 1 ประกอบด้วย ห้องอบแห้งทรงกระบอกวัสดุ Stainless Steel ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 40 cm สูง 60 cm ทุ้มฉนวนหนา 2 cm แหล่งให้ความร้อนเป็นหลอดอินฟราเรดยี่ห้อ Infrapara รุ่น A-1 ขนาด 250 W จำนวน 4 หลอด ติดตั้งที่ฝาปิดด้านบนของห้องอบแห้งและมีระยะห่างประมาณ 20 cm จากถาดวางผลิตภัณฑ์อบแห้ง สามารถทำความดันสุญญากาศได้ 0.2 kPa ด้วยปั๊มสุญญากาศขนาด 350 W



ภาพที่ 1 เครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบพัลส์ร่วมกับอินฟราเรดไกล

การอบแห้งจะถูกควบคุมอุณหภูมิแบบ PID (Temperature controller) ยี่ห้อ Omron รุ่น E5CC ต่อเชื่อมกับสายสัญญาณเทอร์โมคัปเปิล Type K มีความแม่นยำในการควบคุมอุณหภูมิอบแห้ง $\pm 1^{\circ}\text{C}$ และควบคุมแรงดันแบบดิจิทัล (Pressure controller) ยี่ห้อ Panasonic รุ่น DP-101 ซึ่งจะทำงานควบคู่กับชุดควบคุม PLC ยี่ห้อ Mitsubishi รุ่น FX1s-20MT ในสร้างสภาวะความดันสุญญากาศแบบจังหวะตามช่วงเวลา t_v นาที สลับกับความดันบรรยากาศตามช่วงเวลา t_a นาที หรืออัตราส่วนพัลส์ (Pulsed ratio) $t_v:t_a$ นาที โดยใช้โซลินอยด์วาล์ว Pneumatic pressure รุ่น ADK11-15A-02C-AC220V ทำหน้าที่ปรับเปลี่ยนแรงดัน สำหรับการบันทึกน้ำหนักผลิตภัณฑ์จะใช้โหลดเซลล์ขนาด 5 kg ความละเอียดของค่าแรงดันเอาท์พุท 1mV/V และเครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger) ยี่ห้อ Graphtec midi logger รุ่น GL820 ซึ่งรับสัญญาณจากสายเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ช่วงอุณหภูมิ -200 ถึง 1250°C ในการบันทึกการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของห้องอบแห้ง และบันทึกการใช้พลังงานไฟฟ้าในการอบแห้งด้วยกิโลวัตต์-ชั่วโมง มิเตอร์ ความละเอียด 0.01 kWh

3.2 วิธีการทดลอง

ขิงที่ใช้ในการทดลองมีอายุระหว่าง 10-12 เดือน ชื้อจากตลาดสดอำเภอเมืองสมุทรปราการ นำมาล้างทำความสะอาดวางไว้ให้สะเด็ดน้ำแล้วหั่นตามแนวเส้นโยหนาประมาณ 3 mm นำขิงไปวางเรียงบนถาดให้ได้น้ำหนักประมาณ 200 g แล้วนำไปอบแห้งโดยมีเงื่อนไขในการทดลองที่อุณหภูมิอบแห้ง 50°C ที่ความดันสัมบูรณ์คงที่ (VD) 10 kPa บันทึกค่าการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักและอุณหภูมิด้วย Data logger อบแห้งจนได้ความชื้นของขิงประมาณ 10-13% d.b. เมื่อสิ้นสุดการทดลอง บันทึกความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจาก กิโลวัตต์-ชั่วโมง มิเตอร์ แล้วนำตัวอย่างขิงไปหาความชื้น (AOAC, 2000) และคุณภาพด้านอื่นต่อไป จากนั้นทดลองอบแห้งขิงที่อุณหภูมิ 50°C สูญญากาศแบบจังหวะ (PVD) ที่ความดันสัมบูรณ์ 10 kPa ที่อัตราส่วนพัลส์หรือช่วงเวลาที่ความดันในห้องอบแห้งเป็นสูญญากาศต่อช่วงเวลาที่ความดันในห้องอบแห้งเป็นบรรยากาศ ($t_v:t_a$) 10:2 และ 15:2 นาที โดยเครื่องอบแห้งจะทำงานสลับไปมาระหว่างความดันสูญญากาศและความดันบรรยากาศตามช่วงเวลาที่กำหนดจนสิ้นสุดกระบวนการอบแห้ง (Xie, Gao, Liu & Xiao, 2017)

3.3 การหาความชื้นของขิง

นำขิงไปชั่งน้ำหนัก (w) แล้วนำไปอบแห้งในตู้อบร้อน (Hot air oven) ด้วยอุณหภูมิ 103°C เป็นระยะเวลาอบแห้ง 72 ชั่วโมง (AOAC, 2000) เพื่อหามวลแห้ง (d) แล้วนำไปคำนวณหาปริมาณความชื้นได้จากสมการที่ 1 (สมชาติ โสภณธนฤทธิ์, 2540)

$$MC = \left(\frac{w-d}{d} \right) \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ MC คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (%d.b.) w คือ มวลของขิงชิ้น (g) และ d คือ มวลของขิงแห้ง (g)

สำหรับอัตราการอบแห้ง (Drying rate) สามารถหาได้ดังสมการที่ 2 (อำไพศักดิ์ พิบุญมา และศักดิ์ชัย จงจำ, 2553)

$$DR = \frac{M_i - M_t}{t} \quad (2)$$

เมื่อ DR คือ อัตราการอบแห้ง ($\text{kg}_{\text{water}}/\text{kg}_{\text{dry solid}}\cdot\text{min}$) M_i คือ ความชื้นเริ่มต้น (d.b.) M_t คือ ความชื้นที่เวลาใดๆ (d.b.) และ t คือ เวลาอบแห้ง (min)

3.4 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumptions, SEC) ที่ใช้ในการอบแห้งซึ่งสามารถหาได้จากน้ำหนักของซิงก่อนและหลังอบแห้ง และปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมของปั๊มสุญญากาศและหลอดอินฟราเรดที่บันทึกด้วย กิโลวัตต์-ชั่วโมง มิเตอร์ (อ่านค่าได้ละเอียด 0.01 kWh) นำมาคำนวณหาความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะได้ดังสมการที่ 3 (วรุณี มานะงาน และ กิตติศักดิ์ วิธินันทกิจ, 2563)

$$SEC = \frac{3.6 E_p}{m_i - m_f} \quad (3)$$

เมื่อ SEC คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (MJ/kg_{water-evap.}) E_p คือ ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง (kWh) m_i คือ น้ำหนักของซิงก่อนอบแห้ง (g) และ m_f คือ น้ำหนักของซิงหลังอบแห้ง

3.5 การทดสอบคุณภาพด้านสี

ทดสอบคุณภาพด้านสีของซิงด้วยเครื่อง 3HN รุ่น Portable colorimeter NH310 ช่วงอุณหภูมิการวัด -10 ถึง 40°C ช่วงความชื้นสัมพัทธ์น้อยกว่า 85% ความละเอียดการแสดงผล 0.01 ซึ่งจะวัดสีในเทอมของความสว่างหรือมืด (Lightness, L) ค่าสีแดงหรือเขียว (Redness, a) และความเหลืองหรือน้ำเงิน (Yellowness, b) โดยวัดสีของซิงทั้งสองด้านที่ตำแหน่งซ้ายขวา บันทึกค่า $L^* a^* b^*$ ทดลองซ้ำจำนวน 30 ครั้ง แล้วนำค่าสีที่วัดได้ไปวิเคราะห์ผลทางสถิติ และรายงานผลที่ได้เป็นค่าเฉลี่ย

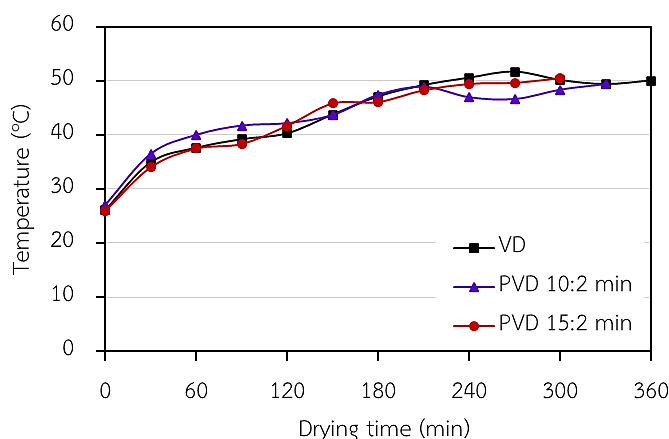
3.6 การหาปริมาณน้ำอิสระ

นำซิงมาหั่นเป็นชิ้นเล็กๆ ใส่ภาชนะทดลองแบบตลับพลาสติกสำหรับวัดค่าปริมาณน้ำอิสระ (Water activity, a_w) แล้วนำไปใส่เครื่องวัดค่าปริมาณน้ำอิสระ รุ่น AQUALAB PRE มีช่วงการวัดปริมาณน้ำอิสระ 0.05-1.00 ความละเอียดการแสดงผล 0.001 ความแม่นยำ ± 0.01 ควบคุมอุณหภูมิที่ 25°C ตั้งเวลาวัดค่าประมาณ 5 นาที รอจนกระทั่งเครื่องวัดส่งเสียงสัญญาณเตือนแล้วบันทึกค่าที่อ่านได้ ซึ่งปริมาณน้ำอิสระที่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน คือ น้อยกว่า 0.6 โดยทดลองวัดปริมาณน้ำอิสระของซิงจำนวน 5 ตัวอย่าง ต่อเงื่อนไขการทดลอง แล้วนำผลที่ได้ไปวิเคราะห์ผลทางสถิติและรายงานผลที่ได้เป็นค่าเฉลี่ย

4. ผลการวิจัย

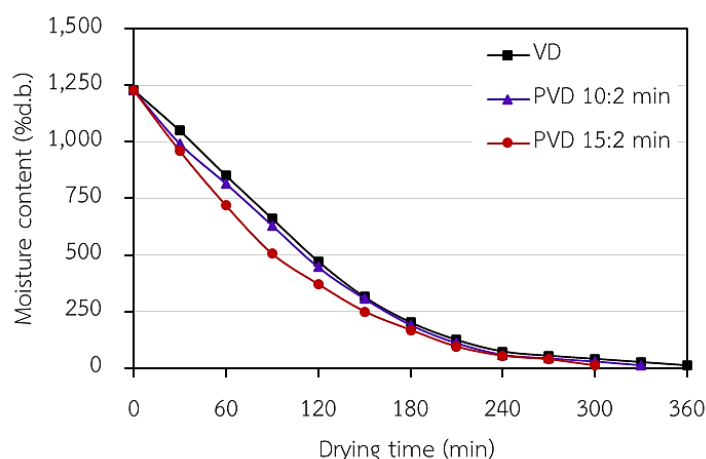
4.1 จลนพลศาสตร์การอบแห้ง

เมื่ออบแห้งขึ้นซึ่งที่อุณหภูมิ 50°C และความดันสัมบูรณ์คงที่ (VD) 10 kPa อุณหภูมิของขึ้นซึ่งจะค่อยๆ สูงขึ้นดังภาพที่ 2 จากอุณหภูมิเริ่มต้นประมาณ 26°C จนมีอุณหภูมิประมาณ 50°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง โดยใช้เวลาประมาณ 210 นาที จากนั้นจะมีค่าเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยอยู่ในช่วงอุณหภูมิอบแห้งจนถึงสุดกระบวนการอบแห้ง ซึ่งการอบแห้งขึ้นซึ่งที่ความดันสัมบูรณ์ 10 kPa และสูญญากาศแบบจังหวะ (PVD) อัตราส่วนพัลส์ 10:2 และ 15:2 นาที มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิคล้ายกับการอบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์คงที่

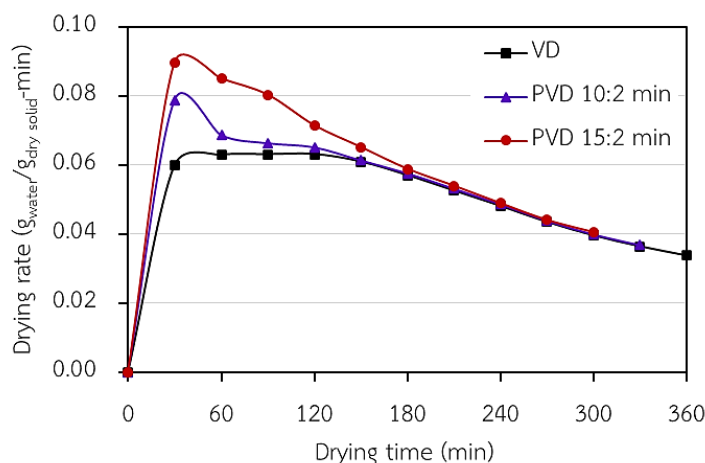


ภาพที่ 2 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของขึ้นซึ่งที่อบแห้งด้วยอุณหภูมิ 50°C และความดันสัมบูรณ์ 10 kPa

การเปลี่ยนแปลงความชื้นของขึ้นซึ่งเปรียบเทียบกับเวลาที่อุณหภูมิอบแห้ง 50°C และความดันสัมบูรณ์ 10 kPa ดังภาพที่ 3 พบว่า ในช่วง 60-90 นาที แรกของการอบแห้ง ความชื้นของขึ้นซึ่งจะลดลงอย่างรวดเร็วจากความชื้นเริ่มต้นประมาณ 1,230% d.b. หลังจากนั้นความชื้นจะลดลงอย่างช้าๆ และเริ่มคงที่หลังจาก 270-300 นาที เป็นต้นไป เมื่อพิจารณาการอบแห้งแบบความดันคงที่ (VD) พบว่าการลดลงของความชื้นช้าที่สุดแต่ใกล้เคียงกับการอบแห้งที่สูญญากาศแบบจังหวะ (PVD) ที่อัตราส่วนพัลส์ 10:2 นาที ส่วนการอบแห้งขึ้นซึ่งที่อัตราส่วนพัลส์ 15:2 นาที ความชื้นจะลดลงเร็วที่สุดโดยใช้เวลาในการอบแห้ง 300 นาที ได้ความชื้นประมาณ 10.79% d.b. ซึ่งการเปลี่ยนแปลงความชื้นจะสัมพันธ์กับอัตราการอบแห้งของขึ้นซึ่งดังภาพที่ 4 พบว่า การอบแห้งขึ้นซึ่งที่อัตราส่วนพัลส์ 15:2 นาที จะมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งที่อัตราส่วนพัลส์ 10:2 นาที และที่ความดันสัมบูรณ์คงที่ โดยเฉลี่ยประมาณ 9.19% และ 16.71% ตามลำดับ



ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของขิงและเวลา ที่อุณหภูมิอบแห้ง 50°C และความดันสัมบูรณ์ 10 kPa



ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งและเวลา ที่อุณหภูมิอบแห้ง 50°C และความดันสัมบูรณ์ 10 kPa

4.2 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งขิงที่อุณหภูมิอบแห้ง 50°C ความดันสัมบูรณ์คงที่ (VD) 10 kPa และสุญญากาศแบบจังหวะ (PVD) ที่อัตราส่วนพัลส์ 10:2 และ 15:2 นาที มีค่า 34.48 32.59 และ 28.84 MJ/kg_{water-evap.} และใช้เวลาในการอบแห้ง 360 330 และ 300 นาที ตามลำดับ ดังตารางที่ 1 ซึ่งการอบแห้งขิงที่อัตราส่วนพัลส์ 15:2 นาที จะมีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะน้อยกว่าที่อัตราส่วนพัลส์ 10:2 นาที และที่ความดันสัมบูรณ์คงที่ โดยเฉลี่ยประมาณ 13.00% และ 19.55% ตามลำดับ เมื่อแยกพิจารณาแต่ละเงื่อนไขการทดลองพบว่า พลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้กับปั๊มสุญญากาศมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหลอดอินฟราเรดมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงคล้ายการความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

ตารางที่ 1 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

Absolute pressure (kPa)	Drying time (min)	Electrical energy of pump (kWh)	Electrical energy of infrared (kWh)	SEC (MJ/kg _{water evap.})
VD	360	0.75	0.90	34.48
PVD 10:2 min	330	0.80	0.80	32.59
PVD 15:2 min	300	0.80	0.65	28.84

4.3 สีและปริมาณน้ำอิสระ

ปริมาณน้ำอิสระของขึ้นฉิงหลังอบแห้งทุกเงื่อนไขการทดลองมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ($a_w < 0.6$) โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.440-0.509 ดังตารางที่ 2 สำหรับค่าความสว่างของขึ้นฉิงแต่ละการทดลองมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่มีความสว่างลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับขิงสด ส่วนค่าสีแดงมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับขิงสด โดยการอบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์คงที่มีค่าสีแดงสูงที่สุด และค่าสีเหลืองของขิงทุกการทดลองมีค่าลดลงอย่างชัดเจนซึ่งมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับขิงสด

ตารางที่ 2 สีและปริมาณน้ำอิสระ

Absolute pressure (kPa)	Moisture content (%d.b.)	Water activity	Colour		
			L*	a*	B*
Fresh	11.70	0.995±0.004 ^a	77.25±3.20 ^a	1.70±0.51 ^b	7.80±3.80 ^a
VD	11.70	0.496±0.073 ^b	72.34±2.78 ^b	4.21±1.06 ^a	4.27±2.18 ^b
PVD 10:2 min	12.60	0.509±0.060 ^b	71.90±4.44 ^b	1.53±1.40 ^b	1.47±2.68 ^c
PVD 15:2 min	10.79	0.440±0.023 ^b	73.03±3.84 ^b	1.71±1.15 ^b	2.60±2.42 ^{bc}

a-c in the same column with different superscripts mean that the data significantly different ($p < 0.05$)

5. สรุปผลและการอภิปรายผล

การอบแห้งขึ้นฉิงที่อุณหภูมิอบแห้ง 50°C ความดันสัมบูรณ์คงที่ (VD) 10 kPa และความดันสัมบูรณ์ 10 kPa ที่สุญญากาศแบบจังหวะ (PVD) อัตราส่วนพัลส์ 10:2 และ 15:2 นาที จากผลการทดลองพบว่า ในช่วงแรกอุณหภูมิของขึ้นฉิงจะค่อยๆ เพิ่มขึ้น เนื่องจากความร้อนที่ขึ้นฉิงได้รับมาจากการแผ่รังสีส่วนใหญ่จะใช้ในการระเหยน้ำ เมื่อผิวของขึ้นฉิงเริ่มแห้งน้ำภายในวัสดุจะเคลื่อนที่มาที่ผิว

ช้ากว่าการระเหยน้ำจากผิวสู่บรรยากาศซึ่งส่งผลให้อัตราการอบแห้งลดลง (สมชาติ โสภณธรณฤทธิ์, 2540) ซึ่งความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำน้อยลงแต่ความร้อนที่ได้รับมาจะใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิขึ้นจึงให้สูงขึ้นจนมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิอบแห้ง

เมื่อพิจารณาการอบแห้งขึ้นจึงแบบ PVD อัตราส่วนพัลส์ 15:2 นาติ จะมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งแบบ PVD อัตราส่วนพัลส์ 10:2 นาติ และแบบ VD เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความดันในห้องอบแห้งจากความดันสุญญากาศเป็นความดันบรรยากาศและการเพิ่มระยะเวลาช่วงที่เป็นความดันสุญญากาศจาก 10 เป็น 15 นาติ ส่งผลต่อการขยายช่องว่างหรือรูพรุนภายในเนื้อขึ้นจึง ทำให้เกิดการแพร่ของน้ำภายในวัสดุออกสู่ผิวได้ง่ายขึ้นและมีผลต่ออัตราการระเหยน้ำออกจากขึ้นจึงมากขึ้น (Xie, Gao, Liu & Xiao, 2017; Zhang *et al.*, 2018) นอกจากนี้การอบแห้งแบบ PVD เมื่อความดันในห้องอบแห้งเปลี่ยนจากความดันสุญญากาศเป็นความดันบรรยากาศ ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงความดันในห้องอบแห้งจะเกิดการไหลเวียนของอากาศจากภายนอกที่มีความชื้นต่ำกว่าไหลเข้ามาแทนที่ ส่งผลต่อการระเหยน้ำออกจากขึ้นจึงได้ดีขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มอัตราการอบแห้งให้สูงขึ้นและใช้เวลาอบแห้งน้อยลง ทำให้ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีแนวโน้มลดลงด้วย (วรวิทย์ มานะงาน และ กิตติศักดิ์ วิจิณันทกิจ, 2563; Zhang *et al.*, 2018) เมื่อพิจารณาด้านคุณภาพพบว่า ปริมาณน้ำอิสระของขึ้นจึงหลังอบแห้งทุกเงื่อนไขการทดลองมีค่าน้อยกว่า 0.6 อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานอาหารแห้ง ซึ่งเชื้อจุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญเติบโตได้ทำให้สามารถเก็บรักษาขึ้นจึงได้นานขึ้น สำหรับค่าสีของขึ้นจึงหลังอบแห้งพบว่า ความสว่างและสีเหลืองมีค่าลดลงหรือสีขึ้นจึงคล้ำขึ้นเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล แต่ความสว่างมีค่าลดลงเล็กน้อย เนื่องจากการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ 50°C จึงไม่ส่งผลให้ค่าความสว่างของขึ้นจึงเปลี่ยนแปลงมากนัก

ดังนั้นการอบแห้งขึ้นจึงจากแบบสุญญากาศคงที่ (VD) เป็นสุญญากาศแบบจังหวะ (PVD) และการอบแห้งที่สุญญากาศแบบจังหวะโดยเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนพัลส์จาก 12:2 เป็น 15:4 นาติ มีผลต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งขึ้นจึง ทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะน้อยลง โดยการอบแห้งขึ้นจึงที่ความดันสัมบูรณ์ 10 kPa อุณหภูมิอบแห้ง 50°C อัตราส่วนพัลส์ 15:2 นาติ ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยที่สุด 300 นาติ ได้ความชื้นขึ้นจึง 10.79% d.b. มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำสุด 28.84 MJ/kg_{water-evap.} และมีค่าความสว่างและสีแดงใกล้เคียงกับขึ้นจึงสด

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม และคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก ที่ให้การสนับสนุนในงานวิจัยนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- กิตติศักดิ์ เวชันทิกิตต์, และศรีมา แจ้คำ. (2562). แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งข้าด้วย
สุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรด. **วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต**, 9(3), 29-44.
- บุญยง อมรตลใจ. (2559). การใช้ขิงรักษาและบำบัดอาการโรคข้อเสื่อม. **วารสารสุขภาพกับการ
จัดการสุขภาพ**, 3(2), 13-22.
- วรวิทย์ มานะงาน และกิตติศักดิ์ เวชันทิกิตต์. (2563). การอบแห้งดอกบัวด้วยเทคนิคสุญญากาศ
แบบพลัสและอินฟราเรดร่วมกับการฝังในซิลิกาทราย. **วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต**, 10(3),
84-98.
- สมชาติ โสภณรณฤทธิ์. (2540). **การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท**. มหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. กรุงเทพฯ.
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2526). **มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม: ขิงแห้ง
(มอก. 458-2526)**. กรุงเทพฯ.
- อำไพศักดิ์ ทิบุญมา, และศักดิ์ชัย จงจำ. (2553). การอบแห้งขิงด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมอินฟราเรด.
วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา, 15(2), 76-86.
- AOAC (Association of Official Analytical Chemists). (2000). **Official methods of
analysis. 17thed. association of official analytical chemists**. Maryland:
Gaithersburg, 2000.
- Xie, Y., Gao, Z., Liu, Y., & Xiao, H. (2017). Pulsed vacuum drying of rhizome dioscoreae
slices. **LWT-Food Science and Technology**, 80, 237-249.
- Xie, L., Mujumdar, A.S., Fang, X.M., Wang, J., Dai, J.W., Du, Z.L., Xiao, H.W., Lui, Y., 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
attibutes. **Food and Bioproducts Processing**, 102, 320-331.
- Zhang, W., Pan, Z., Xiao, H., Zheng, Z., Chen, C., Gao, Z. (2018). Pulsed vacuum drying
(PVD) technology improves drying efficiency and quality of *Poria* cubes. **Drying
Technology**, 36(8), 908-921.