

การประเมินจลนพลศาสตร์และการใช้พลังงานในการอบแห้งเนื้อหมูด้วยลมร้อน

กานต์ กอมณี¹, รัฐพงศ์ ปฏิกานัง¹, ชคริต โพธิ์งาม¹, อำไพศักดิ์ ทิบุญมา¹,
อภิณันต์ นามเขต¹, ทรงสุภา พุ่มชุมพล¹ และ กฤตยา ไชยยศ^{1,*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

*ผู้ประสานงานบทความต้นฉบับ: : krittaya.c@ubu.ac.th โทรศัพท์: 089-583-4235

(รับบทความ: 23 เมษายน 2568; แก้ไขบทความ: 2 กรกฎาคม 2568; ตอรับบทความ: 9 กรกฎาคม 2568)

บทคัดย่อ

การอบแห้งเป็นวิธีการถนอมอาหารเพื่อยืดอายุการเก็บรักษา อย่างไรก็ตามในกระบวนการอบแห้งใช้พลังงานค่อนข้างสูง และในการออกแบบเครื่องอบแห้งจำเป็นต้องทราบพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับจลนพลศาสตร์การอบแห้งของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งเนื้อหมูด้วยลมร้อน ภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิอบแห้ง 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส (°C) โดยกำหนดให้ความเร็วลมคงที่เท่ากับ 1.5 เมตรต่อวินาที (m/s) ในงานวิจัยนี้ได้ประเมินอัตราการอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ สมการอบแห้งชั้นบาง สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น ประสิทธิภาพและพลังงานกระตุ้น ผลการทดลองพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งมีผลทำให้อัตราการอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า แบบจำลอง Two-term สามารถทำนายพฤติกรรมการอบแห้งได้ดีที่สุด โดยมีค่า R^2 สูงที่สุดเท่ากับ 0.99937 และ RMSE ต่ำที่สุดเท่ากับ 0.00560 และสุดท้ายพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิภาพอยู่ระหว่าง 6.956×10^{-10} - 9.916×10^{-10} ตารางเมตรต่อวินาที (m^2/s) โดยมีค่าพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 16.29 กิโลจูลต่อโมล (kJ/mol) ผลการศึกษาที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ออกแบบและควบคุมการอบแห้งเนื้อหมูเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานต่อไป

คำสำคัญ: ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ พลังงานกระตุ้น สมการอบแห้งชั้นบาง แบบจำลองคณิตศาสตร์ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิภาพ

การอ้างอิงบทความ: กานต์ กอมณี, รัฐพงศ์ ปฏิกานัง, ชคริต โพธิ์งาม, อำไพศักดิ์ ทิบุญมา, อภิณันต์ นามเขต, ทรงสุภา พุ่มชุมพล และ กฤตยา ไชยยศ, "การประเมินจลนพลศาสตร์และการใช้พลังงานในการอบแห้งเนื้อหมูด้วยลมร้อน," วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์, ปีที่ 3, ฉบับที่ 4, หน้า 29-44, 2568.

Evaluation of Drying Kinetics and Energy Use in Hot Air Drying of Pork Meat

Kan Komanee¹, Rattapong Patikanang¹, Chakrit Po-Ngam¹, Umphisak Teeboonma¹,
Apinunt Namkhat¹, Songsupa Pumchumpol¹ and Kittaya Chaiyot^{1,*}

¹ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University

* Corresponding Author: : kittaya.c@ubu.ac.th , Tel: 089-583-4235

(Received: April 23, 2025; Revised: July 2, 2025; Accepted: July 9, 2025)

Abstract

Drying is a common method for preserving food to extend its shelf life. However, the drying process typically requires a significant amount of energy. In designing a dryer, it is important to understand the drying kinetics parameters of the product. Therefore, this research investigates the drying kinetics of pork using hot air under drying temperatures of 50°C, 60°C, and 70°C, with a constant air velocity of 1.5 m/s. In this study, the drying rate, specific energy consumption, thin-layer drying models, effective moisture diffusivity, and activation energy were evaluated. The results showed that increasing the drying temperature led to an increase in both drying rate and specific energy consumption. Among the tested models, the Two-term model provided the best prediction of drying behavior, with the highest R² value of 0.99937 and the lowest RMSE of 0.00560. The effective moisture diffusivity ranged from 6.956×10^{-10} - 9.916×10^{-10} m²/s, and the activation energy was found to be 16.29 kJ/mol. The findings from this study can be applied to improve the design and control of pork drying systems for better energy efficiency.

Keywords: Specific Energy Consumption, Activation Energy, Thin-Layer Equations, Mathematical Modeling, Effective Moisture Diffusivity

Please cite this article as: K. Komanee, R. Patikanang, C. Po-Ngam, U. Teeboonma, A. Namkhat, S. Pumchumpol and K. Chaiyot, "Evaluation of Drying Kinetics and Energy Use in Hot Air Drying of Pork Meat," *The Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University*, vol. 3, no. 4, pp. 29-44, 2025.

1. บทนำ

เนื้อหมูเป็นเนื้อสัตว์ที่ได้รับความนิยมในการบริโภคทั่วโลก โดยมีปริมาณการผลิตและบริโภคเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉลี่ยเพิ่มขึ้นร้อยละ 15-20 ต่อทศวรรษในระดับโลก [1-3] ในประเทศไทยมีการเลี้ยงหมูประมาณ 18-22 ล้านตัวต่อปี มีมูลค่าทางเศรษฐกิจมากกว่า 100,000 ล้านบาท [4] จากจำนวนการผลิตที่สูงขึ้นนี้ การถนอมและเก็บรักษาเนื้อหมูจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง การอบแห้งเป็นหนึ่งในวิธีการถนอมอาหารที่เก่าแก่และใช้กันอย่างแพร่หลายเพื่อลดความชื้นในผลิตภัณฑ์ ทำให้จุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญเติบโตได้ [5-7] การอบแห้งมีหลายวิธี อย่างไรก็ตามวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนเป็นรูปแบบที่ได้รับความนิยมเนื่องจากลงทุนต่ำ และสามารถดำเนินการได้ง่าย [8, 9]

จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ามีการศึกษาการอบแห้งเนื้อหมูด้วยเทคนิคต่าง ๆ มากมายอย่างต่อเนื่อง เช่น Sirimark et al., [10] ได้ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างเครื่องอบแห้งลมร้อนที่ใช้ก๊าซแอลพีจีกับเครื่องอบแห้งที่ใช้แหล่งพลังงานไฟฟ้าสำหรับการอบแห้งหมูแผ่น พบว่าเครื่องอบแห้งแอลพีจีมีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะน้อยกว่าและสามารถลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ได้ต่ำกว่าร้อยละ 30 ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน Wang et al., [11] ศึกษาผลของระยะเวลาอบแห้งและสภาวะการทอดต่อคุณภาพของเนื้อหมูโดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง พบว่าอุณหภูมิการอบแห้งและระยะเวลามีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อลักษณะเนื้อสัมผัส โดยพบว่าระยะเวลาการอบแห้งกับค่าสีและค่าความแตกต่างของสีมีความสัมพันธ์เชิงเส้น นอกจากนี้ Lemaster et al., [12] ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิการทำให้สุกและประเภทกล้ามเนื้อหมูต่อคุณภาพและการเสียดสีของโปรตีน พบว่ากล้ามเนื้อที่มีเส้นใยชนิดไกลโคไลติกมีอุณหภูมิจุดสูงสุดของการเสียดสีโปรตีนต่ำกว่ากล้ามเนื้อชนิดออกซิเดทีฟ ซึ่งส่งผลต่อ

การหดตัวของเส้นใยกล้ามเนื้อและคุณภาพเนื้อสัมผัสหลังการทำให้สุก

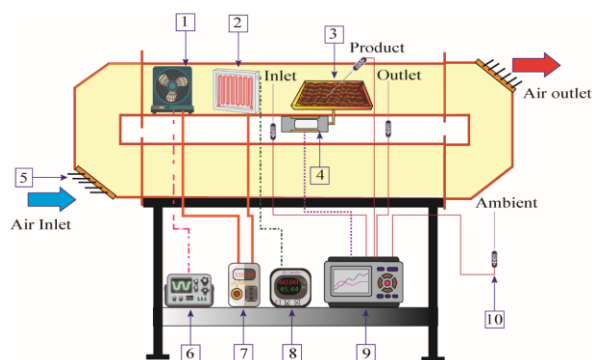
อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่ผ่านมายังมีข้อจำกัดสำคัญหลายประการในการศึกษาพารามิเตอร์เชิงลึกทางจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งเนื้อหมูด้วยลมร้อน โดยเฉพาะการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น ประสิทธิภาพและพลังงานกระตุ้น ซึ่งเป็นตัวชี้วัดสำคัญที่สะท้อนกลไกการเคลื่อนที่ของความชื้นภายในผลิตภัณฑ์ และแสดงถึงอิทธิพลของอุณหภูมิต่อกระบวนการถ่ายเทมวล [13] นอกจากนี้ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีอยู่ส่วนใหญ่ยังถูกพัฒนาสำหรับอุณหภูมิอบแห้งเพียงค่าเดียว ส่งผลให้ขาดความยืดหยุ่นในการประยุกต์ใช้กับช่วงอุณหภูมิที่หลากหลาย ขณะเดียวกันจากทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การประเมินค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบอบแห้งยังมีข้อจำกัด

จากการทบทวนช่องว่างองค์ความรู้ของงานวิจัยที่กล่าวมา การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์จลนพลศาสตร์การอบแห้งเนื้อหมูด้วยลมร้อนโดยมุ่งเน้นการศึกษา (1) การเปลี่ยนแปลงสัดส่วนความชื้นและอัตราการอบแห้ง (2) การประเมินความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในกระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิต่าง ๆ (3) การพัฒนาและเปรียบเทียบสมการอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมเพื่อทำนายพฤติกรรมการอบแห้งและสามารถใช้กับอุณหภูมิอบแห้งที่หลากหลาย และ (4) การศึกษาสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น ประสิทธิภาพและพลังงานกระตุ้นเพื่อทำความเข้าใจกลไกการแพร่ความชื้นภายในเนื้อหมู ผลการศึกษาที่ได้จะเป็นข้อมูลสำคัญในการออกแบบและเพิ่มประสิทธิภาพระบบการอบแห้ง และสามารถประยุกต์ใช้ในการพัฒนาเทคโนโลยีการอบแห้งให้มีประสิทธิภาพสูงทั้งในระดับชุมชนและระดับอุตสาหกรรม

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 วัสดุในการทดสอบ

เนื้อหมูที่ใช้ในการทดลอง ชื้อจากซูเปอร์มาเก็ตในพื้นที่จังหวัดอุบลราชธานี ซึ่งเมื่อนำไปวิเคราะห์หาความชื้นตามมาตรฐาน AOAC [14] พบว่ามีความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 240 ± 10 เปอร์เซ็นต์ตามมาตรฐานแห้ง (%d.b.) หลังจากนั้นจะหั่นเนื้อหมูด้วยเครื่องหั่นให้ได้ขนาดเท่ากับ (กว้าง × ยาว × หนา) $1 \times 10 \times 1$ ลูกบาศก์เซนติเมตร (cm^3)



1. พัดลม 2. ฮีตเตอร์ไฟฟ้า 3. ภาชนะผลิตภัณฑ์
4. โหลดเซลล์ 5. แดมเปอร์ 6. ชุดควบคุมความเร็วรอบ
7. เครื่องวัดพลังงานไฟฟ้า 8. ชุดควบคุมพีไอดี
9. เครื่องบันทึกข้อมูล 10. เทอร์โมคัปเปิล

รูปที่ 1 ผังการทำงานของกระบวนการอบแห้ง

2.2 ชุดทดลอง

เครื่องอบแห้งดังแสดงในรูปที่ 1 สร้างจากสังกะสีแผ่นเรียบพับขึ้นรูปให้มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมขนาด 25×25 เซนติเมตร (cm) และหุ้มด้วยฉนวนหนา 1 cm ใช้พัดลมขนาด 100 วัตต์ (W) ที่สามารถควบคุมความเร็วรอบ ใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าขนาด 3,000 W โดยมีระบบควบคุมอุณหภูมิแบบพีไอดีเป็นแหล่งความร้อนให้ระบบ วัดอุณหภูมิที่แต่ละจุดโดยเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ค่าความแม่นยำ ± 0.1 องศาเซลเซียส ($^{\circ}\text{C}$) วัด

การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักผลิตภัณฑ์โดยโหลดเซลล์ขนาด 5 กิโลกรัม (kg) ซึ่งข้อมูลต่าง ๆ รวมทั้งพลังงานที่ใช้จะถูกบันทึกด้วยเครื่องบันทึกข้อมูล

2.3 วิธีการทดลองและการเก็บตัวอย่าง

ตัวอย่างเนื้อหมูที่ใช้ทดลองแต่ละครั้งจะถูกตรวจสอบความชื้นเริ่มต้นให้อยู่ในช่วง 240 ± 10 %d.b. โดยมีเงื่อนไขการทดลอง คือ 50°C , 60°C และ 70°C ความเร็วลมถูกควบคุมให้คงที่ 1.5 เมตรต่อวินาที (m/s) ก่อนนำตัวอย่างเข้าห้องอบแห้ง จะเดินเครื่องทดลองเพื่อให้อากาศภายในระบบมีอุณหภูมิสม่ำเสมอตามค่าที่ตั้งไว้จนกระทั่งระบบเข้าสู่ภาวะสมดุลความร้อน โดยตรวจสอบอุณหภูมิจากเทอร์โมคัปเปิลที่ติดตั้งภายในระบบหลังจากนั้นจึงนำผลิตภัณฑ์เข้าห้องอบแห้ง พร้อมทั้งเริ่มบันทึกข้อมูลน้ำหนัก อุณหภูมิ และพลังงานอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งความชื้นสุดท้ายของตัวอย่างเท่ากับ 60%d.b. หรือสัดส่วนความชื้นเท่ากับ 0.25 จึงหยุดการทดลองและนำตัวอย่างออกจากห้องอบแห้ง การทดลองแต่ละเงื่อนไขจะดำเนินการ 3 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ยและความคลาดเคลื่อนในการทดลอง

2.4 การวิเคราะห์สัดส่วนความชื้น

สัดส่วนความชื้น (Moisture Ratio, MR) ใช้วิเคราะห์เพื่อติดตามจลนพลศาสตร์การอบแห้งภายใต้สภาวะอุณหภูมิที่แตกต่างกัน โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (1)

$$MR_t = \frac{M_t}{M_{in}} \quad (1)$$

เมื่อ MR_t คือ สัดส่วนความชื้นแต่ละช่วงเวลา

M_t คือ ความชื้นแต่ละช่วงเวลา, %d.b.

M_{in} คือ ความชื้นเริ่มต้น, %d.b.

บทความวิจัย (Research Article)

2.5 การวิเคราะห์อัตราการอบแห้ง

อัตราการอบแห้ง (Drying Rate, DR) คือดัชนีบ่งชี้การระเหยน้ำต่อเวลา ซึ่งวิเคราะห์ได้จากสมการที่ (2)

$$DR = \frac{m_i - m_t}{t} \quad (2)$$

เมื่อ DR คือ อัตราการอบแห้ง, กรัมต่อนาที (g/min)

m_i คือ มวลเริ่มต้นของตัวอย่าง, g

m_t คือ มวลของตัวอย่างแต่ละช่วงเวลา, g

t คือ เวลาอบแห้ง, min

2.6 การวิเคราะห์ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC) คือดัชนีบ่งชี้การใช้พลังงานทั้งหมดต่อปริมาณน้ำที่ระเหยจากผลิตภัณฑ์โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3)

$$SEC = \frac{3.6(E_{fan} + E_{heater})}{m_{wr}} \quad (3)$$

เมื่อ SEC คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ, เมกะจูลต่อกิโลกรัม (MJ/kg)

E_{fan} คือ พลังงานพัดลม, kWh

E_{heater} คือ พลังงานฮีตเตอร์, kWh

m_{wr} คือ มวลน้ำผลิตภัณฑ์ที่ระเหย, kg

2.7 การวิเคราะห์สมการอบแห้งชั้นบาง

จลนพลศาสตร์การอบแห้งผลิตภัณฑ์วิเคราะห์โดยใช้สมการอบแห้งชั้นบางที่มีการใช้อย่างแพร่หลายดังแสดงในตารางที่ 1 แบบจำลองเหล่านี้สามารถ

แบ่งเป็นสามกลุ่มตามพื้นฐานทางทฤษฎี คือ แบบจำลองเชิงทฤษฎี แบบจำลองกึ่งทฤษฎี และแบบจำลองเชิงทดลอง โดยแบบจำลองเชิงทฤษฎีพัฒนาจากกฎของนิวตันและกฎของฟิค สำหรับกฎของนิวตันจะพิจารณาอัตราการลดลงของความชื้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความแตกต่างระหว่างความชื้นของผลิตภัณฑ์ในแต่ช่วงเวลากับความชื้นสมดุล ในขณะที่กฎของฟิคจะพิจารณาการแพร่ความชื้นภายในเนื้อผลิตภัณฑ์ โดยกำหนดให้อัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของความชื้นต่อเวลามีความสัมพันธ์กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของความชื้นตามระยะทางภายในของเนื้อผลิตภัณฑ์

ตารางที่ 1 สมการอบแห้งชั้นบาง

Model	Equations
Newton	$MR = \exp(-kt)$
Page	$MR = \exp(-kt^n)$
Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$
Two-term	$MR = a \exp(-k_1 t) + b \exp(-k_2 t)$
Midilli	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$
Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$

หมายเหตุ: MR คือ สัดส่วนความชื้น (-), t คือ เวลาในการอบแห้ง (min), k , k_1 , k_2 , n , a , b คือ ค่าคงที่

แบบจำลอง Newton [15] และ Henderson and Pabis [16] เป็นแบบจำลองเชิงทฤษฎี ที่พัฒนาจากกฎการถ่ายเทมวลของนิวตันและฟิคตามลำดับ ซึ่งสามารถอธิบายพฤติกรรมรอบแห้งในช่วงเริ่มต้นที่มีการระเหยของน้ำจากผิวผลิตภัณฑ์ได้อย่างเหมาะสม ขณะที่แบบจำลอง Page [15] และ Midilli

บทความวิจัย (Research Article)

[17] เป็นแบบจำลองกึ่งเชิงทฤษฎี ซึ่งได้ปรับปรุงโดยเพิ่มพารามิเตอร์เพื่อความยืดหยุ่นในการจำลองให้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ที่มีพฤติกรรมซับซ้อน โดยเฉพาะในช่วงที่การระเหยน้ำถูกควบคุมด้วยการแพร่ความชื้นภายในผลิตภัณฑ์ ส่วนแบบจำลอง Two-term [16] เหมาะสำหรับการอธิบายกลไกการอบแห้งที่เกิดขึ้นพร้อมกันมากกว่าหนึ่งกลไก ในขณะที่แบบจำลอง Wang and Singh [17] จัดเป็นแบบจำลองเชิงทดลอง แต่มีโครงสร้างสมการที่เรียบง่ายและสามารถปรับให้เข้ากับข้อมูลเชิงทดลองได้ดีในบางกรณี

สำหรับเกณฑ์ที่ใช้การประเมินความเหมาะสมของแบบจำลอง ประกอบด้วย ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination, R^2) ซึ่งถูกใช้เพื่อวัดความสามารถในการอธิบายความแปรปรวนของข้อมูล และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error, $RMSE$) ซึ่งวัดความแม่นยำของการทำนาย โดยทั้งสองเกณฑ์วิเคราะห์ได้จากสมการที่ (4) และ (5)

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pred,i})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - \overline{MR_{exp}})^2} \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pred,i})^2} \quad (5)$$

เมื่อ $MR_{exp,i}$ คือ สัดส่วนความชื้นจากการทดลอง
 $MR_{pred,i}$ คือ สัดส่วนความชื้นจากการทำนาย
 $\overline{MR_{exp}}$ คือ ค่าเฉลี่ยของสัดส่วนความชื้นจากการทดลอง
 N คือ จำนวนข้อมูลที่สังเกต

ในการพิจารณาแบบจำลองที่เหมาะสมจะพิจารณาจากแบบจำลองที่มีค่า R^2 สูงที่สุด และค่า $RMSE$ ต่ำที่สุด

2.8 การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล

สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (D_{eff}) เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้สร้างความเข้าใจการเคลื่อนที่ของความชื้นภายในผลิตภัณฑ์ระหว่างการอบแห้ง ค่านี้สะท้อนความสามารถของความชื้นในการเคลื่อนที่ภายในผลิตภัณฑ์ภายใต้แต่ละสภาวะการอบแห้ง การศึกษา D_{eff} ถูกกำหนดโดยใช้กฎการแพร่ข้อที่สองของฟิค ซึ่งอธิบายการถ่ายเทความชื้นในช่วงอัตราอบแห้งลดลงของการอบแห้งดังสมการที่ (6)

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{eff} \nabla^2 M \quad (6)$$

เมื่อ $\frac{\partial M}{\partial t}$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นตามเวลา, เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้งต่อวินาที (%d.b./min)
 D_{eff} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล, ตารางเมตรต่อวินาที (m^2/s)
 $\nabla^2 M$ คือ ลาปลาเซียนของความเข้มข้นความชื้น, เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้งต่อตารางเมตร (%d.b./ m^2)

ในกรณีผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นแผ่นบางและสมมติว่าการหดตัวของผลิตภัณฑ์มีค่าน้อยมาก ความชื้นเริ่มต้นกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และสัมประสิทธิ์การแพร่ถือว่าเป็นค่าคงที่ สามารถเขียน

บทความวิจัย (Research Article)

สมการตามกฎการแพร่ข้อที่สองของฟิคสำหรับรูปทรงแผ่นบางและยาวมากได้ดังสมการที่ (7)

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{D_{eff}(2n+1)^2 \pi^2 t}{4L^2}\right) \quad (7)$$

เมื่อ MR คือ สัดส่วนความชื้น, -

L คือ ครึ่งหนึ่งของความหนาผลิตภัณฑ์, m

สำหรับกรณีระยะเวลาการอบแห้งนานมาก เทอมลำดับสูงในอนุกรมจะมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ทำให้สมการที่ (7) สามารถเขียนลดรูปได้ดังสมการที่ (8)

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (8)$$

และเมื่อใช้ลอการิทึมธรรมชาติกับทั้งสองด้าน สามารถเขียนความสัมพันธ์เชิงเส้นได้ดังสมการที่ (9)

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2} \quad (9)$$

จากความชัน k ของการถดถอยเชิงเส้นของ $\ln(MR)$ กับ t ทำให้ D_{eff} สามารถประเมินค่าได้จากสมการที่ (10)

$$D_{eff} = -k \times \frac{4L^2}{\pi^2} \quad (10)$$

2.9 การวิเคราะห์พลังงานกระตุ้น

พลังงานกระตุ้น (E_a) ของการแพร่ความชื้นบ่งชี้ถึงพลังงานที่ต้องการเพื่อเริ่มกระบวนการแพร่ระหว่างการอบแห้ง และมีความสำคัญต่อความเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและการเคลื่อนที่ของความชื้น ในการศึกษา E_a ถูกกำหนดโดยการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (D_{eff}) และอุณหภูมิ (T) โดยใช้สมการอาร์เรเนียส ดังแสดงในสมการที่ (11)

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (11)$$

เมื่อ D_{eff} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น

ประสิทธิผล, m^2/s

D_0 คือ ค่าคงที่พรีเอกซ์โปเนนเชียล, m^2/s

E_a คือ พลังงานกระตุ้น, kJ/mol

R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส, $8.314 \text{ kJ/mol} \cdot K$

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์, K

เพื่อลดความซับซ้อนในการวิเคราะห์ สามารถแปลงสมการที่ (11) ให้เป็นสมการเชิงเส้นได้ดังสมการที่ (12)

$$\ln(D_{eff}) = \ln(D_0) - \frac{E_a}{R} \cdot \frac{1}{T} \quad (12)$$

ในการวิเคราะห์จะสร้างกราฟของ $\ln(D_{eff})$ และ $1/T$ เพื่อหาความชันของการถดถอยเชิงเส้น หลังจากนั้นก็วิเคราะห์ค่า E_a ตามสมการที่ (13)

$$E_a = -\text{slope} \cdot R \quad (13)$$

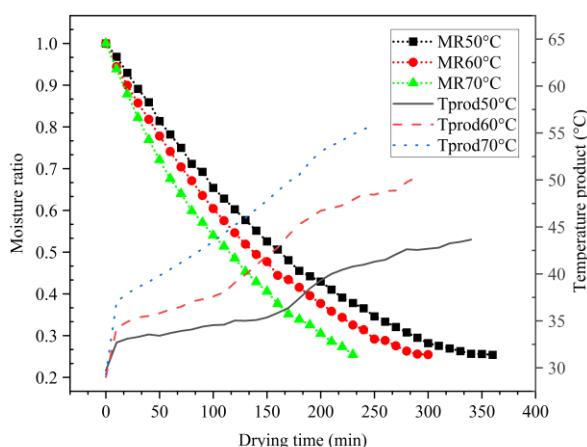
บทความวิจัย (Research Article)

วิธีการนี้ให้ค่าประมาณ E_a ที่น่าเชื่อถือ ซึ่งมีความสำคัญต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้ง

3. ผลและการอภิปรายผล

3.1 ผลของอุณหภูมิอบแห้งต่อสัดส่วนความชื้นและอุณหภูมิผลิตภัณฑ์

รูปที่ 2 แสดงการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนความชื้นและอุณหภูมิผลิตภัณฑ์ภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิอบแห้งที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนความชื้นและอุณหภูมิผลิตภัณฑ์ที่แต่ละเงื่อนไข

จากข้อมูลสัดส่วนความชื้นลดลงตามเวลาและอุณหภูมิอบแห้งที่เพิ่มขึ้น โดยเวลาที่ใช้ในการอบแห้งจนกระทั่ง MR เท่ากับ 0.25 ที่เงื่อนไขอุณหภูมิอบแห้ง 70°C, 60°C และ 50°C มีค่าเท่ากับ 230, 300 และ 360 นาที ตามลำดับ หากพิจารณากรณีเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งจาก 50°C เป็น 70°C จะสามารถลดเวลาอบแห้งได้มากถึง 36% โดยสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [18] คือการเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งมีผลโดยตรงต่อเวลาในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ เนื่องจาก

ผลิตภัณฑ์จะได้รับความร้อนเพิ่มมากขึ้น จากรูปที่ 2 สามารถแบ่งการอบแห้งได้ 2 ช่วง คือ ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (0-120 นาที) และช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (ตั้งแต่ 120 นาทีเป็นต้นไป) ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีการอบแห้ง [19] โดยในช่วงแรกความชื้นจะลดลงรวดเร็วเนื่องจากน้ำอิสระที่บริเวณผิวนอกระเหยออกได้ง่าย ส่วนในช่วงหลังการลดลงจะช้า เนื่องจากความชื้นต้องเคลื่อนที่จากภายในออกสู่ผิวนอก ผลิตภัณฑ์ก่อนระเหย [20]

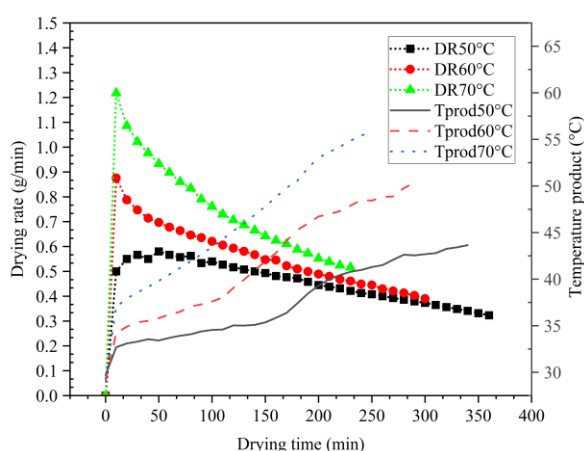
ในส่วนของอุณหภูมิผลิตภัณฑ์ เมื่อได้รับความร้อนในช่วง 10 นาทีแรก อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งน้ำที่ผิวผลิตภัณฑ์เริ่มระเหย จากนั้นอุณหภูมิก็มจะเปลี่ยนแปลงช้า และเพิ่มขึ้นค่อนข้างรวดเร็วอีกครั้งเมื่อกระบวนการอบแห้งเข้าสู่ช่วงอัตราอบแห้งลดลง โดยอุณหภูมิสูงสุดของผลิตภัณฑ์ภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิอบแห้ง 50°C, 60°C และ 70°C เท่ากับ 44°C, 50°C และ 56°C ตามลำดับ ซึ่งพบว่าต่ำกว่าอุณหภูมิอบแห้งเฉลี่ยประมาณ 6°C, 10°C และ 14°C ตามลำดับ Wankhade et al., [21] อธิบายว่าความแตกต่างนี้เกิดจากพลังงานความร้อนบางส่วนถูกใช้ในการระเหยน้ำที่ผิว ซึ่งความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิอบแห้งกับอุณหภูมิผลิตภัณฑ์มีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิอบแห้ง

3.2 ผลของอุณหภูมิอบแห้งต่ออัตราการอบแห้งและอุณหภูมิผลิตภัณฑ์

รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งและอุณหภูมิผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิอบแห้ง 50°C, 60°C และ 70°C จากข้อมูลพบว่าอัตราการอบแห้งที่อุณหภูมิอบแห้ง 50°C, 60°C และ 70°C มีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.58, 0.88 และ 1.22 g/min ตามลำดับ นอกจากนั้นข้อมูลยังแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอุณหภูมิอบแห้ง 10°C สามารถเพิ่มอัตราการอบแห้งได้ประมาณ 35-40% และหากพิจารณาพฤติกรรมอัตราการอบแห้งจะพบว่าสามารถแบ่งได้

บทความวิจัย (Research Article)

2 ช่วง คือ ช่วงแรก (0-60 นาที) อัตราการอบแห้งจะลดลงอย่างรวดเร็ว และช่วงที่สอง (60 นาทีขึ้นไป) อัตราการอบแห้งจะลดลงอย่างช้า ๆ ปรากฏการณ์นี้สอดคล้องกับทฤษฎีการอบแห้งที่ช่วงแรกเป็นการระเหยของน้ำอิสระที่ผิว นอก ส่วนช่วงหลังเป็นการถ่ายเทความชื้นจากภายในสู่ผิวนอกผลิตภัณฑ์



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งและอุณหภูมิผลิตภัณฑ์

ในส่วนของอุณหภูมิผลิตภัณฑ์มีความสัมพันธ์แบบผกผันกับอัตราการอบแห้ง ในช่วงที่อุณหภูมิผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว อัตราการอบแห้งก็จะลดลง ทั้งนี้เนื่องจากสมดุลพลังงานในการอบแห้ง ความร้อนที่ถ่ายเทสู่ผลิตภัณฑ์ถูกใช้ในการระเหยน้ำที่ผิว เมื่อปริมาณน้ำที่ผิวลดลง ความร้อนจึงถูกสะสมทำให้อุณหภูมิผลิตภัณฑ์สูงขึ้น ความสัมพันธ์นี้เป็นไปตามหลักการสมดุลพลังงานในการอบแห้ง ในช่วงท้ายของการอบแห้ง (180-230 นาที) จะพบว่าอัตราการอบแห้งที่ทุกอุณหภูมิมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 0.42-0.52 g/min ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอัตราการอบแห้งในช่วงนี้ถูกควบคุมด้วยการถ่ายเทความชื้นภายในผลิตภัณฑ์ซึ่งมีความสัมพันธ์กับสมบัติการแพร่ความชื้นประสิทธิผลของผลิตภัณฑ์แต่ละประเภท

จากข้อมูลสามารถสรุปได้ว่า อัตราการอบแห้งเฉลี่ยตลอดกระบวนการที่อุณหภูมิ 50°C, 60°C และ 70°C มีค่าเท่ากับ 0.49, 0.62 และ 0.76 g/min ตามลำดับ การเพิ่มอุณหภูมิจาก 50°C เป็น 70°C สามารถเพิ่มอัตราการอบแห้งได้เฉลี่ยเท่ากับ 55% โดยที่เวลาอบแห้งลดลง 36% การลดเวลาอบแห้งมีผลโดยตรงต่อการประหยัดพลังงาน อย่างไรก็ตาม การเลือกอุณหภูมิที่เหมาะสมต้องพิจารณาควบคู่กับค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

3.3 ผลของอุณหภูมิอบแห้งต่อความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

ผลการทดลองในตารางที่ 2 แสดงค่าของ SEC ที่อุณหภูมิการอบแห้ง 50°C, 60°C และ 70°C

ตารางที่ 2 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะและระยะเวลาอบแห้ง

อุณหภูมิอบแห้ง (°C)	เวลาอบแห้ง (min)	ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (MJ/kg)
50	360	86.83±5.22
60	300	110.52±7.74
70	230	123.77±8.68

จากข้อมูลพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งส่งผลให้เวลาการอบแห้งลดลงอย่างต่อเนื่องจาก 360 นาที เหลือเพียง 230 นาที เมื่ออุณหภูมิเพิ่มจาก 50°C เป็น 70°C ซึ่งสอดคล้องกับหลักการถ่ายเทมวลในกระบวนการอบแห้งที่ผลต่างความชื้นระหว่างผลิตภัณฑ์กับอากาศเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราการระเหยของน้ำที่ผิวผลิตภัณฑ์สูงขึ้น [2] อย่างไรก็ตาม แม้ว่าเวลาอบแห้งจะลดลง แต่ค่าความสิ้นเปลืองพลังงาน

บทความวิจัย (Research Article)

จำเพาะเพิ่มขึ้นจาก 86.83 ± 5.22 MJ/kg ที่ 50°C เป็น 123.77 ± 8.68 MJ/kg ที่ 70°C หรือเพิ่มขึ้นเท่ากับ 42.5% ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิสูงถึงแม้จะสามารถลดระยะเวลา แต่ส่งผลให้มีการใช้พลังงานต่อหน่วยมวลน้ำระเหยสูงขึ้น โดยเฉพาะในระบบอบแห้งแบบลมร้อนที่ไม่มีการนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่ พลังงานบางส่วนจึงสูญเสียไปกับผนังห้องอบและการพาความร้อนออกสู่สิ่งแวดล้อม [21]

อบแห้ง โดยใช้วิธีการวิเคราะห์สมการถดถอยแบบไม่เชิงเส้นเพื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ของแต่ละสมการ และเนื่องจากงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองที่หลายระดับอุณหภูมิอบแห้ง ดังนั้นจึงได้ปรับปรุงสมการอบแห้งชั้นบางที่แสดงในตารางที่ 1 โดยกำหนดให้เทอมค่าคงที่ในสมการเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นกับอุณหภูมิ ดังสมการที่ (14)

$$K = x_0 + x_1 T \quad (14)$$

3.4 การประเมินแบบจำลองสมการอบแห้งชั้นบาง

งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบแบบจำลองสมการอบแห้งชั้นบางจำนวน 6 สมการ เพื่อหาสมการที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทำนายพฤติกรรมการอบแห้งผลิตภัณฑ์แต่ละอุณหภูมิ

เมื่อ K คือ ค่าคงที่ในสมการ (เช่น k, k_1, k_2, n, a, b)
 T คือ อุณหภูมิอบแห้ง ($^{\circ}\text{C}$)
 x_0, x_1 คือ ค่าคงที่ได้จากการวิเคราะห์สมการถดถอย

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์สมการถดถอยแบบไม่เชิงเส้นของสมการอบแห้งชั้นบาง

Model	Parameter	x_0	x_1	R^2	RMSE
Newton	k	-0.00042	0.00009	0.99749	0.01152
Page	k	0.00064	0.00009	0.99808	0.00990
	n	0.93481	0.00053		
Henderson and Pabis	a	1.06302	-0.00119	0.99791	0.01037
	k	0.00007	0.00008		
<u>Two-term</u>	a	0.36743	-0.00488	<u>0.99937</u>	<u>0.00560</u>
	k_1	0.00726	-0.00012		
	b	0.70744	0.00369		
	k_2	0.00140	0.00007		
Midilli	a	1.08272	-0.00141	0.99905	0.00687
	k	0.00268	0.00003		
	b	-0.00035	0.00001		
Wang and Singh	a	0.00045	-0.00009	0.99827	0.00951
	b	-0.00001	0.00000		

บทความวิจัย (Research Article)

วิธีการนี้ทำให้ได้แบบจำลองที่สามารถทำนายพฤติกรรมกรอบแห้งได้ทุกอุณหภูมิอบแห้งโดยไม่ต้องทำการวิเคราะห์แยกทีละอุณหภูมิ ซึ่งในส่วนนี้จะแตกต่างจากงานวิจัยที่ผ่านมา [22-24] ซึ่งพัฒนาแบบจำลองโดยแยกทีละอุณหภูมิ ขณะที่งานวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบจำลองที่สามารถทำนายพฤติกรรมกรอบแห้งได้ทุกช่วงอุณหภูมิอบแห้งที่ศึกษา

ตารางที่ 3 แสดงผลการประเมินความแม่นยำของแบบจำลอง ผลการวิเคราะห์พบว่า แบบจำลอง Two-term ให้ค่า R^2 สูงที่สุดเท่ากับ 0.99937 และ $RMSE$ ต่ำที่สุดเท่ากับ 0.00560 ซึ่งบ่งชี้ถึงความแม่นยำสูงที่สุดในการทำนายพฤติกรรมกรอบแห้ง หากพิจารณาสมการ Two-term จะพบว่าประกอบด้วยเทอมเอกซ์โพเนนเชียลสองชุด ทำให้สามารถอธิบายลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสัดส่วนความชื้นได้เป็นอย่างดีทั้งในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่และช่วงอัตราการอบแห้งลดลง โดยเฉพาะในผลิตภัณฑ์ที่มีโครงสร้างซับซ้อน เช่น ผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์ [25]

สำหรับแบบจำลอง Midilli ให้ผลแม่นยำในระดับใกล้เคียงกับ Two-term โดยมีค่า R^2 และ $RMSE$ เท่ากับ 0.99905 และ 0.00687 ตามลำดับ สมการนี้ประกอบด้วยเทอมเอกซ์โพเนนเชียลและเทอมเชิงเส้นซึ่งสามารถปรับให้เข้ากับเส้นโค้ง MR ที่มีลักษณะเป็นเส้นโค้งได้อย่างดีเช่นกัน และเป็นแบบจำลองที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในงานอบแห้งผลิตภัณฑ์เกษตร [26]

แบบจำลอง Page, Henderson และ Pabis และ Wang และ Singh มีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.99791–0.99827 และ $RMSE$ อยู่ระหว่าง 0.00951–0.01037 จากข้อมูลแม้จะมีค่าความแม่นยำในระดับดี แต่ยังมี ความคลาดเคลื่อน เนื่องจากแบบจำลองเหล่านี้มีโครงสร้างสมการที่ไม่สามารถอธิบายลักษณะการแพร่ความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาได้อย่างครบถ้วน ในส่วนแบบจำลอง Newton ซึ่งมีโครงสร้างสมการง่ายที่สุด พบว่ามีค่า R^2 ต่ำที่สุด (0.99749) และ $RMSE$ สูงที่สุด (0.01152)

ผลการศึกษารูปได้ว่า แบบจำลอง Two-term เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดในการทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งเนื้อหมูด้วยลมร้อน ซึ่งเขียนแบบจำลองได้ดังสมการที่ (15)

$$MR = (0.36743 - 0.00012T) \times \exp(-(0.00726 - 0.00012T)t) + (0.70744 + 0.00369T) \times \exp(-(0.00140 + 0.00007T)t) \quad (15)$$

3.5 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลและพลังงานกระตุ้น

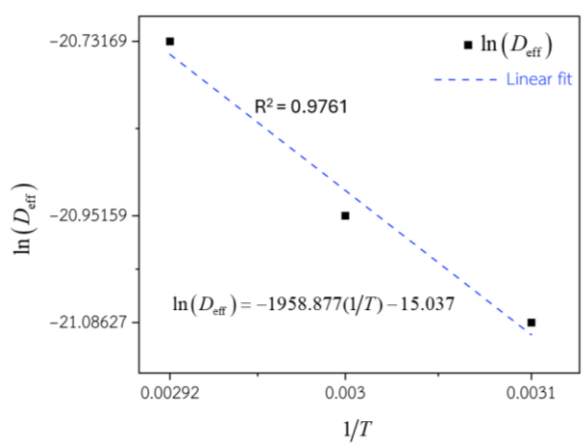
ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (D_{eff}) และพลังงานกระตุ้น (E_a) ได้รับการวิเคราะห์เพื่อศึกษาลักษณะของกลไกการเคลื่อนที่ความชื้นภายในผลิตภัณฑ์ระหว่างกระบวนการอบแห้ง ซึ่งพารามิเตอร์เหล่านี้จะช่วยสร้างความเข้าใจพื้นฐานเกี่ยวกับพฤติกรรมกรอบแห้งของผลิตภัณฑ์ชีวภาพที่มีโครงสร้างเส้นใยและไขมัน และช่วยในการปรับปรุงกระบวนการอบแห้งในระดับอุตสาหกรรม [27] การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลดำเนินการโดยใช้กฎการแพร่ข้อที่สองของฟิคสำหรับรูปทรงแผ่นบางและยาว โดยพิจารณาการกระจายความชื้นเริ่มต้นที่สม่ำเสมอและไม่พิจารณาผลของการหดตัว การวิเคราะห์ใช้ค่าเฉลี่ย D_{eff} เนื่องจากการแพร่ความชื้นภายในขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเป็นหลัก ขณะที่การถ่ายเทมวลที่พื้นผิวจะได้รับอิทธิพลจากความเร็วลม [28]

รูปที่ 4 แสดงให้เห็นว่าค่า D_{eff} เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญตามอุณหภูมิ โดยที่อุณหภูมิ 50°C, 60°C และ 70°C มีค่าเท่ากับ $6.956 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, $7.959 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ และ $9.916 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ตามลำดับ การเพิ่มขึ้นของการแพร่นี้สอดคล้องกับหลักการถ่ายเทมวล กล่าวคือที่อุณหภูมิสูงจะเพิ่มพลังงานจลน์ของโมเลกุล ส่งผลให้การเคลื่อนที่ความชื้นภายใน

บทความวิจัย (Research Article)

โครงสร้างผลึกที่ดีขึ้น [29] ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ความชื้นประสิทธิผลที่ได้จากงานวิจัยนี้อยู่ในช่วง 6.956×10^{-10} - 9.916×10^{-10} m²/s เมื่อเปรียบเทียบกับงานของ Kim et al., [30] ที่ศึกษาไส้กรอกกึ่งแห้งที่มีความชื้นเริ่มต้นต่างกัน พบว่าอยู่ในช่วงเดียวกัน โดย Kim et al., [30] รายงานค่า D_{eff} ระหว่าง 7.29×10^{-10} - 17.79×10^{-10} m²/s ขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำในสูตรผลิตภัณฑ์ตั้งแต่ 0-50% ความแตกต่างนี้สามารถอธิบายได้จากลักษณะของผลิตภัณฑ์ โดยเนื้อหมูสดในงานนี้มีโครงสร้างเส้นใยกล้ามเนื้อธรรมชาติที่เอื้อต่อการแพร่ความชื้น ในขณะที่ไส้กรอกของ Kim et al., [30] เป็นผลิตภัณฑ์โครงสร้างใหม่ที่เติมน้ำมากถึง 50% ในสูตร ส่งผลให้มีความพรุนและช่องทางการแพร่สูงกว่า นอกจากนี้เมื่อวิเคราะห์ข้อมูล สามารถเขียนความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลได้ดังสมการที่ (16)

$$D_{eff} = 2.9475 \times 10^{-7} \exp\left(-\frac{16.29}{RT}\right) \quad (16)$$



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(D_{eff})$ และ $1/T$

เมื่อพิจารณาจากสมการจะพบว่า ค่าพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 16.29 kJ/mol ซึ่งอยู่ในช่วงมาตรฐานของผลิตภัณฑ์ชีวภาพที่อบแห้งแบบการพาความร้อน โดยข้อมูลจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง 12-110 kJ/mol [31] ค่าพลังงานกระตุ้นนี้บ่งชี้ให้เห็นว่ากลไกการแพร่ความชื้นภายในผลิตภัณฑ์ถูกควบคุมด้วยอุณหภูมิเป็นหลัก และสำหรับสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของงานวิจัยนี้มีค่าสูงที่สุดที่เป็นไปได้เท่ากับ 2.9475×10^{-7} m²/s ซึ่งค่านี้นิยมเรียกว่า ค่าคงที่พรีเอกซ์โปเนนเชียล หรือค่าคงที่อาร์เรเนียส (D_0) ซึ่งค่าที่ได้สอดคล้องกับค่าที่รายงานสำหรับผลิตภัณฑ์ชีวภาพที่มีลักษณะโครงสร้างคล้ายกัน [32] และสุดท้ายผลการศึกษา D_{eff} และ E_a ในงานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นข้อมูลเชิงลึกสำหรับออกแบบและปรับปรุงกระบวนการอบแห้งในอุตสาหกรรม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน

4. สรุปผลการวิจัย

ผลการศึกษาในงานวิจัยนี้พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งจาก 50°C เป็น 70°C สามารถลดเวลาอบแห้งได้ 36% และเพิ่มอัตราการอบแห้งเฉลี่ย 55% ในขณะที่ยังคงไม่ส่งผลให้ความชื้นเปลี่ยนแปลงพลังงานจำเพาะเพิ่มขึ้น 42.5% และจากการวิเคราะห์แบบจำลองสมการอบแห้งขั้นสูงพบว่าแบบจำลอง Two-term สามารถทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งให้แม่นยำที่สุด โดยให้ค่า R^2 และ $RMSE$ เท่ากับ 0.99937 และ 0.00560 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลอยู่ระหว่าง 6.956×10^{-10} - 9.916×10^{-10} m²/s โดยมีค่าพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 16.29 kJ/mol สุดท้ายองค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบและปรับปรุงกระบวนการอบแห้งเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. W. Kim, A. Gormley, K. B. Jang, and M. E. Duarte, "Current status of global pig production: an overview and research trends," *Animal Bioscience*, vol. 37, no. 4, p. 719, 2023. DOI: 10.5713/ab.23.0367.
- [2] M. T. See, "Current status and future trends for pork production in the United States of America and Canada," *Animal Bioscience*, vol. 37, no. 4, p. 775, 2024. DOI: 10.5713/ab.24.0055.
- [3] T. Nakrachata-Amon, J. Vorasayan, K. Pitiruek, S. Arunyanart, T. Niyamosoth, and S. Pathumnakul, "Optimizing vertically integrated pork production supply chain: A Lagrangian heuristic approach," *Heliyon*, vol. 10, no. 6, 2024. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e26407.
- [4] K. Sena and P. Saeliow, "Stochastic Frontier Analysis of Technical Efficiency in swine Production in Nakhon Si Thammarat Province," *Economics and Business Administration Journal Thaksin University*, vol. 17, no. 1, pp. 127-144, Jan. 2025. DOI: 10.55164/ecbajournal.v17i1.273889.
- [5] M. Radojčin, I. Pavkov, D. Bursać Kovačević, P. Putnik, A. Wiktor, Z. Stamenković, K. Kešelj, and A. Gere, "Effect of selected drying methods and emerging drying intensification technologies on the quality of dried fruit: A review," *Processes*, vol. 9, no. 1, p. 132, 2021. DOI: 10.3390/pr9010132.
- [6] D. Alp and Ö. Bulantekin, "The microbiological quality of various foods dried by applying different drying methods: a review," *European Food Research and Technology*, vol. 247, no. 6, pp. 1333-1343, 2021. DOI: 10.1007/s00217-021-03731-z.
- [7] H. Sonarathi, S. Supreetha, and S. Mall, "Emerging novel technologies for food drying," in *Food Process Engineering and Technology: Safety, Packaging, Nanotechnologies and Human Health*, Springer, 2024, pp. 3-12. DOI: 10.12944/crnfsj.6.2.29.
- [8] A. H. Zare, M. Azadbakht, and R. Naseri, "Effects of pretreatments involving ohmic heating and infrared radiation on the drying process of bananas using hot air," *Journal of Food Process Engineering*, vol. 47, no. 4, p. e14612, 2024. DOI: 10.1111/jfpe.14612.
- [9] H.-Y. Ju, S. K. Vidyarthi, M. Karim, X.-L. Yu, W.-P. Zhang, and H.-W. Xiao, "Drying quality and energy consumption efficient improvements in hot air drying of papaya slices by step-down relative humidity based on heat and mass transfer characteristics and 3D simulation," *Drying Technology*, vol. 41, no. 3, pp. 460-476, 2023. DOI: 10.1080/07373937.2022.2099416.
- [10] P. Sirimark, S. Yotmanee, W. Pradubsri, and P. Somsila, "Comparison of efficiency between liquefied petroleum gas (LPG) and electric hot air dryer: case study of dried pork slice," *CyTA-Journal of Food*, vol. 21, no. 1, pp. 181-188,

บทความวิจัย (Research Article)

2023. DOI:
10.1080/19476337.2023.2174603.
- [11] S. T. Wang, H. T. V. Lin, Y. J. Syu, and W. C. Sung, "Effect of Drying Time and Frying Conditions on the Quality of Pork Rinds by Response Surface Methodology," *Food Science & Nutrition*, vol. 12, no. 12, pp. 10194-10210, 2024. DOI: 10.1002/fsn3.4513.
- [12] M. N. Lemaster, M. Ha, F. R. Dunshea, S. Chauhan, D. D'Souza, and R. D. Warner, "Impact of cooking temperature on pork longissimus, and muscle fibre type, on quality traits and protein denaturation of four pork muscles," *Meat Science*, vol. 209, p. 109395, 2024. DOI: 10.1016/j.meatsci.2023.109395.
- [13] R. J. Silva-Paz, D. K. Mateo-Mendoza, and A. Eccoña-Sota, "Mathematical Modelling of Muña Leaf Drying (*Mintostachys mollis*) for Determination of the Diffusion Coefficient, Enthalpy, and Gibbs Free Energy," *ChemEngineering*, vol. 7, no. 3, p. 49, 2023. DOI: 10.3390/chemengineering7030049.
- [14] *Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists: Official Methods of Analysis of AOAC International*, AOAC, Washington, DC, 2019.
- [15] R. Seodigeng, J. Kabuba, and H. Rutto, "Modelling the drying characteristics of human faeces using thin-layer drying models and calculation of mass transfer properties at ambient conditions," *Environmental Challenges*, vol. 9, p. 100648, 2022. DOI: 10.1016/j.envc.2022.100648.
- [16] Y. Gao, X. Yang, L. Chu, Y. Zhang, and Q. Li, "Experimental investigation and thin-layer modelling of cassava slice drying," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, pp. 1-9, 2020. DOI: 10.1007/s10973-020-10401-x.
- [17] J. O. Akowuah, A. Bart-Plange, and K. A. Dzisi, "Thin layer mathematical modelling of white maize in a mobile solar-biomass hybrid dryer," 2021. DOI: 10.17221/56/2020-RAE.
- [18] A. Kushwah, A. Kumar, and M. K. Gaur, "Drying kinetics, performance, and quality assessment for banana slices using heat pump-assisted drying system (HPADS)," *Journal of Food Process Engineering*, vol. 45, no. 3, p. e13964, 2022. DOI: 10.1111/jfpe.13964.
- [19] F. Akter, R. Muhury, A. Sultana, and U. K. Deb, "A comprehensive review of mathematical modeling for drying processes of fruits and vegetables," *International Journal of Food Science*, vol. 2022, no. 1, p. 6195257, 2022. DOI: 10.1155/2022/6195257.
- [20] A. Mencarelli, F. Marinello, A. Marini, and L. Guerrini, "Two-stage drying of tomato based on physical parameter kinetics: operative and qualitative optimization," *European Food Research and Technology*, vol. 249, no. 9, pp. 2253-2264, 2023. DOI: 10.1007/s00217-023-04288-9.

บทความวิจัย (Research Article)

- [21] A. Martynenko and G. N. A. Vieira, "Sustainability of drying technologies: system analysis," *Sustainable Food Technology*, vol. 1, no. 5, pp. 629-640, 2023. DOI: 10.1039/D3FB00080J.
- [22] O. Vega-Castro, J. Osorio-Arias, Y. Duarte-Correa, A. Jaques, C. Ramírez, H. Nuñez, and R. Simpson, "Critical analysis of the use of semiempirical models on the dehydration of thin-layer foods based on two study cases," *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 48, no. 12, pp. 15851-15863, 2023. DOI: 10.1007/s13369-023-07623-0.
- [23] M. Popescu, P. Iancu, V. Plesu, C. S. Bildea, and F. A. Manolache, "Mathematical modeling of thin-layer drying kinetics of tomato peels: Influence of drying temperature on the energy requirements and extracts quality," *Foods*, vol. 12, no. 20, p. 3883, 2023. DOI: 10.3390/foods12203883.
- [24] S. Ambawat, A. Sharma, and R. K. Saini, "Mathematical modeling of thin layer drying kinetics and moisture diffusivity study of pretreated Moringa oleifera leaves using fluidized bed dryer," *Processes*, vol. 10, no. 11, p. 2464, 2022. DOI: 10.3390/pr10112464.
- [25] E. A. Mewa, M. W. Okoth, C. N. Kunyanga, and M. N. Rugiri, "Drying modelling, moisture diffusivity and sensory quality of thin layer dried beef," 2018. DOI: 10.12944/CRNFSJ.6.2.29.
- [26] B. Jakubowska, "Experimental Study of Polish Sausage Drying Kinetics and Contraction by Image Data Analysis," *Acta Universitatis Cibiniensis-Series E: Food Technology*, vol. 27, pp. 185-198, 2023. DOI: 10.2478/auaft-2023-0016.
- [27] Z. Zeng, C. Han, Q. Wang, H. Yuan, X. Zhang, and B. Li, "Analysis of drying characteristic, effective moisture diffusivity and energy, exergy and environment performance indicators during thin layer drying of tea in a convective-hot air dryer," *Frontiers in Sustainable Food Systems*, vol. 8, p. 1371696, 2024. DOI: 10.3389/fsufs.2024.1371696.
- [28] N. Sianoun, P. Pongyeela, N. Chairerk, and J. Chungsiriporn, "Thin Layer Drying Kinetics and Mathematical Modeling of Moisture Diffusivity in Cocoa Pod Husk (CPH)," *Engineering Journal*, vol. 27, no. 8, pp. 1-12, 2023. DOI: 10.4186/ej.2023.27.8.1.
- [29] A. Compaoré, S. Ouoba, K. H. Ouoba, M. Simo-Tagne, Y. Rogaume, C. Ahouannou, A. O. Dissa, A. Béré, J. Koulidiati, "A modeling study for moisture diffusivities and moisture transfer coefficients in drying of 'Violet de Galmi' Onion drying," *Advances in Chemical Engineering and Science*, vol. 12, no. 3, pp. 172-196, 2022. DOI: 10.4236/aces.2022.123013.
- [30] D.-H. Kim, Y. J. Kim, D.-M. Shin, J. H. Lee, and S. G. Han, "Drying characteristics and physicochemical properties of semi-dried restructured sausage depend on initial moisture content," *Food Science*

บทความวิจัย (Research Article)

- of *Animal Resources*, vol. 42, no. 3, p. 411, 2022. DOI: 10.5851/kosfa.2022.e12.
- [31] P. Waramit, B. Krittacom, and R. Luampon, "Experimental investigation to evaluate the effective moisture diffusivity and activation energy of cassava (*Manihot Esculenta*) under convective drying," *Applied Science and Engineering Progress*, vol. 15, no. 4, pp. 5518-5518, 2022. DOI: 10.14416/j.asep.2021.10.008.
- [32] F. C. Muga, M. O. Marennya, and T. S. Workneh, "Modelling the Thin-Layer Drying Kinetics of Marinated Beef during Infrared-Assisted Hot Air Processing of Biltong," *International Journal of Food Science*, vol. 2021, no. 1, p. 8819780, 2021. DOI: 10.1155/2021/8819780.