

แบบจำลองของการอบแห้งจิ้งหรีดด้วยเครื่องอบแห้งแบบสเปาต์ฟลูอิดเบด

DRYING MODEL OF CRICKET DRIED USING THE SPOUTED FLUID BED DRYER

กิตติ สถาพรประสาธน์¹, โพธิ์ทอง ปรานีพลกรัง^{2*}

Kitti Sathapornprasath¹, Pothong Praneetpolkrang^{2}*

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

¹*Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University.*

²สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (ต่อเนื่อง) คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

²*Department of Industrial Technology (Continuing Program), Faculty of Industrial Technology, Rambhai Barni Rajabhat University.*

*Corresponding author, e-mail: pothong.p2518@gmail.com

Received: 3 August 2020; **Revised:** 29 March 2022; **Accepted:** 5 April 2022

บทคัดย่อ

บทความนี้ดำเนินการเพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมที่สุดในการทำนายการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของจิ้งหรีดด้วยเครื่องอบแห้งแบบสเปาต์ฟลูอิดเบด ซึ่งมีเงื่อนไขการอบแห้งดังนี้ อุณหภูมิอบแห้ง 3 ระดับ (65, 75 และ 85°C) ความเร็วลมสเปาต์ 2 ระดับ (14 และ 16 m/s) ความเร็วฟลูอิดไดซ์คงที่เท่ากับ 12 m/s และความสูงเบดเท่ากับ 10 cm พิจารณาแบบจำลองที่เหมาะสมด้วยค่าทางสถิติ ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) และค่ารากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ผลการศึกษาพบว่า แบบจำลองของ Logarithmic สามารถทำนายคุณลักษณะการอบแห้งของจิ้งหรีดได้เหมาะสมที่สุด เพราะค่า R^2 มีค่าสูงสุด และ RMSE มีค่าต่ำที่สุด ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของจิ้งหรีดมีค่าอยู่ระหว่าง 7.63×10^{-8} - 11.4×10^{-8} m²/s และค่าพลังงานกระตุ้นมีค่าเท่ากับ 17.98 kJ/mol. และ 18.16 kJ/mol. ที่ความเร็วลมสเปาต์ 14 m/s และ 16 m/s ตามลำดับ

คำสำคัญ: สเปาต์ฟลูอิดเบด แบบจำลองการอบแห้ง จิ้งหรีด

Abstract

This research aimed to determine the most appropriate mathematical model for predicting the moisture ratio of cricket dried by a Spouted fluid bed dryer. The drying operations were: three levels of drying temperature (65, 75 and 85°C), two levels of spout air velocity (14 and 16 m/s), constant fluidized velocity of 12 m/s, and bed height of 10 cm. Two statistical indices which are the coefficient of determination (R^2) and root mean square error (RMSE) were applied for finding the optimum model. The results showed that, the Logarithmic model could represent the drying characteristics of cricket most satisfactorily with the highest R^2 values and the lowest RMSE values. The calculation of moisture diffusivity values achieved

in the ranged from 7.63×10^{-8} to 11.4×10^{-8} m²/s. The activation energies were 17.98 and 18.16 kJ/mol. at spout velocity of 14 and 16 m/s, respectively.

Keywords: Spout Fluid Bed, Drying Model, Cricket

บทนำ

การเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากรโลกอย่างรวดเร็วในปัจจุบัน โดยจำนวนประชากรใกล้ถึง 7,000 ล้านคน ทำให้มีความต้องการด้านอาหารเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก องค์การอาหารและเกษตรแห่งสหประชาชาติ (Food and Agriculture Organization : FAO) จึงได้วางแผนส่งเสริมลงให้ใช้แมลงเป็นอาหารสำหรับมนุษย์ เป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการเพิ่มความมั่นคงทางด้านอาหาร [1-2] แมลงหลายชนิดมีคุณค่าทางโภชนาการสูง สามารถเป็นอาหารทดแทนให้มนุษย์ได้เป็นอย่างดี ซึ่งจะช่วยแก้ปัญหาการขาดแคลนอาหารประเภทโปรตีนของมนุษย์ได้ทั้งในสภาวะปกติและในภาวะวิกฤตจากภัยพิบัติทางธรรมชาติได้ดี [1-2] จิ้งหรีดเป็นแมลงอีกชนิดหนึ่งที่นิยมนำมาทำเป็นอาหารรับประทานกัน ได้มีการพัฒนาผลิตภัณฑ์แปรรูปจากจิ้งหรีดมากมาย เช่น การแปรรูปเป็นอาหารว่าง (Snack food) รวมทั้งการแปรรูปเป็นจิ้งหรีดชนิดโปรตีนผงเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในการทำ เค้ก คุกกี้ และพัฒนาเป็นสินค้าส่งออกไปยังต่างประเทศ ซึ่งได้รับการต้อนรับเป็นอย่างดี [2] การแปรรูปจิ้งหรีดเป็นจิ้งหรีดแห้งเพื่อเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์สำหรับจำหน่ายเป็นสินค้าส่งออกนั้นว่าเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ

การอบแห้งที่นิยมใช้กันในปัจจุบันมีหลากหลายชนิด ซึ่งการเลือกใช้แต่ละชนิดขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุและความเหมาะสมในด้านต่าง ๆ การอบแห้งเทคนิคสเปาเต็ดเบดเป็นการอบแห้งวิธีหนึ่งที่นิยมใช้กัน แต่เครื่องอบแห้งแบบสเปาเต็ดเบดแบบดั้งเดิมนั้นยังมีข้อจำกัดหลายประการ เช่น ความหนาแน่นของเบดสูงทำให้การกระจายตัวและการสัมผัสของอนุภาคกับอากาศร้อนไม่ดีเท่าที่ควร สัดส่วนช่องว่างระหว่างบริเวณวงแหวนและบริเวณสเปาเต็ดแตกต่างกันมาก มีอัตราการหมุนเวียนของอนุภาคต่ำ [3-6] เทคนิคสเปาเต็ดฟลูอิดเบดถูกพัฒนาขึ้นเพื่อเป็นทางเลือกหนึ่ง เพื่อลดข้อจำกัดในเรื่องความดันตกคร่อมเบดของเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดและการหมุนเวียนวัสดุต่ำของสเปาเต็ดเบด [7] โดยลักษณะการทำงานของเทคนิคแบบสเปาเต็ดฟลูอิดเบดนั้น ลมร้อนความเร็วสูงจะถูกเป่าเข้าเบดในลักษณะเป็นลำอากาศขนาดเล็กผ่านช่องเปิดบริเวณกึ่งกลางด้านล่างเข้าสู่เบด (Spout region) ร่วมกับการเป่าลมร้อนเข้ามายังภายในเบด (Annulus region) ลักษณะเช่นนี้จะช่วยให้วัสดุมีอัตราการหมุนเวียนสูงขึ้น การขยายตัวของเบดมีค่าสูง ความหนาแน่นของเบดลดลง ทำให้มีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนและมวลสารระหว่างของไหลและวัสดุที่ขึ้น และยังสามารถใช้กับวัสดุที่มีขนาดใหญ่และมีขนาดไม่สม่ำเสมอได้ดี [7-9] ซึ่งเทคนิคสเปาเต็ดฟลูอิดเบดได้มีการวิจัยและได้ถูกพัฒนาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น การเคลือบผิวของแข็ง เครื่องปฏิกรณ์ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic reactors) การผสมของแข็ง เป็นต้น [7-9] ในส่วนการอบแห้งได้มีการประยุกต์เทคนิคสเปาเต็ดฟลูอิดเบดกับกากของเสียจากอุตสาหกรรมผลิตน้ำมันมะกอก [10] พลาสติคชีวภาพชนิดแซนแทนกัม (Xanthan gum) [11] และแครอท [12] จากการศึกษาของงานวิจัยที่ผ่านมาจะพบว่าการประยุกต์เทคนิค สเปาเต็ดฟลูอิดเบดในการอบแห้งยังมีอยู่น้อยมาก และจากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่ายังไม่มีการอบแห้งจิ้งหรีดด้วยเทคนิคสเปาเต็ดฟลูอิดเบด

กระบวนการอบแห้งเป็นกระบวนการที่มีการถ่ายเทมวลและความร้อนที่มีความสลับซับซ้อน โดยมีตัวแปรที่เกี่ยวข้องสำคัญหลายอย่างที่มีผลกระทบต่อคุณลักษณะการอบแห้งและคุณภาพของผลผลิตทางการเกษตร [13-14] การทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งวัสดุแต่ละชนิดนั้นยุ่งยากและใช้ทรัพยากรมาก ดังนั้นการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งเพื่อวิเคราะห์และศึกษาพฤติกรรมในระหว่างกระบวนการอบแห้งนั้นเป็นสิ่งจำเป็น เพราะเป็นวิธีการที่ประหยัดทั้งเวลาและค่าใช้จ่ายในการทดลอง [13-14] แบบจำลองเอมพิริคัลถือเป็น

แบบจำลองหนึ่งที่น่าสนใจในการศึกษาการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตร [13-14] ได้มีงานวิจัยที่พัฒนาแบบจำลองเอมพิริคัลสำหรับศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งของวัสดุทางการเกษตรอยู่มากมาย เช่น การศึกษาหาแบบจำลองเอมพิริคัลที่เหมาะสมสำหรับทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งของผลไม้ด้วยเครื่องอบแห้งอินฟราเรด โดยพบว่าแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดคือแบบจำลองของ Page [13] สำหรับแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการอบแห้งเห็ดหอมด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดคือสมการของ Midilli et al. ผลการวิจัยยังพบว่าเมื่ออบแห้งเห็ดหอมภายใต้อุณหภูมิที่สูงขึ้นหรือความดันสัมบูรณ์ในห้องอบแห้งลดลง จะส่งผลให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้นและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีแนวโน้มลดลง [14] ในส่วนแบบจำลอง Midilli et al. ยังเป็นแบบจำลองเอมพิริคัลที่เหมาะสมที่สุดสำหรับทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งชั้นมะม่วงด้วยลมร้อน [15] ในขณะที่แบบจำลอง Logarithmic เหมาะสมที่สุดสำหรับทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งองุ่นด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อน [16] นอกจากนี้ยังได้หาแบบจำลองเอมพิริคัลที่เหมาะสมกับพืชผักผลไม้อีกหลายชนิด เช่น พริกชี้ฟ้า [17] กระเทียม [18] ผลหม่อนดำ [19] ข้าวเปลือก [20] ใบสะระแหน่ [21] มะนาว [22] แอปเปิ้ล [23] เป็นต้น ในส่วนของสัตว์จำพวกแมลงและตัวอ่อนแมลงนั้นได้มีการศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งรวมทั้งหาแบบจำลองเอมพิริคัลที่เหมาะสมที่สุดของดักแด้ไหม [24-25] ซึ่งจากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมายังไม่พบว่ามีการศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งจิ้งหรีด ดังนั้นการศึกษาจลนพลศาสตร์และสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อทำนายคุณลักษณะการอบแห้งจิ้งหรีดจึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาการอบแห้งจิ้งหรีดเชิงพาณิชย์ต่อไป

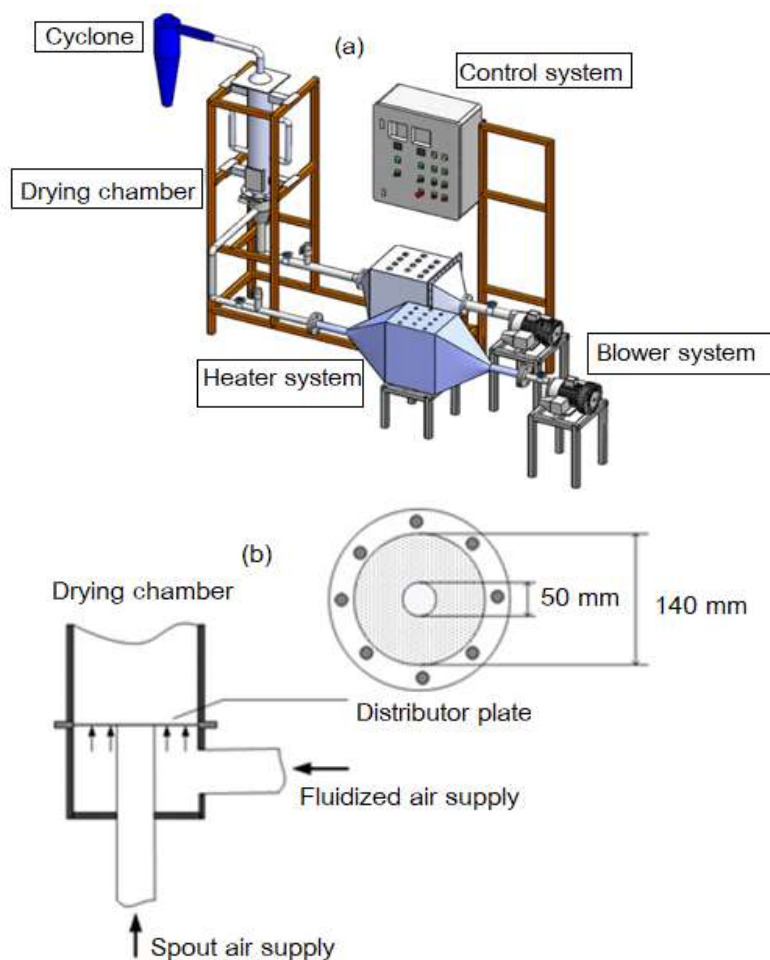
วัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งจิ้งหรีดด้วยเทคนิคสเปาเต็ดฟลูอิดเบด

วิธีดำเนินการวิจัย

1. อุปกรณ์สำหรับทดลอง

เครื่องอบแห้งแบบสเปาเต็ดฟลูอิดเบดที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 1(a) ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังนี้ 1) พัดลมแรงดันสูง (High-Pressure Fan) (VAKUUM BOHEMIA, RT-5026, Taiwan) ขนาด 2.6 kW จำนวน 2 ชุด สำหรับสร้างแรงลมสเปาเต็ดและแรงลมฟลูอิดไดซ์ 2) บอลวาล์ว (Ball valve) ซึ่งทำหน้าที่ปรับความเร็วของอากาศที่เข้าสู่ระบบ โดยความเร็วของอากาศจะถูกวัดด้วย Anemometer (DIGICON, DA-41A, Taiwan) 3) ชุดทำความร้อนด้วยไฟฟ้า (Electric Heater) ขนาด 15 kW จำนวน 2 ชุด ซึ่งทำหน้าที่เพิ่มอุณหภูมิให้กับลมสเปาเต็ดและฟลูอิดไดซ์ 4) หออบแห้ง (Drying chamber) ซึ่งทำจากเหล็กสแตนเลส (Stainless steel) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 140 mm สูง 800 mm 5) ไชโคลนดักฝุ่น (Cyclone) ซึ่งทำหน้าที่แยกผลิตภัณฑ์ออกจากอากาศร้อน 6) ชุดควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Controller) แบบ PID (PNC, REX-C100) ความแม่นยำในการควบคุม $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ชุดควบคุมนี้จะทำงานโดยอาศัยอุณหภูมิของอากาศที่เข้าหออบแห้ง 7) เครื่องบันทึกอุณหภูมิ (Data Logger) (HIOKI, 8421-52, Japan) 8) เทอร์โมคัปเปิลชนิด K (Type K Thermocouples) ซึ่งทำหน้าที่ส่งค่าอุณหภูมิที่วัดได้ไปเก็บไว้ที่เครื่องบันทึกอุณหภูมิ หุ้มนวนความร้อนให้กับอุปกรณ์ของเครื่องอบแห้งไว้ทั้งหมดเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนให้กับอากาศแวดล้อม ภาพที่ 1(b) แสดงโครงสร้างภายในห้องอบแห้ง โดยลมสเปาเต็ดจะถูกพ่นเข้าสู่ห้องอบแห้งผ่านท่อลมสเปาเต็ดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มม. ติดตั้งอยู่ตรงกลางฐานด้านล่างของห้องอบแห้ง ในขณะที่ลมฟลูอิดไดซ์จะถูกจ่ายผ่านแผ่นกระจายลมที่มีรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 มม. อยู่ด้านล่างของฐานเบด เพื่อช่วยทำให้เบดขยายตัว



ภาพที่ 1 เครื่องอบแห้งสเปาเต็ดฟลูอิดเบดระดับห้องปฏิบัติการ

2. วัสดุและวิธีการทดลอง

วัสดุที่ใช้ในการทดลองเป็นจิ้งหรีด โดยซื้อจิ้งหรีดสดจากตลาดไทย นำมาตัดขนาดขนาดให้มีขนาดใกล้เคียงกัน โดยมีขนาดความกว้างประมาณ 0.4 cm ยาวประมาณ 2.5 cm นำจิ้งหรีดมาหาค่าความชื้นเริ่มต้นตามมาตรฐาน AOAC [26] การทดลองอบแห้งจะทดลองที่อุณหภูมิอบแห้ง 3 ระดับคือ 65, 75 และ 85 °C ความสูงของเบดคงที่ 10 cm ความเร็วลมสเปาต์ 2 ระดับคือ 14 และ 16 m/s และความเร็วลมฟลูอิดไดซ์คงที่ 12 m/s โดยความเร็วลมฟลูอิดไดซ์เป็นความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เบดเกิดฟลูอิดไดซ์ ซึ่งได้จากการทดลอง [27] ก่อนทำการทดลองเมื่อตั้งอุณหภูมิตามที่กำหนดแล้ว เปิดให้เครื่องอบแห้งทำงานก่อนไม่น้อยกว่า 30 นาที เพื่อให้ระบบทำงานคงที่ ในช่วงที่ทดลองอบแห้งจิ้งหรีด มวลของจิ้งหรีดที่เปลี่ยนแปลงระหว่างการอบแห้งจะถูกวัดอย่างต่อเนื่องเพื่อชั่งน้ำหนักที่หายไป โดยใช้อุปกรณ์ชั่งน้ำหนักยี่ห้อ KROTRON SG 1500g±0.2g และบันทึกผลการทดลองซึ่งในช่วง 12 นาทีแรกจะชั่งทุก ๆ 3 นาที หลังจากนั้นชั่งทุก ๆ 6 นาที การอบแห้งจะดำเนินไปจนกระทั่งความชื้นของจิ้งหรีดไม่เปลี่ยนแปลง ทำการทดลองอบแห้งครบทุกสภาวะเงื่อนไขที่กำหนด โดยแต่ละเงื่อนไขจะทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

3. การคำนวณตัวแปรทางคณิตศาสตร์

3.1 ความชื้นในวัสดุ (Moisture Content)

ความชื้นในวัสดุเป็นตัวบอกรวมของน้ำที่มีอยู่ในวัสดุเมื่อเทียบกับมวลของวัสดุ ค่าที่บ่งบอกถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงมวลน้ำในวัสดุเมื่อเทียบความชื้นเริ่มต้นเมื่อเวลาการอบแห้งดำเนินต่อไปในเวลาใด ๆ คือ อัตราส่วนความชื้น (Moisture Ratio) เขียนเป็นสมการได้ดังนี้ [3], [28]

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_i - M_{eq}} \quad (1)$$

เมื่อถือว่าความชื้นสมดุลมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าความชื้นเริ่มต้น สามารถสร้างสมการที่ (1) ได้ใหม่ ดังนี้ [13-14]

$$MR = \frac{M_t}{M_i} \quad (2)$$

เมื่อ MR คืออัตราส่วนความชื้นและ M_t คือความชื้นที่เวลาใด ๆ, M_i คือความชื้นเริ่มต้น และ M_{eq} คือความชื้นสมดุล ตามลำดับ

3.2 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (Effective Moisture Diffusivity Coefficient, D_{eff}) คือ คุณสมบัติ

จำเพาะทางกายภาพที่บ่งบอกถึงความสามารถในการเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุ พิจารณาโดยอาศัยสมการการแพร่ ตามกฎข้อที่ 2 ของฟิค (Fick's Law of Diffusion) [22], [28] สามารถเขียนสมการสัมพันธ์ได้คือ

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{eff} \nabla^2 M \quad (3)$$

เมื่อ M คือ ความชื้น, D_{eff} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (m^2/s), t คือ เวลา (s)

เมื่อกำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มีค่าคงตัว การกระจายความชื้นในวัสดุสม่ำเสมอ วัสดุไม่หดตัว ไม่เกิดความต้านทานการถ่ายเทมวลที่วัสดุ และอุณหภูมิคงที่ รวมไปถึงเวลาในการอบแห้งเป็นเวลานาน [29] สามารถประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของจิ้งหรีดได้ดังสมการที่ (4) โดยตั้งสมมุติฐานว่าจิ้งหรีดมีลักษณะแผ่นแบน มีเกิดการหดตัวขณะอบแห้งน้อยมาก และมีการเคลื่อนที่ของความชื้นไปในทิศทางเดียว [29] ได้ดังสมการที่ (4)

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

เมื่อ D_{eff} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (m^2/s), t คือ เวลา (s), L คือ ครึ่งหนึ่งความหนาวัสดุ (m) ในการอบแห้งจิ้งหรีดใช้เวลาในการอบแห้งนานและเป็นช่วงอัตราการอบแห้งลดลง เทอมท้าย ๆ ของสมการที่ (4) สามารถตัดทิ้งได้ [13], [29] ได้ผลเฉลยดังสมการที่ (5)

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \left(\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (5)$$

การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของการอบแห้งเมล็ดจิ้งหรีดด้วยเครื่องอบแห้งสเปาเต็ดฟลูอิดเบด จากค่าความชื้นของกราฟเส้นตรงซึ่งเป็นการสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(MR)$ และเวลาในการอบแห้ง (t) [13-14] ดังแสดงในสมการที่ (6)

$$Slope = \frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} \quad (6)$$

3.3 พลังงานกระตุ้น (Activation Energy, E_a) คือ ค่าพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นให้น้ำเคลื่อนที่ออกจากวัสดุ สามารถหาค่าได้โดยอาศัยสมการความสัมพันธ์ของอาร์เรเนียส (Arrhenius Equation) [13] ซึ่งคำนวณได้ดังนี้

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{R(T+273.15)}\right) \quad (7)$$

เมื่อ D_0 คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นคงที่ (m^2/s) , E_a คือ ค่าพลังงานกระตุ้น ($kcal/kg \text{ mol}$) , R คือค่าคงที่สากลของก๊าซ ($8.314 \text{ kJ/kg mol. K}$) , T คืออุณหภูมิ ($^{\circ}C$)

3.4 การวิเคราะห์สมการทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัล

การหารูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัลที่เหมาะสมสำหรับวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งจิ้งหรีดด้วยเครื่องอบแห้งแบบสเปาเต็ดฟลูอิดเบด โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์แบบสมการถดถอยที่ไม่เชิงเส้น (Nonlinear Regression) โดยใช้โปรแกรม MATLAB ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นำมาหาค่าความเหมาะสมแสดงได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

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

ที่มา: Madhyanon, T., Phila, A., and Soponronarit, S. (2009). Models of fluidized bed drying for thin-layer chopped coconut. *Applied Thermal Engineering*. 29, 2849-2854.

การพิจารณาว่าแบบจำลองที่ได้นั้นจะมีค่าความแม่นยำและใกล้เคียงกับผลการทดลองหรือไม่ จะพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determine, R^2) ซึ่งจะต้องมีค่ามากกว่าที่สุด ในขณะที่ค่ารากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error, RMSE) จะต้องมียุคต่ำที่สุด [13], [28] ดังสมการที่ (8)

$$RMSE = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (MR_{pred,i} - MR_{exp,i})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

เมื่อ $MR_{exp,i}$ คือ อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลอง, $MR_{pred,i}$ คือ อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากแบบจำลอง, n คือ จำนวนข้อมูล

ผลการวิจัย

1. แบบจำลองคณิตศาสตร์การอบแห้งจิ้งหรีดด้วยเครื่องอบแห้งแบบสเปาเต็ดฟลูอิดเบด

จากผลการทดลองการอบแห้งจิ้งหรีดที่ได้นำมาวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งดัชนีบ่งชี้ความสามารถในการทำนายค่าความชื้น คือ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) และ RMSE เป็นค่าทางสถิติที่ใช้สำหรับเลือกแบบจำลองที่เหมาะสม [13], [28] ดังตารางที่ 2 ผลวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบจำลองเอมพิริคัลกับผลการทดลองอบแห้งจิ้งหรีดที่อุณหภูมิ 65-85 °C

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองเอมพิริคัลการอบแห้งจิ้งหรีดที่สภาวะตามที่กำหนด

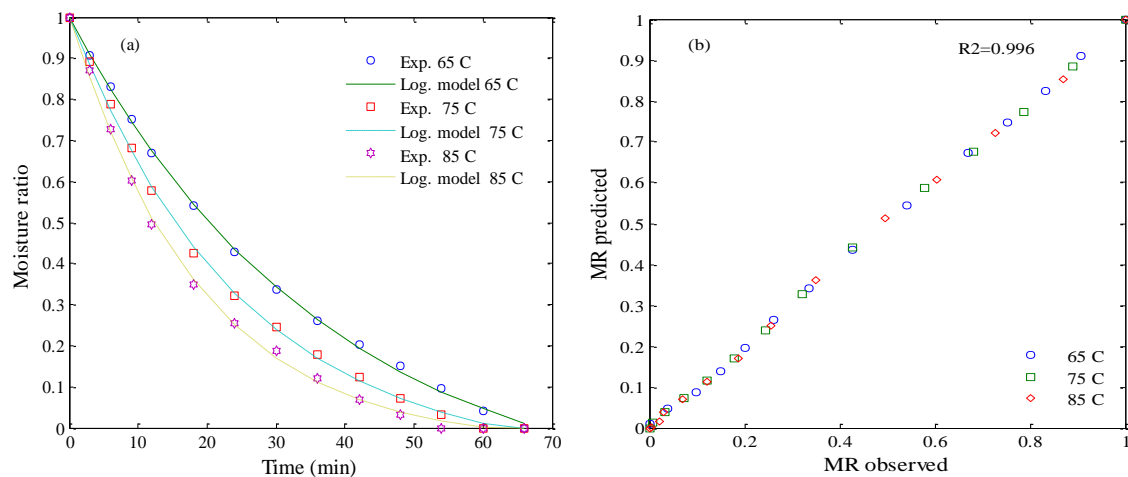
Model name	Spout air velocity (m/s)	Temperature (°C)	Model Constants	R^2	RMSE
Newton	14	65	$k = 0.03744$	0.9878	0.0376
		75	$k = 0.04802$	0.9929	0.0293
		85	$k = 0.0582$	0.9960	0.0220
	16	65	$k = 0.04068$	0.9930	0.0279
		75	$k = 0.04878$	0.9944	0.0258
Page	14	85	$k = 0.05776$	0.9957	0.0227
		65	$K = 0.02057, n = 1.179$	0.9958	0.0229
		75	$k = 0.03123, n = 1.138$	0.9976	0.0177
	16	85	$k = 0.0449, n = 1.089$	0.9970	0.0167
		65	$K = 0.03159, n = 1.077$	0.9947	0.0252
Henderson and Pabis	14	75	$k = 0.03723, n = 1.087$	0.9964	0.0215
		85	$k = 0.04283, n = 1.102$	0.9982	0.0155
		65	$k = 0.03907, a = 1.037$	0.9901	0.03525
	16	75	$k = 0.04991, a = 1.035$	0.9946	0.0268
		85	$k = 0.05985, a = 1.024$	0.9967	0.0208
Two-term	14	65	$k = 0.0413, a = 1.013$	0.9932	0.0284
		75	$k = 0.05007, a = 1.023$	0.9951	0.0251
		85	$k = 0.05944, a = 1.025$	0.9965	0.0213
		65	$a = 6.967, b = -5.964, k_1 = 0.05901, k_2 = 0.06444$	0.9961	0.02414

		75	$a = -4.757, b = 5.768,$ $k_1 = 0.07511, k_2 = 0.06904$	0.9975	0.0198
		85	$a = -2.109, b = 3.116,$ $k_1 = 0.08948, k_2 = 0.07733$	0.9979	0.0182
		65	$a = 9.829, b = -8.826,$ $k_1 = 0.05231, k_2 = 0.05393$	0.9948	0.0274
	16	75	$a = 13.14, b = -12.13,$ $k_1 = 0.06627, k_2 = 0.06808$	0.9965	0.0233
		85	$a = -3.811, b = 4.825,$ $k_1 = 0.08407, k_2 = 0.07748$	0.9981	0.0174
		65	$a = 1.199, c = -0.1976,$ $k = 0.02658$	0.9996	0.0077
	14	75	$a = 1.093, c = -0.08184,$ $k = 0.04089$	0.9992	0.0107
		85	$a = 1.051, c = -0.04185,$ $k = 0.05336$	0.9989	0.0124
Logarithmic		65	$a = 1.11, c = -0.1247,$ $k = 0.03137$	0.9988	0.0126
	16	75	$a = 1.072, c = -0.07045,$ $k = 0.04192$	0.9987	0.0137
		85	$a = 1.056, c = -0.04713,$ $k = 0.05233$	0.9993	0.0102
		65	$a = -0.02795, b = 0.00020$	0.9781	0.0590
	14	75	$a = -0.0346, b = 0.000303$	0.9920	0.03248
		85	$a = -0.0395, b = 0.000382$	0.9800	0.0509
Wang and Singh		65	$a = -0.03029, b = 0.00024$	0.9901	0.0350
	16	75	$a = -0.03491, b = 0.00031$	0.9874	0.0405
		85	$a = -0.0302, b = 0.00024$	0.9903	0.0340

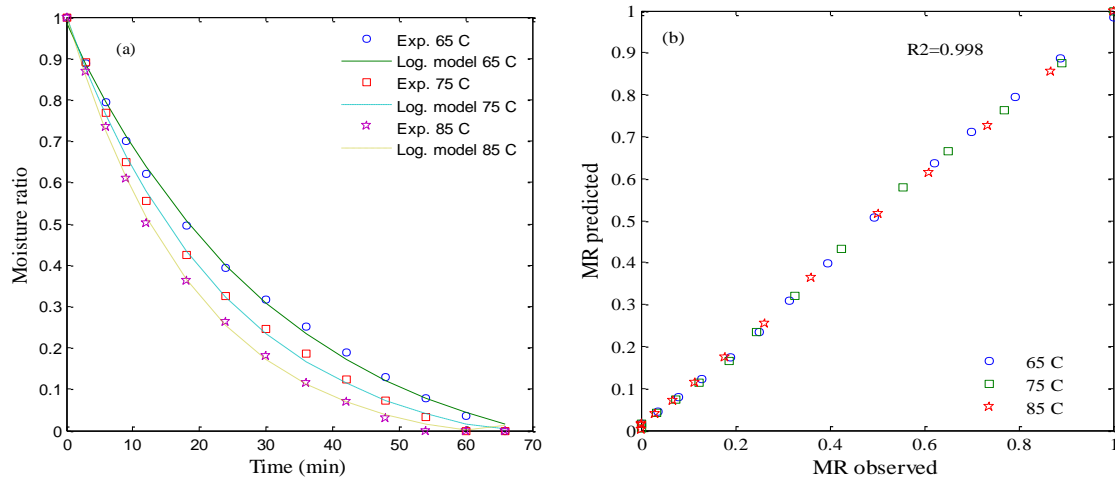
ตารางที่ 2 จะพบว่าค่าทางสถิติของแบบจำลองทั้ง 6 แบบ ที่คำนวณได้มีค่า R^2 อยู่ระหว่าง 0.9781-0.9996 และค่า RMSE ระหว่าง 0.0077-0.0590 โดยแบบจำลองของ Logarithmic มีความเหมาะสมในการทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของจิ้งหรีดได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิอบแห้งที่ 65-85 °C เนื่องจากมีค่า R^2 สูงที่สุด และค่า RMSE ต่ำที่สุด จากแบบจำลองทั้งหมด โดยที่ความเร็วลมสเปาต์ 14 m/s ค่า R^2 ที่ได้รับมีค่าอยู่ระหว่าง 0.9989-0.9996 และค่า RMSE มีค่าระหว่าง 0.0124-0.0077 ในส่วนของความเร็วลมสเปาต์ที่ 16 m/s ค่าที่ได้รับมีค่าระหว่าง 0.9987-0.9993 และค่า RMSE มีค่าระหว่าง 0.0126-0.0102 ตามลำดับ ในขณะที่แบบจำลอง Wang and Singh มีความเหมาะสมน้อยที่สุด เนื่องจากค่าทางสถิติมีความใกล้เคียงกับค่าจริงต่ำที่สุดจากแบบจำลองทั้งหมด โดยที่ความเร็วลมสเปาต์ 14 m/s ค่า R^2 ที่ได้รับมีค่าอยู่ระหว่าง 0.9781-0.9800 และค่า RMSE มีค่าระหว่าง

0.0509-0.0590 ในส่วนของความเร็วลมสเปาต์ที่ 16 m/s ค่า R^2 ที่ได้รับมีค่าระหว่าง 0.9874-0.9993 และค่า RMSE มีค่าระหว่าง 0.0340-0.0405 ตามลำดับ

ภาพที่ 2 (a) และ 3(a) แสดงผลการคำนวณที่ค่าอัตราส่วนความชื้นได้จากแบบจำลองของ Logarithmic เปรียบเทียบกับผลการทดลองอบแห้งจิ้งหรีดที่อุณหภูมิ 3 ระดับคือ 65, 75 และ 85 °C และความเร็วลมสเปาต์ 2 ระดับ คือ 14 m/s (ภาพที่ 2(a)) และ 16 m/s (ภาพที่ 3(a)) จากภาพจะพบค่าที่ได้ผลคำนวณที่ได้จากแบบจำลอง กับผลการทดลองมีค่าที่ใกล้เคียงมีแนวโน้มสอดคล้องไปในทางเดียวกัน เมื่อพิจารณาเส้นกราฟอัตราส่วนความชื้นเทียบกับเวลาอบแห้งจากผลการทดลองการอบแห้งจิ้งหรีดจะพบว่าในช่วง 25 นาทีแรกจะมีลักษณะเป็นเชิงเส้น แล้วค่อย ๆ ลดลง ซึ่งทำให้ลักษณะเส้นกราฟอัตราส่วนความชื้นเป็นเส้นโค้งหงาย สอดคล้องกับรูปแบบสมการของ Logarithmic ($MR=aexp(-kt)+b$) ที่มีเทอมของสมการฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียลบวกกับค่าคงที่ ทำให้เส้นกราฟอัตราส่วนความชื้นเทียบกับเวลาอบแห้งที่ได้จากสมการ Logarithmic ใกล้เคียงและมีแนวโน้มสอดคล้องกับผลการทดลองมากกว่าสมการอื่น ๆ (Newton, Page, Henderson and Pabis, Two-term และ Wang and Singh) ที่มีเพียงเทอมเอกซ์โพเนนเชียลหรือโพลีโนเมียลเพียงอย่างเดียว ภาพที่ 2(b) แสดงค่า R^2 ของสมการ Logarithmic ที่ได้รับมีค่าเท่ากับ 0.996 แสดงว่าสมการของ Logarithmic สามารถทำนายอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นได้ดีตลอดช่วงเวลาในการอบแห้ง หากพิจารณาอิทธิพลของอุณหภูมิต่ำจะพบว่าอุณหภูมิต่ำจะมีการถ่ายเทความร้อนระหว่างอากาศร้อนมากกว่าอุณหภูมิต่ำ [13-14] และยังพบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำยังส่งผลให้เวลาในการอบแห้งลดลงตามไปด้วย ดังภาพที่ 2(a) และ 3(a) พบว่าในช่วงแรกอัตราส่วนความชื้นของจิ้งหรีดลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากภายในตัวของจิ้งหรีดมีความชื้นสูง ทำให้การถ่ายเทมวลของน้ำมายังผิวนอกเป็นไปอย่างรวดเร็วแล้วค่อย ๆ ลดอัตราเร็วในการถ่ายเทความชื้นลง [30]



ภาพที่ 2 เปรียบเทียบผลของแบบจำลอง Logarithmic กับผลการทดลอง ความเร็วลมสเปาต์ 14 m/s

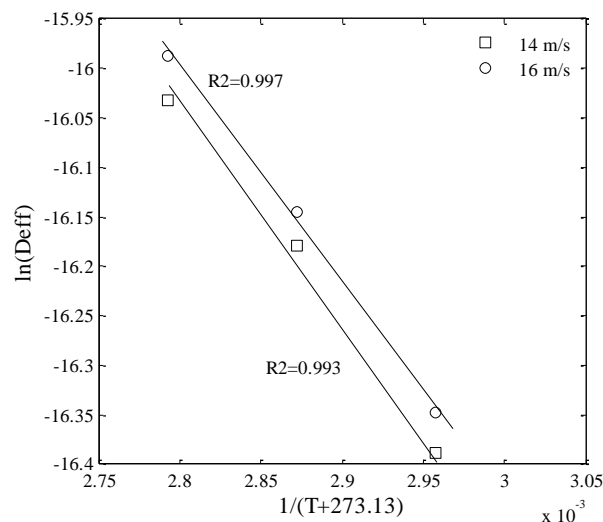


ภาพที่ 3 เปรียบเทียบผลของแบบจำลอง Logarithmic กับผลการทดลองความเร็วลมสเปาต์ 16 m/s

ภาพที่ 3(b) แสดงความสัมพันธ์ผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลองของ Logarithmic เปรียบเทียบกับผลการทดลองค่าอัตราส่วนความชื้นจึ่งหรีดที่อุณหภูมิอบแห้ง 65, 75 และ 85 °C ความเร็วลมสเปาต์ 16 m/s โดยพบว่า ผลที่ได้จากแบบจำลองมีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าจริงและมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน โดยค่า R^2 เท่ากับ 0.998

2. ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลและพลังงานกระตุ้น

ภาพที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(D_{eff})$ กับ $(1/(T+273.15))$ การอบแห้งจึ่งหรีดที่อุณหภูมิอบแห้งอยู่ระหว่าง 65-85 °C ค่าทางสถิติ R^2 เท่ากับ เท่ากับ 0.997 และ 0.993 ที่ความเร็วลมสเปาต์ 14 และ 16 m/s ตามลำดับ



ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(D_{eff})$ กับ $(1/(T+273.15))$ ที่อุณหภูมิ 65-85°C

ตารางที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลและพลังงานกระตุ้นการอบแห้งจิ้งหรีด

Drying conditions				
Spout air velocity, m/s	Temperature (°C)	D_{eff} ($\times 10^{-8}$ m ² /s)	E_a (kJ/mol)	D_o ($\times 10^{-5}$ m ² /s)
14	65	7.63	17.98	1.53
	75	9.41		
	85	10.9		
16	65	7.95	18.16	1.78
	75	9.74		
	85	11.4		

จากค่าความลาดชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(MR)$ และเวลาในการอบแห้ง ทำให้สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (D_{eff}) แสดงดังตารางที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของการอบแห้งจิ้งหรีดที่อุณหภูมิ 65, 75 และ 85°C มีค่าเท่ากับ 7.63×10^{-8} , 9.41×10^{-8} และ 10.9×10^{-8} m²/s ที่ความเร็วลมสเปาต์ 14 m/s และมีค่าเท่ากับ 7.95×10^{-8} , 9.74×10^{-8} และ 11.4×10^{-8} m²/s ที่ความเร็วลมสเปาต์ 16 m/s ตามลำดับ

การหาค่าพลังงานกระตุ้นสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ในฟังก์ชันลอการิทึมของสมการอาร์เรเนียส โดยสมการจะอยู่ในรูปแบบความสัมพันธ์แบบเส้นตรง [14] เมื่อพิจารณาความลาดชันของเส้นกราฟจากภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(D_{eff})$ กับ $(1/(T+273.15))$ ทำให้ได้ค่า E_a และ D_o แสดงในตารางที่ โดยค่า E_a และ D_o ของการอบแห้งจิ้งหรีดที่อุณหภูมิ 65, 75 และ 85°C ที่ความเร็วลมสเปาต์ 14 m/s มีค่าเท่ากับ 17.98 kJ/mol และ 1.53×10^{-5} m²/s และความเร็วลมสเปาต์ 16 m/s มีค่าเท่ากับ 18.16 kJ/mol และ 1.78×10^{-5} m²/s ที่ ตามลำดับ

สรุปและอภิปรายผล

บทความนี้มีวัตถุประสงค์พัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์ในการทำนายอัตราส่วนความชื้นการอบแห้งจิ้งหรีดด้วยเครื่องอบแห้งแบบสเปาต์เต็ดฟลูอิดเบด ทำการทดลองที่อุณหภูมิอบแห้ง 65, 75 และ 85°C ความเร็วลมสเปาต์ 14 และ 16 m/s ความสูงเบด 10 cm จากผลการวิเคราะห์พบว่า ค่าทางสถิติของแบบจำลองทั้ง 6 แบบที่คำนวณได้มีค่า R^2 อยู่ระหว่าง 0.9781-0.9996 และค่า RMSE ระหว่าง 0.0077-0.0590 โดยแบบจำลองของ Logarithmic มีความเหมาะสมในการทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของจิ้งหรีดได้ดีที่สุด เนื่องจากมีค่า R^2 สูงที่สุด และค่า RMSE โดยค่า R^2 ที่ได้มีค่าอยู่ระหว่าง 0.9989-0.9996 และค่า RMSE มีค่าระหว่าง 0.0124-0.0077 ที่ความเร็วลมสเปาต์ 14 m/s และค่า R^2 ที่ได้มีค่าระหว่าง 0.9987-0.9993 และค่า RMSE มีค่าระหว่าง 0.0126-0.0102 ที่ความเร็วลมสเปาต์ที่ 16 m/s ตามลำดับ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของการอบแห้งจิ้งหรีดที่อุณหภูมิ 65, 75 และ 85°C มีค่าเท่ากับ 7.63×10^{-8} , 9.41×10^{-8} และ 10.9×10^{-8} m²/s ที่ความเร็วลมสเปาต์ 14 m/s และมีค่า 7.95×10^{-8} , 9.74×10^{-8} และ 11.4×10^{-8} m²/s ที่ความเร็วลมสเปาต์ 16 m/s ตามลำดับ โดยค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นที่ได้รับมีค่าสูงกว่าการอบแห้งตากแดดใหม่ (1.8642×10^{-10} - 2.4246×10^{-10} m²/s) [24] และจากผลการทดลองจะพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิการอบแห้งสูงขึ้นจะส่งผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นมีค่าสูงขึ้นสอดคล้องกับผลการอบแห้งด้วยลมร้อนกับผลผลิตทางการเกษตรอื่น [14], [19] เนื่องจากอุณหภูมิในการอบแห้งด้วยลมร้อนเป็นตัวเร่งอัตราการระเหยของน้ำที่ผิวหน้า และมีค่าเท่ากับอัตราการเคลื่อนของน้ำภายในวัสดุที่มาเติมเต็มบริเวณผิวหน้า ความร้อนที่เกิดขึ้นจะถ่ายเทมวลสารในการแพร่กระจายตัวของความชื้นสู่ผิววัสดุ [15] ในส่วน

ค่าพลังงานกระตุ้นมีค่าเท่ากับ 17.98 kJ/mol และ 18.16 kJ/mol ที่ความเร็วลมสเปาต์ 14 และ 16 m/s ตามลำดับ ซึ่งค่าพลังงานกระตุ้นที่ได้รับมีค่ามากกว่ามันอบแห้งฝรั่งเศสแห้ง (13.48-16.50 kJ/mol) [31] แต่น้อยกว่าค่าพลังงานกระตุ้นของอบแห้งมะพร้าวขูด (25.94 kJ/mol) [28] ซึ่งโดยทั่วไปพลังงานกระตุ้นสำหรับการอบแห้งอาหารและผลผลิตทางการเกษตรจะอยู่ในช่วง 12.7–110 kJ/mol [32]

เอกสารอ้างอิง

- [1] Wongsiri, S., Tapa, R., & Wongvilas, S. (2012). Edible insect to be use as food during natural diasters. *The Journal of the Royal Institute of Thailand*, 37(1), 125-139.
- [2] Soithongdee, N., & Nilapornkul, N. (2019). Cost and return of commercial cricket farming. *Journal of College of Graduate Studies in Management, KKU*, 12(1), 165-186.
- [3] Sathapornprasath, K., & Praneetpolkrang, P. (2018). Modeling pepper drying by jet spouted bed technique using ANFIS system. *SWU Engineering Journal*, 13(1), 176-186.
- [4] Ninmnuy, C., Devahastin, S., & Soponronnarit, S. (2007). Effects of process parameters on quality changes of shrimp during drying in a jet-spouted bed dryer. *Journal of food science*, 72(9), 553-563.
- [5] Wachiraphansakul, S., & Devahastin, S. (2005). Drying kinetics and quality of soy residue (okara) dried in a jet spouted bed dryer. *Drying Technology*, 23, 1229-1242.
- [6] Sathapornprasath, K., & Nimmol, C. (2013). Influences of far-infrared radiation on the energy efficiency of stepwise jet spouted bed drying system. *KKU Research Journal*, 18(2), 325-343.
- [7] Sutkar, V.S., Deen, N.G., & Kuipers, J.A.M. (2013). Spout fluidized beds: Recent advances in experimental and numerical studies. *Chemical Engineering Science*, 86, 124-136.
- [8] Monazam, E.R., Breault, R.W., & Weber, J. (2017). Analysis of maximum pressure drop for a flat-base spouted fluid bed. *chemical engineering research and design*, 12(2), 43-51.
- [9] Zhong, W., Zhang, M., Jin, B., Zhang, Y., Xiao, R., & Huang, Y. (2007). Experimental investigation of particle mixing behavior in a large spout-fluid bed. *Chemical Engineering and Processing*, 46, 990-995.
- [10] Marmol, L. (2007). Low temperature drying of pomace in spout and spout-fluid beds. *Journal of Food Engineering*, 79(4), 1179-1190.
- [11] Ciro-Velásquez, H. J., Cunha, R.L., & Menegalli, F.C. (2010). Drying of Xanthan Gum using a two-dimensional spouted fluidized bed (2DSFB) with inert particles: performance and rheological considerations. *Drying Technology*, 28(3), 389-401.
- [12] Zielinska, M., & Markowski, M. (2007). Drying behavior of carrots dried in a spout-fluidized bed dryer. *Drying Technology*, 25(1), 261-270.
- [13] Praneetpolkrang, P., & Sathapornprasath, K. (2021). Thin-layer drying model of jackfruit using artificial neural network in a far infrared dryer. *Engineering and Applied Science Research*, 48(2), 181-189.
- [14] Witinantakit, K., Uengkimbuan, N., & Rungsawang, S. (2019). Mathematical modeling of shiitake mushroom drying using infrared-vacuum technique. *SWU Engineering Journal*, 14(3), 1-13.

- [15] Mugodo, K., & Workneh, T. S. (2021). The kinetics of thin-layer drying and modelling for mango slices and the influence of differing hot-air drying methods on quality. *Heliyon*, 7(6), e07182.
- [16] Adiletta, G., Russo, P., Senadeera, W., & Di Matteo, M. (2016). Drying characteristics and quality of grape under physical pretreatment. *Journal of Food Engineering*, 172, 9-18.
- [17] Rabha, D. K., Muthukumar, P., & Somayaji, C. (2017). Experimental investigation of thin layer drying kinetics of ghost chilli pepper (*Capsicum Chinense* Jacq.) dried in a forced convection solar tunnel dryer. *Renewable Energy*, 105, 583-589.
- [18] Younis, M., Abdelkarim, D., & Zein El-Abdein, A. (2018). Kinetics and mathematical modeling of infrared thin-layer drying of garlic slices. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 25(2), 332-338.
- [19] Kipcak, A. S., & Doymaz, I. (2020). Mathematical Modeling and Drying Characteristics Investigation of Black Mulberry Dried by Microwave Method. *International Journal of Fruit Science*, 20(suppl. 3), S1222-S1233.
- [20] Netkham, H., Tirawanichakul, Y., Chindaruksa, S., & Tirawanichakul, S. (2019). Mathematical model of germinated paddy drying. *Maejo International Journal of Energy and Environmental Communication*, 1(1), 48-52.
- [21] Miraei Ashtiani, S.-H., Salarikia, A., & Golzarian, M. R. (2017). Analyzing drying characteristics and modeling of thin layers of peppermint leaves under hot-air and infrared treatments. *Information Processing in Agriculture*, 4(2), 128-139.
- [22] Salehi, F., & Kashaninejad, M. (2018). Modeling of moisture loss kinetics and color changes in the surface of lemon slice during the combined infrared-vacuum drying. *Information Processing in Agriculture*, 5(4), 516-523.
- [23] El-Mesery, H. S., Kamel, R. M., & Emara, R. Z. (2021). Influence of infrared intensity and air temperature on energy consumption and physical quality of dried apple using hybrid dryer. *Case Studies in Thermal Engineering*, 27, 101365.
- [24] Usub, T., Lertsatitthanakorn, C., Poomsa-ad, N., Wiset, L., Yang, L., & Siriamornpun, S. (2008). Experimental performance of a solar tunnel dryer for drying silkworm pupae. *Biosystems Engineering*, 101, 209-216.
- [25] Kampagdee, M., Poomsa-ad, N., & Wiset, L. (2020). Model for drying of Eri silkworm pupae with microwave and hot air combination. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 54(2), 110-124.
- [26] AOAC. (2000). *Official Method of Analysis of AOAC International*. 17th edition. The Association of Official Analytical Chemists, Arlington, Virginia.
- [27] Sathapornprasath, K., Taveechoontham, K., Talabthong K., & Promma-aon, C. (2020). Pepper drying used spouted bed combined with fluidized bed technique. *SWU Engineering Journal*, 15(1), 1-11.
- [28] Madhiyanon, T., Phila, A., & Soponronnarit, S. (2009). Models of fluidized bed drying for thin-layer chopped coconut. *Applied Thermal Engineering*, 29, 2849-2854.

- [29] Saniso, E., Saud, F., & Hanafee, R. (2012). Moisture diffusivity coefficient specific energy consumption and specific moisture extraction rate of betel nut drying using combined thermal energy. *Burapha Science Journal*, 17(1), 142-149.
- [30] Srisuriyawong, S., Wanlapa, S., Phromjan, W., & Chankamma, N. (2014). Drying kinetics of paddy dried with the small-scale paddy dryer. *Agricultural Science Journal*, 45(2), 345-348.
- [31] Fan, K., Chen, L., He, J., & Yan, F. (2015). Characterization of thin layer hot air drying of sweet potatoes (*Ipomoea batatas* L.) slices. *Journal of Food Processing and Preservation*, 39(6), 1361-1371.
- [32] Xiao, H. W., Yao, X. D., Lin, H., Yang, W. X., Meng, J. S., & Gao, Z. J. (2012). Effect of SSB (superheated steam blanching) time and drying temperature on hot air impingement drying kinetics and quality attributes of yam slices. *Journal of Food Process Engineering*, 35(3), 370-390.