

คุณสมบัติเชิงความร้อนของขนมจีนอบแห้งแบบหลายขั้นตอน Thermal Properties of Thai Rice Noodle for Multi-stage Drying

ภราดร หนูทอง^{1,*}, พนารัตน์ เพ็ญรุ่งเหลื่อม¹, วาธินี ยุงกลาง¹ และไพรัชต์ ติฐคุณารักษ์กุล²

¹ สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา

² วิทยาลัยเทคโนโลยีและบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา

744 ถ. สุรนารายณ์ ต. ในเมือง อ. เมือง จ. นครราชสีมา 30000

*ผู้ติดต่อ E-mail: pound96@hotmail.com, เบอร์โทรศัพท์ 081-020-1237paradorn96

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมการอบแห้งและคุณสมบัติเชิงความร้อนของขนมจีน และเพื่อพัฒนาสมการของคุณสมบัติเชิงความร้อน (ได้แก่ ค่าความจุความร้อน ค่าสัดส่วนช่องว่างอากาศ ค่าความหนาแน่นจริง และค่าความหนาแน่นปรากฏ) ที่เป็นฟังก์ชันกับความชื้นของขนมจีนจากการอบแห้งแบบหลายขั้นตอน (การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด การหยุดพักนาน 15 min และการอบแห้งด้วยลมร้อน) การทดลองอบแห้งขนมจีนที่กำลังอินฟราเรด 200–600 W และอุณหภูมิลมร้อน 40–60°C การทดสอบค่าความจุความร้อนโดยใช้แคลอรีมิเตอร์ ขณะที่การทดสอบหาค่าสัดส่วนช่องว่างอากาศ ค่าความหนาแน่นจริง และค่าความหนาแน่นปรากฏด้วยวิธีการแทนที่ช่องว่างน้ำมัน พบว่า การเพิ่มขึ้นกำลังอินฟราเรดและอุณหภูมิลมร้อนสามารถลดเวลาอบแห้ง โดยค่าทั้งสองไม่มีผลต่อค่าคุณสมบัติเชิงความร้อน ซึ่งค่าความจุความร้อนและค่าความหนาแน่นปรากฏมีแนวโน้มลดลง ขณะที่ค่าสัดส่วนช่องว่างอากาศและค่าความหนาแน่นจริงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อความชื้นของเส้นขนมจีนลดลง และสมการคุณสมบัติเชิงความร้อนที่เป็นฟังก์ชันกับความชื้นสามารถทำนายคุณสมบัติเชิงความร้อนได้ดี

คำหลัก: ขนมจีน; การอบแห้งด้วยอินฟราเรด; ค่าความจุความร้อน; ค่าสัดส่วนช่องว่างอากาศ; ค่าความหนาแน่น

Abstract

The aim of this research was to study the drying characteristic and thermal properties of rice noodle and to develop the thermal properties model (such as: heat capacities, air porosity, true density and the bulk density) in a function of moisture content for the multi-stage drying. The multi-stage drying consisted of the infrared drying in first-step, stop drying for 15 min in second-step and hot air drying in final-step. The drying was experimented to carry out at infrared power of 200–600 W and hot air temperature of 40–60°C. The heat capacities were experimented by a calorimeter. The air porosity, true density and the bulk density were instead with the vegetable oil. The results showed that the drying time decreased with the increasing infrared power and air temperature, but the both parameters had not the effect on the thermal properties. The heat capacities and bulk density decreased, while air porosity and true density increased with the decreasing moisture content. The thermal properties model gave a fairly good fit.

Keywords: Rice noodle; Infrared drying; Heat capacities; Air porosity; Density

1. บทนำ

ขนมจีน (Rice Noodle) เป็นอาหารที่บริโภคกันทั่วไปทั้งในและนอกประเทศ ขนมจีนผลิตจากแป้งข้าวเจ้า ซึ่งผลิตเป็นขนมจีนแป้งหมักที่มีความเหนียวนุ่ม มีกลิ่นแป้งหมักและมีสีเหลืองคล้ำ และขนมจีนแป้งสดจะใช้เวลาผลิตที่สั้นโดยได้ขนมจีนที่มีลักษณะเส้นสีขาว อุ่มน้ำ และตัวเส้นนุ่ม ขนมจีนแป้งหมักสามารถเก็บรักษาได้นาน

กว่าขนมจีนแป้งสด แต่ขนมจีนแป้งสดมักนิยมนำมาอบแห้งเนื่องจากจะได้เส้นที่มีลักษณะที่ขาวใส [1]

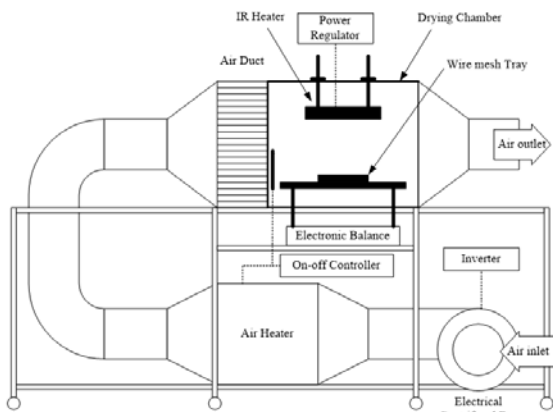
การอบแห้งขนมจีนมักนิยมใช้ลมร้อนหรือการตากแดดซึ่งใช้เวลานานและมีการหดตัวที่สูง [2] การหาแนวทางการอบแห้งขนมจีนที่เหมาะสมจึงมีความจำเป็น โดยงานวิจัยนี้จึงได้ประยุกต์ใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นแหล่งพลังงานจากรังสีอินฟราเรด เนื่องจากสามารถทะลุ

ทะลวงไปยังวัสดุอบแห้งทำให้น้ำภายในวัสดุเกิดการสั่นของโมเลกุลของน้ำและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นเทคนิคในการเร่งให้น้ำออกจากเนื้อวัสดุได้เร็วขึ้นขณะที่การหดตัวต่ำ อีกทั้งยังสามารถติดตั้งได้ง่ายไม่ซับซ้อน [3-4] เนื่องจากอาหารประเภทแป้งมักมีความไวต่อความร้อน หากให้ความร้อนเป็นเวลานานทำให้โครงสร้างของแป้งเสีย การอบแห้งด้วยลมร้อนจึงสามารถรักษาคุณภาพของแป้งได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาพฤติกรรมของการอบแห้งแบบหลายขั้นตอน และศึกษาและพัฒนาสมการคุณสมบัติเชิงความร้อนของขนมจีนเพื่อเป็นประโยชน์ในการพัฒนาแบบจำลองการอบแห้งขนมจีนแบบหลายขั้นตอนต่อไปในอนาคต

2. วัสดุและวิธีการ

2.1 การเตรียมวัสดุอุปกรณ์

เครื่องอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดและลมร้อน ดังรูปที่ 1 ประกอบด้วย ห้องอบแห้งขนาด 500x500x500 mm³ ภายในห้องติดตั้งอินฟราเรดขนาด 122x122 mm² สามารถปรับกำลังไฟฟ้าสูงสุด 650 W วางห่างจากวัสดุอบแห้ง 200 mm ด้านล่างมีการติดตั้งขดลวดความร้อนที่เชื่อมต่อกับพัดลมขนาด 0.25 hp เพื่อขับเคลื่อนอากาศไหลเข้าเครื่องอบแห้งด้วย ที่ความเร็วลม 1.0 m/s



รูปที่ 1 ไดอะแกรมของเครื่องอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดและลมร้อน

2.2 การเตรียมตัวอย่าง

การเตรียมขนมจีนเพื่ออบแห้งได้ใช้ขนมจีนแป้งสดที่ทำจากแป้งข้าวเจ้าตามฤดูกาลที่มีขายในเขตอำเภอเมืองจังหวัดนครราชสีมา ก่อนการทดสอบได้นำเส้นขนมจีนมาแยกเป็นเส้นและตัดให้มีความยาว 80–100 mm จากนั้นนำไปบรรจุถุงซิปล็อคและเก็บไว้ในตู้เย็น 1 วัน เพื่อเป็นการควบคุมสภาพทางกายภาพของเส้นเป็นการเบื้องต้น

2.3 การอบแห้งขนมจีนแบบหลายขั้นตอน

การอบแห้งขนมจีนแบบหลายขั้นตอน เริ่มจากการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่ความเร็วลม 1 m/s ระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดรังสีกับตัวอย่าง 200 mm และกำลังอินฟราเรด 200, 400 และ 600 W ตามด้วยการหยุดพักการอบแห้งนาน 15 min และการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 40, 50 และ 60°C และความเร็วลม 1 m/s จนมีความชื้นประมาณ 15 %db [5] โดยเป็นการทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมของการอบแห้ง และเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบคุณสมบัติเชิงความร้อน

การอบแห้งเพื่อศึกษาพฤติกรรมของการอบแห้ง เริ่มจากเตรียมขนมจีนจำนวน 4 ถาดๆ ละ 50±3 g การเตรียมเครื่องอบแห้งโดยปรับกำลังอินฟราเรด และพัดลมโดยใช้อุปกรณ์ปรับแรงดันไฟฟ้า บันทึกน้ำหนักและอุณหภูมิของกองขนมจีน เริ่มต้นก่อนบรรจุเข้าห้องอบแห้ง ระหว่างการทดลองทำการบันทึกข้อมูลทุก 15 นาที เมื่อครบกำหนดการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด นำตัวอย่างออกมาพักในอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 15 min ต่อด้วยการอบแห้งต่อด้วยลมร้อน โดยบันทึกข้างต้นทุก 15 min ในช่วงแรก และทุก 30 min จนขนมจีนมีความชื้น 15%db นำตัวอย่างในแต่ละช่วงเวลามาหาความชื้น โดยนำตัวอย่างมาอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 105°C เวลา 24 h [6] และคำนวณหาความชื้นดังสมการ (1)

$$M_d(t) = \frac{w(t) - d}{d} \times 100\% \quad (1)$$

เมื่อ $M_d(t)$ คือ ความชื้นของวัสดุที่เวลาใดๆ (%db.), $w(t)$ คือ น้ำหนักตัวอย่างที่เวลาใดๆ (kg) และ d คือ น้ำหนักแห้งของตัวอย่าง (kg)

การเตรียมตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงความร้อน โดยเตรียมตัวอย่างขนาด 200±10 g และอบแห้งตามกระบวนการข้างต้น โดยเก็บตัวอย่างทุก 15 min บรรจุถุงซิปล็อคเพื่อรอการทดสอบคุณสมบัติเชิงความร้อน จากนั้นเปลี่ยนตัวอย่างใหม่ไปเรื่อยๆ จนกว่าสิ้นสุดการทดลอง โดยทำการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดตามด้วยการหยุดพักและการอบแห้งด้วยลมร้อน ตามลำดับ

2.4 การหาค่าความจุความร้อนของเส้นขนมจีน

การหาค่าความจุความร้อนของขนมจีนโดยใช้ตัวอย่างมาทดลองใช้แคลอรีมิเตอร์ เริ่มต้นการทดลองนั้น จะทำการบันทึกน้ำหนักแคลอรีมิเตอร์และขนมจีน เตรียมน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 70°C บรรจุน้ำร้อนและขนมจีนลงในแคลอรีมิเตอร์ บันทึกอุณหภูมิ น้ำ และตัวอย่างเริ่มต้น กวน

ตัวอย่างและน้ำร้อนจนมีอุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลงและ
บันทึกอุณหภูมิอีกครั้ง โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ

2.4 การหาค่าความหนาแน่นของขมมจิ้น และค่า สัดส่วนช่องว่างอากาศ

การหาค่าความหนาแน่นของขมมจิ้นโดยใช้ตัวอย่าง
มาทดลองด้วยวิธีการแทนที่ช่องว่างอากาศด้วยน้ำมัน
เริ่มต้นทำการบันทึกน้ำหนักขมมจิ้นและจัดเรียงลงในบีก
เกอร์ เติมน้ำมันพืชปริมาตร 20 ml และเทลงไปในบีก
เกอร์ที่มีขมมจิ้นจนจมเส้นพอดี บันทึกปริมาตรรวมและ
ปริมาตรน้ำมันที่เหลือ ทำการทดลอง 3 ซ้ำ [7]

3. การวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.1 การวิเคราะห์ค่าความจุความร้อนของขมมจิ้น

ความจุความร้อน (C_p) เป็นความร้อนที่ทำให้วัตถุ
หนึ่งหน่วยมวลมีอุณหภูมิเปลี่ยนไปหนึ่งเคลวินหรือองศา
เซลเซียส ซึ่งหาได้จากสมดุลพลังงาน หรือกฎข้อที่หนึ่ง
ทางเทอร์โมไดนามิกส์ กล่าวคือ ผลรวมของความร้อนที่
เส้นขมมจิ้นกับความร้อนที่แคลอรีมิเตอร์ได้รับเท่ากับ
ความร้อนที่สูญเสียจากน้ำร้อน

$$m_w C_w (T_1 - T_2) + m_c C_c (T_1 - T_2) = m_p C_p (T_2 - T_p) \quad (2)$$

ค่าความจุความร้อนของวัสดุ หาได้จาก

$$C_p = \frac{m_w C_w (T_1 - T_2) + m_c C_c (T_1 - T_2)}{m_p (T_2 - T_p)} \quad (3)$$

เมื่อ m_w คือมวลของน้ำร้อน (kg), m_c คือมวลของแคลอรี
มิเตอร์ (kg), m_p คือมวลของวัสดุทดสอบ (kg), C_w คือ
ความจุความร้อนของน้ำ (4,187 J/kg·°C), C_c คือความจุ
ความร้อนของแคลอรีมิเตอร์ (904 J/kg·°C), C_p คือค่า
ความจุความร้อนของวัสดุ (J/kg·°C), T_p คืออุณหภูมิ
แวดล้อมเริ่มต้นของวัสดุ (°C), T_1 คืออุณหภูมิที่เริ่มต้น
ของน้ำร้อน (°C) และ T_2 คืออุณหภูมิสถานะสมดุล (°C)

3.2 การวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นของขมมจิ้น

ความหนาแน่นเป็นอัตราส่วนของมวลของวัสดุต่อ
ปริมาตรจำแนกได้เป็นความหนาแน่นจริง (ρ_T) ซึ่งเป็น
ความหนาแน่นของเนื้อวัสดุที่ทดสอบหาได้จริง จาก
อัตราส่วนของมวลต่อปริมาตรของของแข็งและของเหลว
ดังสมการ (4) และความหนาแน่นปรากฏ (ρ_B) เป็น
อัตราส่วนของมวลวัสดุต่อปริมาตรทั้งหมดของวัสดุที่กอง
รวมกัน รวมถึงปริมาตรของอากาศ ดังสมการ (5) [9]

$$\rho_T = \frac{m}{V} \quad (4)$$

$$\rho_B = \frac{m}{V_b} \quad (5)$$

เมื่อ ρ คือค่าความหนาแน่น (kg/m³), m คือมวลของวัสดุ
(kg), V คือปริมาตรรวม (m³) และ V_b คือปริมาตรของ
วัสดุรวมกับปริมาตรของเหลวที่แทนช่องว่างอากาศ (m³)

3.3 การวิเคราะห์ค่าสัดส่วนช่องว่างอากาศ

สัดส่วนช่องว่างอากาศ (ε) เป็นอัตราส่วนของ
ปริมาตรช่องว่างอากาศต่อปริมาตรทั้งหมดของวัสดุ ดัง
สมการ [9]

$$\varepsilon = \frac{V_{air}}{V_b} \quad (6)$$

เมื่อ ε คือสัดส่วนช่องว่างอากาศ, V_{air} คือปริมาตร
ของเหลวที่แทนช่องว่างอากาศ (m³) และ V_b คือปริมาตร
ของวัสดุรวมกับปริมาตรของเหลว (m³)

3.4 พัฒนาสมการทางคณิตศาสตร์

การพัฒนาสมการคุณสมบัติเชิงความร้อนจากการ
อบแห้งขมมจิ้นแบบหลายขั้นตอน ประกอบด้วย สมการ
ความจุความร้อน สมการสัดส่วนช่องว่างอากาศ สมการ
ความหนาแน่นจริง และสมการความหนาแน่นปรากฏที่
ขึ้นกับความชื้นของขมมจิ้นโดยใช้วิธีสมการถดถอยน้อย
ที่สุด และพิจารณาสมการที่ดีที่สุดจากค่าสัมประสิทธิ์การ
ตัดสินใจ (R^2) ค่าไคกำลังสอง (χ^2) และค่ารากที่สองของ
ความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ดังสมการ

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (X_{pre,i} - X_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^N (X_{pre,i} - X_{exp,i})^2} \quad (7)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (X_{exp,i} - X_{pre,i})^2}{N - n} \quad (8)$$

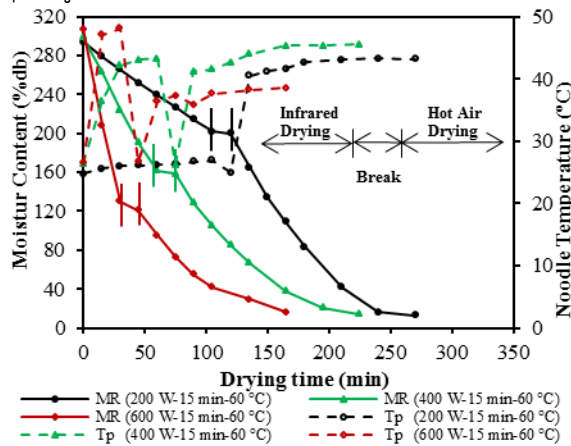
$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{pre,i} - X_{exp,i})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

เมื่อ $X_{exp,i}$ คือข้อมูลที่ได้จากการทดลอง, $X_{pre,i}$ คือข้อมูล
ที่ได้จากการทำนาย, N คือจำนวนค่าสังเกต และ n คือ
จำนวนค่าคงที่ในแบบจำลอง

4. ผลและอภิปรายผลการทดลอง

4.1 ผลของการอบแห้งขนมจีนแบบหลายขั้นตอน

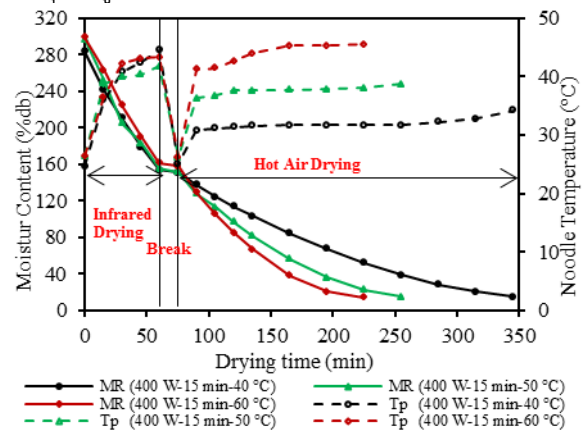
การศึกษาพฤติกรรมของการอบแห้งขนมจีนแบบหลายขั้นตอน พบว่า การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่ 200, 400 และ 600 W เพื่อลดความชื้นจาก 300 %db จนมีความชื้น 202.2, 161.6 และ 129.9 %db และทำอุณหภูมิของกึ่งขนมจีนสูงสุด 26.9, 43.3 และ 48.1°C ในเวลา 105, 60 และ 30 min ตามลำดับ ดังรูปที่ 2 หากอบแห้งต่อขนมจีนที่มีสีน้ำตาล เมื่อหยุดพักการอบแห้งนาน 15 min อุณหภูมิของกึ่งขนมจีนลดลง แต่ขนมจีนมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้องส่งผลให้ช่วงเวลาหยุดพักมีการถ่ายเทมวลเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิทำให้ความชื้นลดลงเป็น 200.3, 158.3 และ 121.0 %db ตามลำดับ และเมื่ออบแห้งต่อด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60°C พบว่า เวลาอบแห้งตลอดกระบวนการเป็น 270, 225 และ 165 min อัตราการอบแห้งเป็น 0.0109, 0.0144 และ 0.0204 $g_{water}/min \cdot g_{dry\ matter}$ ตามลำดับ จะเห็นว่าเมื่อกำลังอินฟราเรดเพิ่มขึ้นทำให้ลดเวลาอบแห้งและเพิ่มอุณหภูมิของกึ่งขนมจีนและอัตราการอบแห้งได้



รูปที่ 2 ผลของกำลังอินฟราเรดที่มีต่อการอบแห้ง

รูปที่ 3 แสดงการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่ 400 W เป็นนาน 60 min ตามด้วยการหยุดพักนาน 15 min และอบแห้งด้วยลมร้อน พบว่า การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดสามารถลดความชื้นจาก 292.5 ± 7.9 %db เหลือ 157.0 ± 4.1 %db และทำอุณหภูมิกึ่งขนมจีนสูงสุด 43.2 ± 1.3 °C เมื่อหยุดพักการอบแห้งนาน 15 min ความชื้นลดลงเหลือ 153.8 ± 4.0 %db และเมื่ออบแห้งต่อด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 40, 50 และ 60°C พบว่า ใช้เวลาอบแห้งตลอดกระบวนการเท่ากับ 345, 255 และ 225 min มีอัตราการอบแห้งเฉลี่ยเป็น 0.0094, 0.0128 และ 0.0144 $g_{water}/min \cdot g_{dry\ matter}$ และอุณหภูมิของกึ่ง

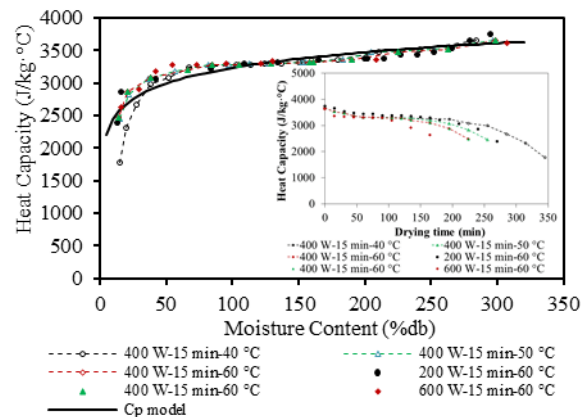
ขนมจีนได้สูงสุด 34.2, 38.1 และ 45.5°C ตามลำดับ จะเห็นว่า เมื่ออุณหภูมิลมร้อนเพิ่มขึ้นลดเวลาอบแห้ง และเพิ่มอุณหภูมิของกึ่งขนมจีนและอัตราการอบแห้งได้



รูปที่ 3 ผลของอุณหภูมิลมร้อนที่มีต่อการอบแห้ง

4.2 ผลของค่าความจุความร้อนของเส้นขนมจีน

การศึกษาค่าความจุความร้อน (C_p) ของขนมจีนจากการอบแห้งแบบหลายขั้นตอน ดังรูปที่ 4 พบว่า ค่า C_p มีค่าในช่วง 1,772.51 ถึง 3,743.21 $J/kg \cdot ^\circ C$ โดยมีค่าสูงสุดที่เวลาเริ่มต้นซึ่งขนมจีนมีความชื้นสูงสุดและค่อยๆ ลดลงเนื่องจากขนมจีนมีน้ำเป็นองค์ประกอบหลัก ทำให้ค่าใกล้เคียงกับน้ำ (4,187 $J/kg \cdot ^\circ C$) และช่วงท้ายเมื่อความชื้นต่ำกว่า 50 %db ค่า C_p ลดลงเข้าใกล้ของแข็ง (1,800 $J/kg \cdot ^\circ C$) เพราะปริมาณน้ำภายในเนื้อขนมจีนลดลง ขณะที่ปริมาณความเข้มข้นของแป้งเพิ่มขึ้น [10] เมื่อพิจารณาผลกระทบของกำลังอินฟราเรดและอุณหภูมิลมร้อน พบว่า ที่เวลาอบแห้งเดียวกัน เมื่อกำลังรังสีอินฟราเรดและอุณหภูมิลมร้อนเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า C_p ลดลง เพราะที่กำลังอินฟราเรดและอุณหภูมิลมร้อนสูงมีผลต่อการลดลงของความชื้น หากความชื้นมีค่าเท่ากันจะให้ค่า C_p ใกล้เคียงกัน

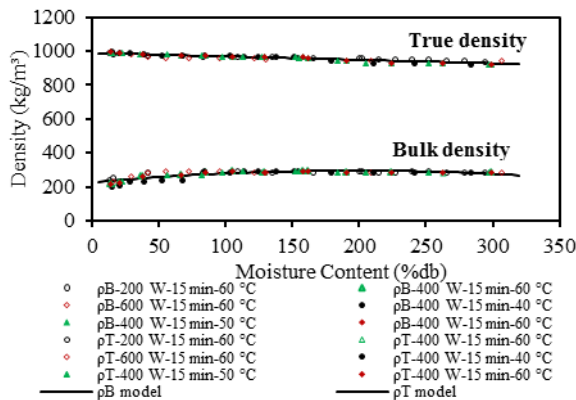


รูปที่ 4 ค่าความจุความร้อนของขนมจีน

4.3 ผลของค่าความหนาแน่นของเส้นขนมจีน

ค่าความหนาแน่น (ρ) ของขนมจีนจากการอบแห้งแบบหลายขั้นตอนในรูปของค่าความหนาแน่นจริง (ρ_T) และค่าความหนาแน่นปรากฏ (ρ_B) ดังรูปที่ 5 พบว่า ค่า ρ_T มีค่าในช่วง 920.0 ถึง 993.7 kg/m^3 จะเห็นว่า เมื่อความชื้นลดลงจะส่งผลให้ค่า ρ_T เพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากเมื่อความชื้นลดลงมีผลต่อน้ำหนักของขนมจีนและเกิดการหดตัว เมื่อเติมน้ำมันลงไปทำให้ปริมาตรของน้ำมันและตัวอย่างลดลง ทำให้ ρ_T เพิ่มขึ้น

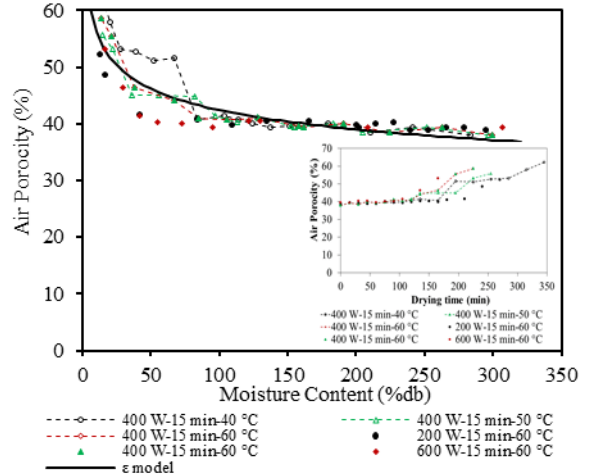
ขณะที่ค่า ρ_B มีค่าในช่วง 203.8 ถึง 292.1 kg/m^3 โดยมีแนวโน้มคงที่เมื่อความชื้นสูง และลดลงในช่วงท้ายของการอบแห้ง เนื่องจากค่า ρ_T เป็นสัดส่วนของมวลของวัสดุต่อปริมาตรของวัสดุรวมและปริมาตรของเหลวที่แทนที่ช่องว่างอากาศ ช่วงแรกขนมจีนมีการหดตัวที่ต่ำและเพิ่มขึ้นในแต่ช่วงท้ายให้ปริมาตรของอากาศเพิ่มขึ้นทำให้ค่า ρ_T ลดลง [11] โดยเมื่อกำลังอินฟราเรดและอุณหภูมิลมร้อนเพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อค่า ρ_B และ ρ_T



รูปที่ 5 ค่าความหนาแน่นของขนมจีน

4.4 ผลของค่าสัดส่วนช่องว่างอากาศ

การศึกษาค่าสัดส่วนช่องว่างอากาศ (ϵ) ของขนมจีนอบแห้งแบบหลายขั้นตอน พบว่า ค่า ϵ มีค่าในช่วง 37.93% ถึง 60.12% โดยเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วงที่ความชื้นสูง แต่เมื่อความชื้นน้อยกว่า 100 %db มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังรูปที่ 6 เพราะเป็นช่วงที่มีความชื้นต่ำขนมจีนมีการหดตัวมาก ทำให้ปริมาตรของขนมจีนและน้ำมันลดลง [11] โดยเมื่อกำลังอินฟราเรดและอุณหภูมิลมร้อนเพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อค่า ϵ



รูปที่ 6 ค่าสัดส่วนช่องว่างของอากาศ

4.5 ผลการพัฒนาสมการทางคณิตศาสตร์

จากการพัฒนาสมการทางคณิตศาสตร์ของคุณสมบัติเชิงความร้อน พบว่า ค่าความจุความร้อน ความหนาแน่นจริง ค่าความหนาแน่นปรากฏ และค่าสัดส่วนช่องว่างอากาศมีความสัมพันธ์กับความชื้นของขนมจีนในรูปแบบสมการลอการิทึม สมการเส้นตรง สมการพหุนามในเมียดิกรี 2 และสมการกำลัง ตามลำดับ ดังตารางที่ 1 เมื่อนำสมการดังกล่าวมาใช้ทำนายค่าคุณสมบัติเชิงความร้อนที่ 4 ตัวแปร พบว่าสามารถทำนายผลการทดลองได้ดี โดยให้ค่า R^2 ที่สูง และค่า χ^2 และ RMSE ที่ต่ำ

5. สรุปผลการทดลอง

การศึกษาการอบแห้งขนมจีนแบบหลายขั้นตอน (การอบแห้งรังสีอินฟราเรด ตามด้วยการหยุดพัก 15 min และการอบแห้งด้วยลมร้อน) พบว่า การเพิ่มขึ้นของกำลังอินฟราเรดในช่วงแรกและอุณหภูมิลมร้อนในช่วงท้ายสามารถลดเวลาอบแห้งและเพิ่มอุณหภูมิของกองขนมจีนและอัตราการอบแห้งได้ โดยคุณสมบัติเชิงความร้อนพบว่า ค่าความจุความร้อนมีแนวโน้มลดลง แต่ค่าความหนาแน่นจริงและค่าสัดส่วนช่องว่างอากาศมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อความชื้นของขนมจีนลดลง ขณะที่ค่าความหนาแน่นปรากฏมีแนวโน้มคงที่ โดยกำลังอินฟราเรดและอุณหภูมิลมร้อนไม่มีผลมากนัก และสมการทางคณิตศาสตร์ของคุณสมบัติเชิงความร้อนสามารถทำนายผลการทดลองได้ดี

ตารางที่ 1 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ค่าไคกำลังสอง (χ^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของสมการทางคณิตศาสตร์ของคุณสมบัติเชิงความร้อน

Model	R^2	χ^2	RMSE	
$C_p = 342.61 \cdot \ln(M_d) + 1657$	0.8218	2.1723×10^{-2}	0.1453	(10)
$\rho_T = -0.2016 \cdot M_d + 987.55$	0.8405	6.0860×10^{-5}	0.0077	(11)
$\rho_B = -0.0018 \cdot M_d^2 + 0.7053 \cdot M_d + 225.68$	0.6904	1.8177×10^{-4}	0.0132	(12)
$\varepsilon = 74.417 \cdot M_d^{-0.122}$	0.7868	7.6549×10^{-4}	1.8734	(13)

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่สนับสนุนทุนวิจัย ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์ และคณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่สนับสนุนสถานที่และเครื่องมือในการวิจัยครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] สารานุกรมเสรี. (2559). *ขนมจีน (อาหารไทย)*. [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา [https://th.wikipedia.org/wiki/ขนมจีน_\(อาหารไทย\).html](https://th.wikipedia.org/wiki/ขนมจีน_(อาหารไทย).html), เข้าดูเมื่อวันที่ 30/03/2559.
- [2] Mercier, S., Villeneuve, S., Mondor, M. and Des Marchais, L.P. (2011). Evolution of porosity, shrinkage and density of pasta fortified with pea protein concentrate during drying. *LWT–Food Science and Technology*. vol. 44, pp. 883–890.
- [3] Hebbar, H.U., Vishwanathan, K.H. and Ramesh, M.N., (2004). Development of combined infrared and hot air dryer for vegetables. *Journal of Food Engineering*, vol. 65, pp. 557–563.
- [4] Nowak, D. and Lewicki, P.P. (2004). Infrared drying of apple slices. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, vol. 5, pp. 353–360.
- [5] มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน. (2546). *ขนมจีนแห้ง*. [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา <http://www.foodnet-worksolution.com/wiki/word/3264/ขนมจีนแห้ง.html>, เข้าดูเมื่อวันที่ 30/03/2559.
- [6] AOAC. (1995). *Official Method of Analysis, 16th ed.*, The association of official analytical chemists. Inc. Arlington, Virginia, USA.
- [7] Alex, M. (2008). The system of correlations between moisture, shrinkage, density, and porosity. *Drying Technology*, vol. 26(12), pp. 1497–1500.
- [8] Togrul, H. (2006). Suitable drying model for infrared drying of carrot. *Journal of Food Engineering*, vol. 77, pp. 610–619.
- [9] Nuthong., P, Achariyaviriya, A., Namsanguan, K. and Achariyaviriya, S. (2011). Kinetics and modeling of whole longan with combined infrared and hot air. *Journal of Food Engineering*, vol. 102, pp. 233–239.
- [10] บทความวิศวกรรมอาหาร. (2556). *ความร้อนจำเพาะ*. [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา http://science-food.blogspot.com/2013/09/blog-post_2094.html, เข้าดูเมื่อวันที่ 30/03/2559.
- [11] Guiné, R.P.F., Ramos, M.A. and Figueiredo, M. (2006). Shrinkage characteristics and porosity of pears during drying. *Drying Technology*. vol. 24(11), pp. 1525–1530.