

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งข้าวด้วยสุญญากาศ
ร่วมกับรังสีอินฟราเรด

**MATHEMATICAL MODELING OF COMBINED INFRARED AND
VACUUM DRYING OF GALANGALS**

กิตติศักดิ์ วิธินันทกิตต์¹ และ ศรีมา แจ้คำ^{2*}

¹อาจารย์, สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก, 43 ม.6 ต. บางพระ อ. ศรีราชา จ. ชลบุรี 20110,
k_yong28@hotmail.com

²อาจารย์, สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก, 43 ม.6 ต. บางพระ อ. ศรีราชา จ. ชลบุรี 20110,
srima_j@hotmail.com

Kittisak Witinantakit¹ and Srima Jaekhom^{2*}

¹Lecturer, Energy Technology Department, Faculty of Science and Technology,
Rajamangala University of Technology Tawan-ok, 43 Moo 6 Bangpra Subdistrict,
Sriracha District, Choburi 20110, Thailand, k_yong28@hotmail.com

²Lecturer, Energy Technology Department, Faculty of Science and Technology,
Rajamangala University of Technology Tawan-ok, 43 Moo 6 Bangpra Subdistrict,
Sriracha District, Choburi 20110, Thailand, srima_j@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการอบแห้งข้าวด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรด และหาสมการการอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมสำหรับทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งข้าว โดยทำการทดลองอบแห้งภายใต้ความดันสัมบูรณ์ 5 และ 15 kPa และอุณหภูมิอบแห้ง 45 และ 55 °C ซึ่งพารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษา คือ อัตราส่วนความชื้น อัตราการอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ และคุณภาพด้านสี ผลจากการศึกษาพบว่า เมื่อลดความดันสัมบูรณ์หรือเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งจะทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลง การใช้อุณหภูมิการอบแห้งที่สูงกว่าจุดเดือดของน้ำมากจะส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงของสีมากขึ้นด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าสมการของ Midilli สามารถทำนายผลการอบแห้งข้าวได้ดีที่สุด โดยให้ค่า R^2 (0.99855) มากที่สุด ค่า RMSE (0.01201) และค่า χ^2 (0.00029) น้อยที่สุด

คำสำคัญ: ข่า, แบบจำลองเอมพิริคัล, รังสีอินฟราเรด, สูญญากาศ

ABSTRACT

This research studied to galangal drying using infrared-vacuum technique and to discover the appropriate thin layer equation for predicting the drying kinetic of galangal. To achieve these purposes, experiments were conducted on the following conditions: absolute pressure in drying chamber of 5 and 15 kPa and drying temperature of 45 and 55 °C. The effects of drying conditions on moisture ratio, drying rate, specific energy consumption and color of galangal were investigated. Furthermore, color quality of galangal was also explored. Experimental results shown that the drying rate shall be increased but specific energy consumption shall be decreased by reducing absolute pressure or increasing temperature. Moreover, the changing of color shall be affected from drying temperature which higher than boiling point of water. In addition, it was found that thin layer equation of Midilli providing the highest coefficient of determination (R^2) by 0.99855 and the lowest of root mean square error (RMSE) by 0.01201 and χ^2 by 0.00029.

KEYWORDS: Galangals, empirical model, infrared, vacuum

1. บทนำ

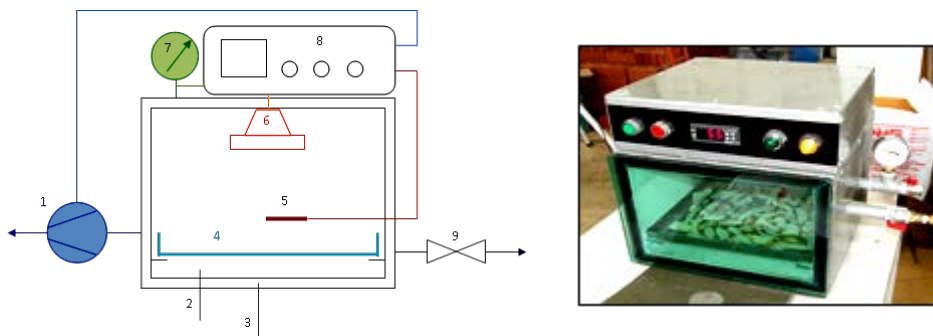
ประเทศไทยตั้งอยู่ในพื้นที่เขตร้อนมีความหลากหลายของสมุนไพรหลายชนิด จากข้อมูลของกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ พบว่าพันธุ์พืชในประเทศไทยที่ทราบชื่อวิทยาศาสตร์แล้วมีกว่า 2 หมื่นชนิด ในจำนวนนี้ถูกนำมาใช้ประโยชน์เป็นสมุนไพรกว่า 1,800 ชนิด กระจายอยู่ในทุกภูมิภาคของประเทศ อีกทั้งประเทศไทยมีตำรับตำราที่เป็นยาประมาณสองหมื่นกว่าชนิด แต่มีการนำมาใช้และขึ้นทะเบียนหลักร้อยละเท่านั้น เพราะฉะนั้นประเทศไทยมีโอกาสมากที่จะนำสมุนไพรมาพัฒนาเป็นยารักษาโรคหรือส่วนผสมในผลิตภัณฑ์ดูแลสุขภาพ เช่น เวชสำอาง หรือผสมในเครื่องดื่มให้เป็นเครื่องดื่มดูแลสุขภาพ สมุนไพรหายากๆ ของโลกปัจจุบัน คือ จีนและอินเดีย อันดับ 3 อาจจะมีญี่ปุ่นและเกาหลีใต้ ส่วนของประเทศไทยตลาดสมุนไพรโตขึ้นอย่างรวดเร็ว มีการคาดการณ์ว่าจะโตขึ้นราวร้อยละ 10 ต่อปี แต่ปี 2560 โตขึ้นถึงกว่าร้อยละ 30 ซึ่งเป็นข้อมูลจากศูนย์ศึกษาการค้าระหว่างประเทศ ขณะที่ข้อมูลของ Euro monitor-Herbal/Traditional Products in Thailand ระบุว่าเมื่อปี 2559 ตลาดสมุนไพรทั้งเวชสำอาง อาหารเสริม เครื่องดื่มและสมุนไพรแห้ง สมุนไพรสด ในประเทศมีมูลค่าประมาณ 3.92 หมื่นล้านบาท และคาดว่าจะขยายตัวเป็น 5.69 หมื่นล้านบาท ในปี 2564 ซึ่งถือว่าการขยายตัวมีแนวโน้มที่ดีในเชิงเศรษฐกิจ [1]

ข่า (Galangals) นอกจากจะใช้เป็นเครื่องเทศในการประกอบอาหารแล้วยังมีคุณสมบัติเป็น สมุนไพรพื้นบ้านอีกด้วย เหง้าข่าประกอบด้วยน้ำมันหอมระเหย (Essential oil) ประกอบด้วยสาร ชนิด cinematic, cineol, eugenic camphor, pinions เป็นต้น น้ำมันนี้มีฤทธิ์ต้านเชื้อราต่างๆ มีฤทธิ์ ขั้วลบด้านเชื้อแบคทีเรีย สรรพคุณช่วยบรรเทาอาการปวดตามข้อ บรรเทาอาการปวดหลอดลม อักเสบ บรรเทาอาการปวดท้อง ท้องร่วง ขมาเชื้อบิด ช่วยย่อยอาหาร บรรเทาอาการท้องอืดท้องเฟ้อ บรรเทาอาการของโรคผิวหนัง กลาก เคลื้อน แก้มพิษ และบรรเทาอาการปวดฟัน [2, 3] การอบแห้งผลิตทางการเกษตรและสมุนไพรมีวัตถุประสงค์เพื่อรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้เก็บ ได้ยาวนานยิ่งขึ้น ทั้งการตากแห้งแบบธรรมชาติ การอบแห้งด้วยลมร้อน การอบแห้งด้วย ไมโครเวฟ [4] การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด [5] เป็นต้น ซึ่งการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดนั้น ก่อนข้างมีความโดดเด่น คือ รังสีอินฟราเรดสามารถทะลุทะลวงผ่านวัสดุเข้าไปทำให้โมเลกุลของ วัสดุนั้นเกิดการสั่นสะเทือนมากกว่าปกติ ทำให้น้ำในสถานะของเหลวและไอน้ำเกิดการแพร่ออกไป ยังผิวของวัสดุ ซึ่งจะมีผลค่อนข้างมากในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง [6] อีกทั้งหากทำการอบแห้ง ภายใต้อากาศสุญญากาศ ซึ่งจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งส่งผลให้อัตราการอบแห้ง สูงขึ้นด้วย เนื่องจากจุดเดือดของน้ำต่ำลง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาการอบแห้ง ข่าด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรด เพื่อศึกษาอัตราส่วนความชื้น อัตราการอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ คุณภาพด้านสี และสร้างแบบจำลองเอมพิริคัลในการทำนาย จลนศาสตร์การอบแห้งข่า โดยกรณีศึกษานี้ทางผู้วิจัยหวังว่าจะเป็นประโยชน์เพื่อประยุกต์ใช้ในพืช สมุนไพรชนิดอื่นต่อไป

2. อุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย

2.1 เครื่องอบแห้ง

เครื่องอบแห้งสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรด ประกอบด้วยปั๊มสุญญากาศ (liquid ring) ขนาดมอเตอร์ 1/3 hp ทำความดันสมบูรณ์ (Absolute pressure) ได้ถึง 10 Pa ซึ่งมีอัตราการทำ สุญญากาศได้มากกว่าขอบเขตในการศึกษา อัตราการไหลที่ 6 m³/hr ภายในมีแท่งรังสีอินฟราเรด ขนาด 250 W จำนวน 1 แท่ง ยี่ห้อ Infrapara รุ่น EL-2-250 ขนาด 122x122x55 mm³ พร้อมด้วย อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิและความดันดังรูปที่ 1 ซึ่งมีหมายเลขกำกับดังนี้ (1) ปั๊มสุญญากาศ (2) ห้องอบแห้ง (3) ฉนวนกันความร้อน (4) ถาดใส่ผลิตภัณฑ์ (5) เทอร์โมคัปเปิล (6) แท่งรังสี อินฟราเรดไกล (7) มาตรวัดความดันสุญญากาศ (8) ชุดควบคุมอุณหภูมิและความดัน และ (9) Vacuum break-up valve



รูปที่ 1 เครื่องอบแห้งสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรด

2.2 วิธีการทดลอง

การอบแห้งข้าด้วยเครื่องอบแห้งสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกลที่เงื่อนไขการทดลอง คือ ความดันสัมบูรณ์ภายในห้องอบแห้ง 5 และ 15 kPa และอุณหภูมิอบแห้ง 45 และ 55 °C ดำเนินการทดลอง โดยหั่นข้าวออกเป็นแผ่นหนาประมาณ 3 มิลลิเมตร นำเข้ามาซึ่งน้ำหนักประมาณ 100 g วางลงบนถาดในเครื่องอบแห้งโดยไม่ให้แผ่นข้าทับกัน เติมน้ำสุญญากาศเพื่อดึงอากาศออกจากห้องอบแห้งพร้อมเปิดแท่งรังสีอินฟราเรดไกล ตั้งค่าควบคุมความดันและอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งตามเงื่อนไขการทดลอง บันทึกน้ำหนักข้าทุกๆ 30 min และบันทึกค่าพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหลอดรังสีอินฟราเรดและปั๊มสุญญากาศ ทำการอบแห้งจนได้ความชื้นสุดท้ายที่ต้องการ เสร็จแล้วทำการหยุดเครื่องอบแห้งและบันทึกน้ำหนักของข้าหลังการอบแห้ง จากนั้นนำข้าไปอบแห้งในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 103 °C เป็นเวลา 72 hr [7] แล้วนำค่าน้ำหนักที่ได้ไปคำนวณหาปริมาณความชื้น

2.3 การทดสอบคุณภาพด้านสีของข้า

การทดสอบคุณภาพด้านสีของข้า ทดสอบสีด้วยเครื่อง Spectrophotometer ยี่ห้อ KONICA MINOLTA รุ่น CM-3500d เป็นการทดสอบสีแบบ L a b โดยจะนำค่าความแตกต่างของสีผลิตภัณฑ์ก่อนการอบแห้งและหลังจากอบแห้งมาเปรียบเทียบกัน เพื่อดูว่าผลิตภัณฑ์ที่อบแห้งที่สภาวะใดมีค่า ΔE น้อยที่สุด ตามสมการที่ (1) ซึ่งจะถือว่าเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีค่าสีใกล้เคียงกับข้าสดก่อนอบแห้งมากที่สุด โดยใช้แสง Daylight ที่ 6,500 K ในการวัดสี

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2} \quad (1)$$

โดยที่ ΔE คือ ความแตกต่างกันของสี ΔL คือ ความแตกต่างของความสว่าง Δa คือ ความแตกต่างของความเป็นสีแดงถึงเขียว และ Δb คือ ความแตกต่างของความเป็นสีเหลืองถึงน้ำเงิน

2.4 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

การคำนวณหาค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption) ที่ใช้ในการอบแห้ง นำข้อมูลที่ได้จากการทดลอง คือ มวลวัสดุก่อนการอบแห้งและหลังการอบแห้ง และปริมาณการใช้พลังงานตลอดกระบวนการอบแห้ง มาคำนวณหาความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งซ้ำ ได้จากสมการที่ (2)

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

เมื่อ SEC คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ($\text{MJ/kg}_{\text{water evap.}}$) m_i คือ มวลของซ้ำก่อนอบแห้ง (kg) m_f คือ มวลของซ้ำหลังอบแห้ง (kg) และ E_p คือ ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (kWh)

2.5 แบบจำลองเอมพิริคัล

การศึกษาจลนพลศาสตร์ (Kinetic) การอบแห้งซ้ำโดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายพฤติกรรมของการอบแห้ง โดยแบบจำลองเอมพิริคัลเป็นแบบจำลองการถ่ายเทมวลที่นิยมใช้ในการศึกษาการอบแห้งอาหารหรือวัสดุทางการเกษตร [8-9] เนื่องจากเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีกระบวนการวิเคราะห์ที่ง่ายและไม่ซับซ้อน แบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้จำนวน 12 สมการ แสดงดังตารางที่ 1 ซึ่งแบบจำลองเอมพิริคัลจะแสดงอยู่ในรูปแบบความสัมพันธ์กับอัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio) โดยอัตราส่วนความชื้นสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3)

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_i - M_{eq}} \quad (3)$$

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

ในงานวิจัยนี้ไม่คิดความชื้นสมดุล เนื่องจากเป็นการอบแห้งที่สภาวะสูญญากาศ ความชื้นสมดุลจึงมีค่าน้อยกว่าความชื้นเริ่มต้นและความชื้นที่เวลาใดๆ ก่อนข้างมาก ดังนั้นอัตราส่วนความชื้นสามารถจัดรูปใหม่ได้ดังสมการที่ (4) [8]

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

การหารูปแบบสมการเอมพิริคัลที่เหมาะสมกับการทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้ง จะใช้ค่าอัตราส่วนความชื้นจากการทดลองมาหาค่าพารามิเตอร์ของตัวแปรต่างๆ ของสมการในตารางที่ 1 โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์สมการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear regression) ซึ่งมีดัชนีบ่งชี้ความสามารถในการทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้ง คือ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2) รากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square error, RMSE) และการลดลงไคกำลังสอง (Chi-square, χ^2) [8-10] ดังสมการที่ (5)-(6) โดยสมการเอมพิริคัลที่ให้ค่า R^2 สูงที่สุด และให้ค่า RMSE และ χ^2 ต่ำที่สุด จะเป็นสมการที่เหมาะสมที่สุดสำหรับทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้ง

ตารางที่ 1 แบบจำลองเอมพิริคัล [9-12]

No.	ชื่อสมการ (Name of model)	รูปแบบสมการ (Model equation)
1	Newton	$MR = \exp(-kt)$
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$
3	Modified Page	$MR = \exp(-(kt)^n)$
4	Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$
5	Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$
6	Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$
7	Two-term	$MR = a \exp(-k_0t) + b \exp(-k_1t)$
8	Weibull distribution	$MR = a - b \exp(-(kt)^n)$
9	Midilli	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$
10	Verma et al.	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-gt)$
11	Demir et al.	$MR = a \exp(-kt^n) + b$
12	Diffusion approach	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$

หมายเหตุ: เมื่อ a, b, c, g, k, k_0, k_1 และ n คือ ค่าพารามิเตอร์ และ t คือ เวลาในการอบแห้ง (min)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \left[\sum_{i=1}^N (MR_{\text{exp},i} - MR_{\text{pre},i})^2 \right]} \quad (5)$$

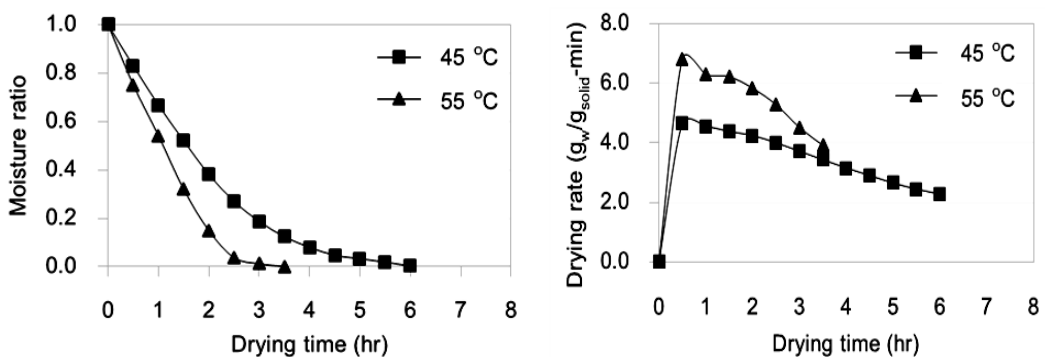
$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - p} \quad (6)$$

เมื่อ $MR_{exp,i}$ คือ อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลอง $MR_{pre,i}$ คือ อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการคำนวณ N คือ จำนวนข้อมูลในการทดลอง และ p คือ จำนวนพารามิเตอร์ในแต่ละสมการ

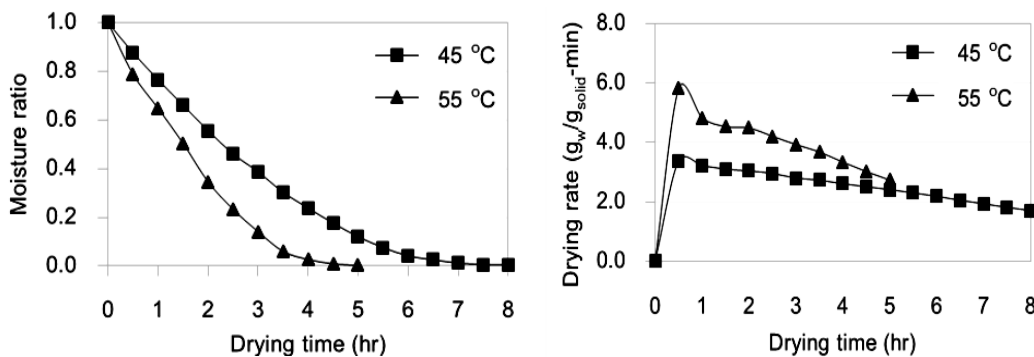
3. ผลการวิจัย

3.1 ผลของอุณหภูมิต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้ง

การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นและอัตราการอบแห้งข้าว ที่ความดันสัมบูรณ์เท่ากับ 5 และ 15 kPa และเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขอุณหภูมิอบแห้งที่ 45 และ 55 °C ดังรูปที่ 2 และรูปที่ 3 ตามลำดับ จากการทดลองพบว่า อัตราส่วนความชื้นจะลดลงตามระยะเวลาอบแห้ง โดยช่วงแรกของการอบแห้งความชื้นจะลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากเป็นช่วงที่ผลิตภัณฑ์ยังมีความชื้นสูง หลังจากนั้นความชื้นจะค่อยๆ ลดลงจนถึงความชื้นสุดท้ายที่ต้องการ เมื่อพิจารณาความแตกต่างของอุณหภูมิอบแห้ง พบว่าที่อุณหภูมิ 55 °C มีความชื้นลดลงเร็วที่สุด ส่งผลให้ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งเร็วกว่า และสอดคล้องกับกราฟอัตราการอบแห้ง ซึ่งพบว่า ที่อุณหภูมิอบแห้ง 55 °C มีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 45 °C เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิก่อให้เกิดการสูงขึ้นนั้น เป็นการเพิ่มพลังงานให้กับน้ำที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์ ซึ่งจะใช้เป็นพลังงานความร้อนในรูปของความร้อนแฝงในการระเหยน้ำออกไปจากผลิตภัณฑ์ จากผลการทดลองสรุปได้ว่า อุณหภูมิอบแห้งมีผลต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งข้าว โดยที่สภาวะความดันเดียวกันอัตราส่วนความชื้นจะลดลงเร็วกว่าและอัตราการอบแห้งจะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น



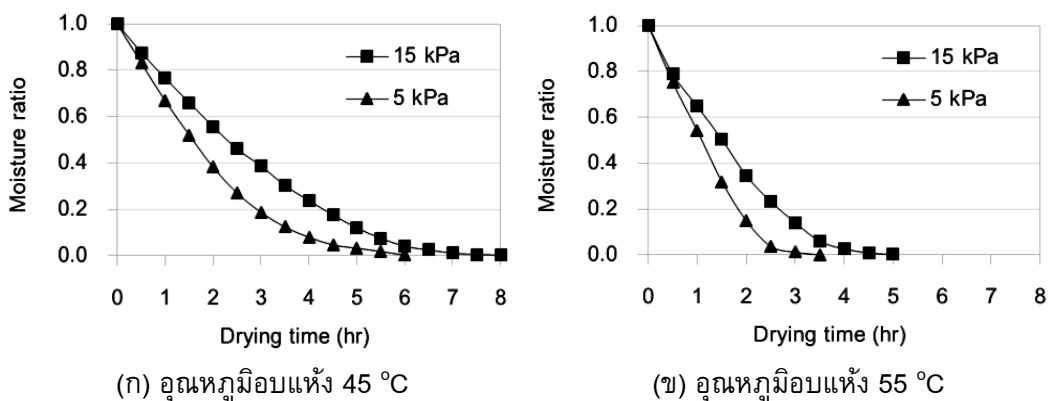
รูปที่ 2 อัตราส่วนความชื้นและอัตราการอบแห้งข้าวที่ความดันสัมบูรณ์ภายในห้องอบแห้ง 5 kPa



รูปที่ 3 อัตราส่วนความชื้นและอัตราการอบแห้งซ้ำที่ความดันสัมบูรณ์ภายในห้องอบแห้ง 15 kPa

3.2 ผลของความดันต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้ง

การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นกับเวลาการอบแห้ง ในการอบแห้งซ้ำที่อุณหภูมิอบแห้งเท่ากับ 45 และ 55 °C โดยเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขสภาวะความดันสัมบูรณ์ ดังรูปที่ 4 จากผลการทดลองพบว่า อัตราส่วนความชื้นจะลดลงตามระยะเวลาการอบแห้ง [13] ที่ความดันสัมบูรณ์ 5 kPa มีความชันของเส้นกราฟมากที่สุดนั่นคืออัตราส่วนความชื้นลดลงเร็วที่สุด ในขณะที่ความดันสัมบูรณ์ 15 kPa มีอัตราส่วนความชื้นลดลงค่อนข้างช้ากว่า ซึ่งเป็นผลมาจากภาวะความดันสุญญากาศซึ่งมีอิทธิพลต่อจุดเดือดของน้ำ โดยน้ำที่ความดันสัมบูรณ์ 5 และ 15 kPa มีจุดเดือดที่ 32.88 และ 53.97 °C ตามลำดับ เป็นผลให้การอบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ต่ำจะทำให้การอบแห้งใช้ระยะเวลาที่เร็วกว่า และการอบแห้งที่อุณหภูมิ 55 °C ใช้เวลาน้อยกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 45 °C ผลการทดลองสรุปได้ว่า ความดันสุญญากาศมีอิทธิพลต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งซ้ำ โดยที่อุณหภูมิเดียวกันอัตราส่วนความชื้นจะลดลงเร็วกว่าเมื่อความดันสัมบูรณ์ลดลง



รูปที่ 4 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นซ้ำที่อุณหภูมิอบแห้ง 45 และ 55 °C

3.3 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งข้าวที่สภาวะต่างๆ ดังตารางที่ 2 จากการทดลองที่เงื่อนไขความดันเดียวกัน พบว่า ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิอบแห้ง โดยการอบแห้งที่อุณหภูมิ 55 °C มีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะน้อยกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 45 °C โดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 35.48 และร้อยละ 38.3 ที่ความดันสัมบูรณ์ 15 และ 5 kPa ตามลำดับ การเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งจะช่วยเพิ่มความสามารถในการระเหยของน้ำในผลิตภัณฑ์มากขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาในการอบแห้งลดลง จึงทำให้ใช้พลังงานในส่วนของปั๊มสุญญากาศลดลงด้วย

ตารางที่ 2 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

ความดันสัมบูรณ์ (kPa)	อุณหภูมิ (°C)	ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (MJ/kg _{water evap.})
15	45	24.29
	55	15.67
5	45	18.51
	55	11.36

เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิอบแห้งเดียวกันพบว่า ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งที่ความดัน 5 kPa มีค่าน้อยกว่าการอบแห้งที่ความดัน 15 kPa โดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 23.79 และร้อยละ 27.50 ที่อุณหภูมิ อบแห้ง 45 และ 55 °C ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากที่สภาวะความดันสัมบูรณ์ต่ำ น้ำในผลิตภัณฑ์สามารถระเหยได้ง่ายและรวดเร็วขึ้นเนื่องจากจุดเดือดของน้ำต่ำลง จึงทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยลง สรุปได้ว่า การเปลี่ยนภาวะความดันสุญญากาศและอุณหภูมิอบแห้ง จะส่งผลต่อความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ โดยความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะจะลดลง [10, 14] เมื่อสภาวะความดันสัมบูรณ์ต่ำและอุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้น

3.4 คุณภาพด้านสีของผลิตภัณฑ์

ตารางที่ 3 แสดงคุณภาพด้านสีของข้าวหลังการอบแห้งที่สภาวะต่างๆ โดยเทียบกับข้าวสดก่อนการอบแห้ง จากการทดลองที่เงื่อนไขความดันสัมบูรณ์เดียวกัน พบว่า ความแตกต่างของสีข้าวจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิอบแห้ง โดยการอบแห้งที่อุณหภูมิ 55 °C มีความแตกต่างของสีข้าวน้อยกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 45 °C โดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 21.05 และร้อยละ 5.80 ตามลำดับ ซึ่ง

การเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งจะส่งผลให้ระยะเวลาในการอบแห้งลดลง ทำให้ความแตกต่างของสีขามีค่าน้อย

ตารางที่ 3 คุณภาพด้านสีของข้าวก่อนและหลังการอบแห้ง

ความดันสัมบูรณ์ (kPa)	อุณหภูมิ (°C)	L	a	b	ΔL	Δa	Δb	ΔE
ข้าสด		68.87	1.57	17.41	N/A	N/A	N/A	N/A
15	45	68.30	5.70	21.02	0.57	-4.13	-3.61	5.51
	55	71.44	4.54	19.28	-2.57	-2.97	-1.87	4.35
5	45	67.56	6.85	20.00	1.31	-5.28	-2.59	6.03
	55	68.01	6.80	19.44	0.86	-5.23	-2.03	5.68

เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิอบแห้งเดียวกัน พบว่า ความแตกต่างด้านสีขาของการอบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ 15 kPa มีค่าน้อยกว่าการอบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ 5 kPa โดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 8.62 และร้อยละ 23.42 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากที่สภาวะความดันสัมบูรณ์ต่ำจุดเดือดของน้ำจะต่ำลงด้วย โดยที่ความดันสัมบูรณ์ 5 kPa มีจุดเดือดของน้ำ 32.88 °C จะเห็นว่าเงื่อนไขในการอบแห้งดังกล่าวมีอุณหภูมิที่สูงกว่าจุดเดือดค่อนข้างมาก จึงส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีการเปลี่ยนแปลงของสีค่อนข้างมากกว่า สรุปได้ว่า การเปลี่ยนภาวะความดันสุญญากาศและอุณหภูมิอบแห้ง ส่งผลต่อความแตกต่างของค่าสี โดยความแตกต่างของสีจะน้อยลง เมื่อมีการใช้อุณหภูมิที่ไม่สูงกว่าจุดเดือดของน้ำภายใต้สภาวะสุญญากาศที่ต่ำมากเกินไป และระยะการอบแห้งที่เร็วโดยใช้อุณหภูมิสูงก็ทำให้การเปลี่ยนแปลงของสีมีน้อยเช่นกัน อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ผลจากการวัดค่าสีจะส่งผลที่แตกต่างกัน แต่จากการสังเกตลักษณะทางกายภาพของสีหลังการอบแห้งในทุกสภาวะมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก

3.5 แบบจำลองเอมพิริคัล

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัลจะทำการเคราะห์หาสมการแทนความสัมพันธ์ของเส้นโค้งการอบแห้ง จากอัตราส่วนความชื้นของการทดลองอบแห้งข้าที่ความดันสัมบูรณ์ในห้องอบแห้ง 5 และ 15 kPa และอุณหภูมิอบแห้ง 45 และ 55 °C โดยใช้วิธีการวิเคราะห์แบบถดถอยเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของสมการเอมพิริคัลในตารางที่ 1 ซึ่งจากการวิเคราะห์ได้ค่าพารามิเตอร์ของสมการและค่าดัชนีบ่งชี้ความสามารถในการทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้ง ดังแสดงในตารางที่ 4 ซึ่งแบบจำลองเอมพิริคัลมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.97133-0.99855 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.01201-0.05596 และค่าการลดลงไคกำลังสอง

เฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.00029-0.00354 โดยแบบจำลองเอมพิริคัลของ Midilli สามารถทำนาย จลนพลศาสตร์การอบแห้งได้ดีที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ($R^2 = 0.99855$) สูง ที่สุด ค่าเฉลี่ยรากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE = 0.01201) และค่าเฉลี่ยการ ลดลงไคกำลังสอง ($\chi^2 = 0.00029$) ต่ำที่สุด

จากผลการวิเคราะห์ข้างต้นเพื่อให้สมการของ Midilli ใช้คำนวณการเปลี่ยนแปลงความชื้นของ การอบแห้งในช่วงความดันสัมบูรณ์และอุณหภูมิที่ทำการทดลอง ดังนั้นจะพิจารณาให้ค่าคงที่ ($K = a, k, n$ และ b) ในสมการของ Midilli มีความสัมพันธ์เป็นสมการเชิงเส้นกับอุณหภูมิตอบแห้ง และความดัน [10] คือ $K = x_0 + x_1T + x_2P$ สมการของ Midilli สามารถจัดรูปได้ใหม่ดังสมการที่ (7)

$$MR = (x_0 + x_1T + x_2P) \exp \left(- (x_3 + x_4T + x_5P) t^{(x_6 + x_7T + x_8P)} \right) + (x_9 + x_{10}T + x_{11}P) t \quad (7)$$

เมื่อ x_0-x_{11} คือ ค่าคงที่ในสมการที่ (7) T คือ อุณหภูมิอบแห้ง (K) P คือ ความดันสัมบูรณ์ (kPa) และ t คือ เวลาในการอบแห้ง (min)

ตารางที่ 4 ค่าคงที่ของสมการเอมพิริคัล

Model	P	T	Constant	R^2	RMSE	χ^2
Newton	15	45	k = 0.00597	0.97096	0.05464	0.00317
		55	k = 0.00956	0.97039	0.05706	0.00358
	5	45	k = 0.00862	0.98164	0.04370	0.00207
		55	k = 0.01352	0.96234	0.06845	0.00536
			Average	0.97133	0.05596	0.00354
Page	15	45	k = 0.00086 n = 1.36513	0.99555	0.02138	0.00052
		55	k = 0.00151 n = 1.37971	0.99369	0.02635	0.00085
	5	45	k = 0.00182 n = 1.31524	0.99921	0.00909	0.00010
		55	k = 0.00132 n = 1.51762	0.99535	0.02404	0.00077
			Average	0.99595	0.02021	0.00056
Modified Page	15	45	k = 0.00567 n = 1.36513	0.99555	0.02138	0.00052
		55	k = 0.00903 n = 1.38038	0.99369	0.02635	0.00085
	5	45	k = 0.00825 n = 1.31524	0.99921	0.00909	0.00010
		55	k = 0.01267 n = 1.51762	0.99535	0.02404	0.00077
			Average	0.99595	0.02021	0.00056

* P คือ ความดันสัมบูรณ์ (kPa) และ T คือ อุณหภูมิอบแห้ง ($^{\circ}\text{C}$)

ตารางที่ 4 ค่าคงที่ของสมการเอมพิริคัล (ต่อ)

Model	P	T	Constant	R ²	RMSE	χ^2
Henderson and Pabis	15	45	a = 1.07273 k = 0.00635	0.97700	0.04863	0.00268
		55	a = 1.05481 k = 0.01000	0.97414	0.05332	0.00347
	5	45	a = 1.05996 k = 0.00911	0.98575	0.03849	0.00175
		55	a = 1.05779 k = 0.01418	0.96666	0.06441	0.00553
			Average	0.97589	0.05121	0.00336
Wang and Singh	15	45	a = -0.00428 b = 0.00000	0.99969	0.00567	0.00004
		55	a = -0.00683 b = 0.00001	0.99865	0.01217	0.00018
	5	45	a = -0.00622 b = 0.00001	0.99855	0.01230	0.00018
		55	a = -0.00966 b = 0.00002	0.99633	0.02136	0.00061
			Average	0.99831	0.01287	0.00025
Logarithmic	15	45	a = 1.22314 k = 0.00424 c = -0.19743	0.99607	0.02009	0.00049
		55	a = 1.22293 k = 0.00660 c = -0.20692	0.99421	0.02523	0.00088
	5	45	a = 1.14209 k = 0.00704 c = -0.11143	0.99575	0.02103	0.00057
		55	a = 1.25862 k = 0.00910 c = -0.23268	0.99005	0.03518	0.00198
			Average	0.99402	0.02538	0.00098
Two-term	15	45	a = -1.05778 k ₀ = 0.00178 b = 2.08254 k ₁ = 0.00335	0.99675	0.01828	0.00044
		55	a = 24.75095 k ₀ = 0.00413 b = -23.7365 k ₁ = 0.00397	0.99509	0.02323	0.00085
	5	45	a = -0.79345 k ₀ = 0.02334 b = 1.78763 k ₁ = 0.01213	0.99834	0.01314	0.00025
		55	a = -190.558 k ₀ = 0.02717 b = 191.551 k ₁ = 0.02704	0.99262	0.03031	0.00184
			Average	0.99570	0.02124	0.00084
Weibull distribution	15	45	a = -0.07054 b = -1.05614 k = 0.00499 n = 1.25417	0.99864	0.01183	0.00018
		55	a = -0.07235 b = -1.05705 k = 0.00794 n = 1.26032	0.99695	0.01831	0.00053
	5	45	a = -0.02039 b = -1.01418 k = 0.00792 n = 1.27603	0.99963	0.00618	0.00006
		55	a = -0.04507 b = -1.03519 k = 0.01174 n = 1.42359	0.99717	0.01878	0.00071
			Average	0.99810	0.01378	0.00037
Midilli	15	45	a = 0.98403 k = 0.00119 n = 1.28227 b = -0.00012	0.99848	0.01249	0.00020
		55	a = 0.99478 k = -0.00134 n = 1.15299 b = -0.00862	0.99912	0.00982	0.00015
	5	45	a = 0.99326 k = 0.00201 n = 1.28724 b = -0.00005	0.99961	0.00640	0.00006
		55	a = 0.98932 k = 0.00165 n = 1.45003 b = -0.00018	0.99700	0.01933	0.00075
			Average	0.99855	0.01201	0.00029

* P คือ ความดันสัมบูรณ์ (kPa) และ T คือ อุณหภูมิอบแห้ง (°C)

ตารางที่ 4 ค่าคงที่ของสมการเอนพีริคัล (ต่อ)

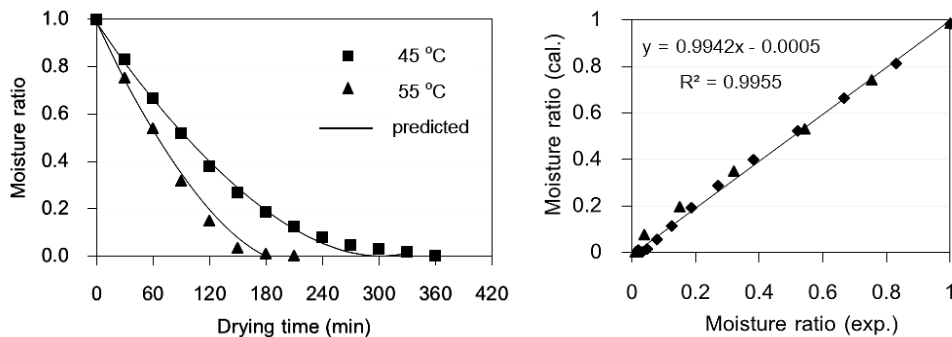
Model	P	T	Constant	R ²	RMSE	χ ²
Verma et al.	15	45	a = -12.3998 k = 0.01145 g = 0.01076	0.99448	0.02382	0.00069
		55	a = 51.0939 k = 0.00392 g = 0.00384	0.99484	0.02381	0.00078
	5	45	a = 1.66594 k = 0.01182 g = 0.02447	0.99811	0.01403	0.00026
		55	a = 38.7506 k = 0.00524 g = 0.00510	0.99047	0.03443	0.00190
			Average	0.99448	0.02402	0.00091
Demir et al.	15	45	a = 1.05614 k = 0.00130 n = 1.25417 b = -0.07055	0.99864	0.01183	0.00018
		55	a = 1.05705 k = 0.00225 n = 1.26032 b = -0.07235	0.99695	0.01831	0.00053
	5	45	a = 1.01418 k = 0.00208 n = 1.27603 b = -0.02039	0.99963	0.00618	0.00006
		55	a = 1.03519 k = 0.00179 n = 1.42359 b = -0.04507	0.99717	0.01878	0.00071
			Average	0.99810	0.01378	0.00037
Diffusion approach	15	45	a = 59.62015 k = 0.00245 b = 0.98391	0.99628	0.01956	0.00046
		55	a = 90.24996 k = 0.00390 b = 0.98938	0.99484	0.02381	0.00078
	5	45	a = -181.960 k = 0.01579 b = 0.99580	0.99896	0.01040	0.00014
		55	a = 88.35155 k = 0.00520 b = 0.98817	0.99047	0.03443	0.00190
			Average	0.99514	0.02205	0.00082

* P คือ ความดันสัมบูรณ์ (kPa) และ T คือ อุณหภูมิอบแห้ง (°C)

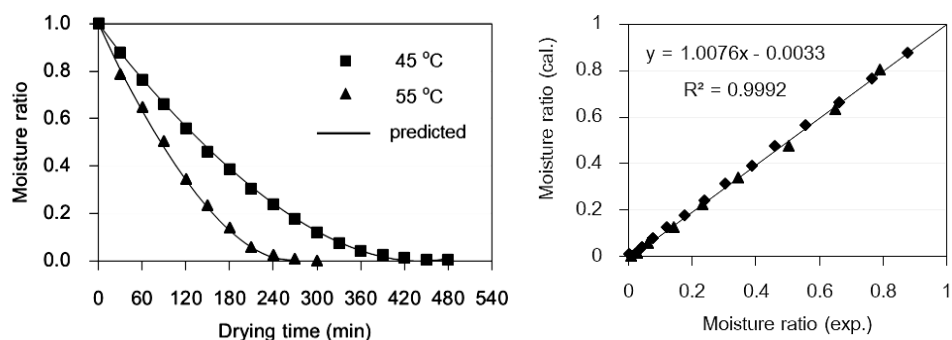
เมื่อนำสมการที่ (7) ไปวิเคราะห์แบบถดถอยเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของสมการจะได้ผลการวิเคราะห์ดังสมการที่ (8) ซึ่งใช้อธิบายพฤติกรรมการอบแห้งว่าที่ความดันสัมบูรณ์ในห้องอบแห้ง 5 และ 15 kPa และอุณหภูมิอบแห้ง 45 และ 55 °C โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ($R^2 = 0.99708$) ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE = 0.01604) และค่าการลดลงไคกำลังสอง ($\chi^2 = 0.00034$)

$$MR = (0.94848 + 0.00009T + 0.00157P)$$

$$\exp\left(-\left(0.02214 - 0.00007T + 0.00004P\right) t^{(1.27904 - 0.00044T - 0.00047P)}\right) + (0.10741 - 0.00037T + 0.00023P)t \quad (8)$$



(ก) ความดันสัมบูรณ์ 5 kPa



(ข) ความดันสัมบูรณ์ 15 kPa

รูปที่ 5 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นระหว่างผลการทดลองและผลการทำนาย

จากรูปที่ 5 แสดงการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของข้าวระหว่างผลการทดลองและผลการทำนายจากแบบจำลองของ Midilli พบว่า ในการทดลองอบแห้งข้าวที่ความดันสัมบูรณ์ในห้องอบแห้ง 5 และ 15 kPa และอุณหภูมิอบแห้ง 45 และ 55 °C การเปลี่ยนแปลงความชื้นมีความสัมพันธ์ใกล้เคียงกับเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ 45° แสดงว่าแบบจำลองเอมพิริคัลสามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวได้ดี

4. สรุป

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการอบแห้งข้าวด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด โดยทดลองที่ความดันสัมบูรณ์ 5 และ 15 kPa และอุณหภูมิอบแห้ง 45 และ 55 °C ซึ่งผลจากการศึกษาพบว่า อุณหภูมิอบแห้งและสภาวะความดันสุญญากาศมีผลต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งของข้าว โดยเมื่อลดความดันสัมบูรณ์และเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งจะทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความชื้นเปลี่ยนแปลงพลังงานจำเพาะของการอบแห้งต่ำลง และการใช้อุณหภูมิการอบแห้งที่สูงกว่าจุดเดือด

ของน้ำมากจะส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงของสีมากขึ้นด้วย นอกจากนั้นยังพบว่า สมการของ Midilli สามารถทำนายผลการอบแห้งเข้าได้ดีที่สุด โดยให้ค่า R^2 (0.99855) สูงที่สุด ค่า RMSE (0.01201) และค่า χ^2 (0.00029) ต่ำที่สุด

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออกที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยนี้

References

- [1] Vonggrachit K. The government is preparing to push 4 top economic herbs [Internet]. 2018 [2019 June 12]. Available from: <http://www.voicetv.co.th/read/Hk3DwZ0IQ>. (In Thai)
- [2] Haginiwa J, Harada M, Morishita I. Pharmacological studies on crud drugs. VII: Properties of essential oil components of aromatics and their pharmacological effect on mouse intestine. Yakugaku zasshi journal of the Pharmaceutical Society of Japan 1963;83:624-8.
- [3] Evans BK, James KC, Luscombe DK. Quantitative structure-activity relationships and carminative activity. Journal of Pharmaceutical Sciences. 1978;67:277-8.
- [4] Assawarachan R. Drying agricultural products by microwave. Kasem Bundit Engineering Journal 2011;1(2):31-42.
- [5] Jaekhom S, Witinantakit K, Sitranon J, Suwannatud T. Study and comparison herb drying using vacuum combined far infrared radiation and hot air. The 11th Thailand Renewable Energy for Community Conference. Chaiyaphum Rajabhat University. 2018. p. 383-9. (In Thai)
- [6] Sandu C. Infrared radiative drying in food engineering: process analysis. Biotechnology Progress 1986;2(3):109-19.
- [7] AOAC (Association of Official Analytical Chemists). Official Methods of Analysis. 17th ed. Association of Official Analytical Chemists. Maryland: Gaithersburg; 2000.
- [8] IZLI N, IZLI G, Taskin O. Influence of different drying techniques on drying parameters of mango. Food Science and Technology 2017;37:604-12.
- [9] Younis M, Abdelkarim D, El-Abdein AZ. Kinetics and mathematical modeling of infrared thin-layer drying of garlic slices. Saudi Journal of Biological Sciences 2018;25:332-8.

- [10] Teeboonma U, Jongjam S. Ginger drying using infrared-vacuum technique. Burapha Sci. J. 2010;15:76-86. (In Thai)
- [11] Babalis SJ, Papanicolaou E, Kyriakis N, Belessiotis VG. Evaluation of thin-layer drying models for describing drying kinetics of figs (*Ficus carica*). Journal of Food Engineering 2006;75:205-14.
- [12] Demir V, Gunhan T, Yagcioglu AK. Mathematical modelling of convection drying of green table olives. Biosystems Engineering 2007;98:47-53.
- [13] Swasdisevi T, Devahastin S, Sa-Adchom P, Soponronnarit S. Mathematical modeling of combined far-infrared and vacuum drying banana slice. Journal of Food Engineering 2009;92:100-6.
- [14] Rungsawang S, Jaekhom S, Uengkimbuan N, Witinantakit K. Shiitake mushroom drying using vacuum and infrared radiation technique. Proceedings of the 12th Conference on Energy Network of Thailand; 2016 June 8-10; Phitsanulok, Thailand; 2016. p. 1591-6. (In Thai)

ประวัติผู้เขียนบทความ



กิตติศักดิ์ วิธินันทกิตต์ ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง อาจารย์ประจำหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก 43 ม.6 ต.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี 20110
โทรศัพท์ 086-386-1885 E-Mail: k_yong28@hotmail.com



ศรีมา แจ้คำ ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง อาจารย์ประจำสาขาวิชาเทคโนโลยี พลังงาน คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ราชมงคลตะวันออก 43 ม.6 ต.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี 20110
โทรศัพท์ 096-743-2241 E-Mail: srima_j@hotmail.com

* Corresponding author

Article History:

Received: July 11, 2019

Revised: October 18, 2019

Accepted: October 24, 2019