



Srinakharinwirot University Journal of Sciences and Technology

Volume 17, Issue 1, January - June 2025, Pages 1 – 14 ISSN 2985-2641 (Online)



Research Article

แบบจำลองการอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมสำหรับเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลม

Suitable thin layer drying model for pneumatic paddy dryer

อภิสิทธิ์ ภัคดิแก้ว^{1*}, มนพร คุปตาสา¹, มานพ แยมแพง¹, กระวี ตรีอำนรรค², เทวรัตน์ ตรีอำนรรค³Aphisik Pakdeekaew^{1*}, Manaporn Kuptasa¹, Manop Yamfang¹, Krawee Treeamnu², Tawarat Treeamnu³¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi.²สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี²School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology.³สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี³School of Agricultural Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology.

*Corresponding author, e-mail: aphisik.p@en.rmutt.ac.th

Received: 30 September 2024; Revised: 24 December 2024; Accepted: 27 December 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อคัดเลือกแบบจำลองการอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมสำหรับเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลม ข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ปริมาณ 20 กิโลกรัม ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 26 ฐานเปียก ถูกใช้เป็นตัวอย่งในการทดลอง กำหนดความเร็วอากาศอบแห้งเท่ากับ 8.5 เมตรต่อวินาที และความเร็วรอบมอเตอร์เกียร์ลาล้างข้าวเปลือกที่ 50 รอบต่อนาที คงที่ตลอดการทดสอบ การอบแห้งข้าวเปลือกถูกแบ่งด้วยค่าอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 3 ระดับ ได้แก่ 60 80 และ 100 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่า แบบจำลองของ Midilli et al. มีความเหมาะสมแก่การทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นข้าว ณ เงื่อนไขอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 60 องศาเซลเซียส มากที่สุดเมื่อเปรียบกับแบบจำลองเอมพิริคัลรูปแบบอื่น โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.999 RMSE เท่ากับ 0.0072 และค่า χ^2 เท่ากับ 0.000062 แบบจำลองของ Wang and Singh มีความเหมาะสมแก่การทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นข้าว ณ เงื่อนไขอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80 องศาเซลเซียส โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.999 RMSE เท่ากับ 0.0054 และค่า χ^2 เท่ากับ 0.000033 และแบบจำลองของ Verma et al. มีความเหมาะสมแก่การทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นข้าว ณ เงื่อนไขอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 100 องศาเซลเซียส โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.999 RMSE เท่ากับ 0.0052 และค่า χ^2 เท่ากับ 0.000038 เมื่อคัดเลือกแบบจำลองของ Midilli et al. และ Verma

et al. มาใช้หาแบบจำลองสำหรับทำนายพฤติกรรมการอบแห้งในช่วงอุณหภูมิ 60 ถึง 100 องศาเซลเซียส พบว่า แบบจำลองของ Midilli et al. สามารถทำนายผลของอัตราส่วนความชื้นข้าวในระหว่างกระบวนการอบแห้งได้แม่นยำสูงสุด โดยผลจากการประเมินแบบจำลอง มีค่า R^2 เท่ากับ 0.999 RMSE เท่ากับ 0.0066 และค่า χ^2 เท่ากับ 0.000047 ตามลำดับ แบบจำลองที่ได้สามารถนำไปใช้ศึกษาการทำนายความชื้นข้าวเปลือกระหว่างกระบวนการอบแห้งสำหรับวางแผนการทำงานและการจัดการพลังงานของเครื่องอบแห้งต่อไปได้ในอนาคต

คำสำคัญ: แบบจำลองการอบแห้งชั้นบาง; อบแห้ง; ข้าวเปลือก; เครื่องอบแห้งพาหะลม; แบบจำลองเอมพิริคัล

Abstract

The objective of this research was to select a suitable thin layer drying model for a Pneumatic paddy dryer. In the experiment, Khao Dok Mali 105 rice, with a quantity of 20 kilograms and an initial moisture content of 26 percent (wet basis), was used as the sample. Set the drying air velocity to 8.5 meters per second and the motor speed to help drive the rice was constant at 50 revolution per minute throughout the test. The paddy drying process is categorized into three different drying air temperature conditions: 60, 80 and 100 degrees Celsius, respectively. The study found that the Midilli et al. model was the most suitable for predicting the moisture ratio of rice at a drying air temperature of 70 degrees Celsius, compared to other empirical models. It had R^2 of 0.999, RMSE of 0.0072, and χ^2 value of 0.000062. The Wang and Singh model proved to be the most appropriate for predicting moisture ratio at a drying air temperature of 80 degrees Celsius, with R^2 of 0.999, RMSE of 0.0054, and χ^2 value of 0.000033. Lastly, the Verma et al. model was found suitable for predicting moisture ratio at a drying air temperature of 100 degrees Celsius, with R^2 of 0.999, RMSE of 0.0052, and χ^2 value of 0.000038. When these models were further refined for predicting drying behavior within the temperature range of 60 to 100 degrees Celsius, it was observed that the Midilli et al. model provided the highest precision in predicting rice moisture content during the drying process, with R^2 of 0.999, RMSE of 0.0066, and χ^2 value of 0.000047, respectively. The obtained model can be used to study the prediction of paddy moisture content during the drying process for planning the operation and energy management of dryers in the future.

Keywords: Thin Layer Drying Model; Drying; Rough Rice; Pneumatic Dryer; Empirical Model

บทนำ

ข้าวเป็นพืชที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจและวัฒนธรรมของประเทศไทย ข้าวไม่เพียงเป็นอาหารหลักของคนไทยเท่านั้น แต่ยังเป็นที่ยอมรับจากทั่วโลกด้วยคุณภาพและรสชาติที่อร่อยเฉพาะตัว สมาคมผู้ส่งออกข้าวไทยรายงานการส่งออกข้าวในช่วงเดือน มกราคม ถึง สิงหาคม 2567 มีปริมาณ 6,570,230 ตัน คิดเป็นมูลค่า 152,556.2 ล้านบาท โดยมีปริมาณส่งออกเพิ่มขึ้น 24% และมูลค่าการส่งออกเพิ่มขึ้น 51% เมื่อเปรียบเทียบกับช่วงเดียวกันในปี 2566 [1] ดังนั้นอุตสาหกรรมข้าวไทยจึงมีส่วนช่วยส่งเสริมเศรษฐกิจและความเป็นอยู่ของเกษตรกรไทยเป็นอย่างมาก

โดยทั่วไปข้าวเปลือกหลังเก็บเกี่ยวใหม่จะมีความชื้นสูงประมาณร้อยละ 22 ถึง 26 ตามแต่ละพื้นที่การเก็บเกี่ยว ในสถานะที่ข้าวมีความชื้นสูงนั้นมีความเสี่ยงอย่างมากต่อการเข้าทำลายของสัตว์และการเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ต่าง ๆ ตามข้อกำหนดของ International Rice Research Institute (IRRI) ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมสำหรับการเก็บข้าวเปลือกเป็นระยะเวลา 8 ถึง 12 เดือนจะกำหนดไว้ไม่เกินร้อยละ 14 มาตรฐานเปียก นอกจากนี้หากจำเป็นต้องเก็บข้าวเพื่อใช้เป็นเมล็ดพันธุ์ จำเป็นต้องลดความชื้นให้ต่ำกว่าร้อยละ 12 มาตรฐานเปียก เพื่อรักษาข้าวไว้โดยไม่กระทบต่อคุณภาพเมื่อเก็บไว้ภายใต้สภาพแวดล้อมทั่วไป [2] ด้วยข้อจำกัดของการอบแห้งแบบดั้งเดิม (Conventional drying) ซึ่งต้องใช้พื้นที่ แร่งงาน อุปกรณ์ ตลอดจนสภาพอากาศที่อาจไม่เอื้ออำนวยต่อการตากแห้ง ส่งผลให้มีการลดความชื้นด้วยเครื่องอบแห้งเชิงกล (Mechanical drying) มากขึ้นในปัจจุบัน [3]

ช่วงทศวรรษที่ผ่านมา เทคนิคการอบแห้งพาหะลมเริ่มเป็นที่รู้จักแพร่หลายมากขึ้น ด้วยเทคนิคการอบแห้งรูปแบบนี้มีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูง ทำให้วัสดุถูกลดความชื้นลงได้อย่างรวดเร็ว [4] แต่อย่างไรก็ตาม การดำเนินการของเครื่องอบแห้งจำเป็นต้องใช้ต้นทุนทางพลังงานในการดำเนินงานสูงเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องอบแห้งแบบไหลคลุกเคล้าที่นิยมใช้กันอยู่ในระดับอุตสาหกรรม [5] ดังนั้นจึงมีการวิจัยและพัฒนาเทคนิคการอบแห้งแบบพาหะลมน้อยอย่างต่อเนื่องมาจนถึงปัจจุบัน เช่น การประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลม [6] การศึกษาอิทธิพลของอากาศอบแห้งแบบเป็นช่วงต่อการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม [7]

การศึกษาด้านพลศาสตร์การอบแห้งเป็นข้อสำคัญประการหนึ่งในการพัฒนาระบบอบแห้งให้มีศักยภาพสูงขึ้น ทั้งในแง่ของการจำลองพฤติกรรมของระบบ การลดระยะเวลาและค่าใช้จ่ายในการทดลอง ตลอดจนใช้ในวางแผนการเดินเครื่องจักรเพื่อการประหยัดพลังงาน จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า แบบจำลองเอมพิริคัล (Empirical model) เป็นรูปแบบสมการที่สร้างขึ้นจากข้อมูลการทดลอง ซึ่งถูกใช้อย่างแพร่หลายในการศึกษาการอบแห้งวัสดุเกษตรและอาหาร ผลการศึกษาที่ผ่านมา พบว่า แบบจำลองลักษณะนี้มีประสิทธิภาพในการทำนายค่าตัวแปรตามของระบบอบแห้งที่มีความสอดคล้องของข้อมูลสูงอย่างมีนัยสำคัญ [8] ดังนั้นการสร้างแบบจำลองเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงความชื้นของการอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้แบบจำลองเอมพิริคัลสำหรับปัญหาการอบแห้งชั้นบางจึงเป็นที่นิยมน้อยกว่าแพร่หลายในปัจจุบัน [9-12] และถึงแม้ว่าในหลากหลายงานวิจัยที่อ้างถึงจะมีการใช้แบบจำลองเอมพิริคัลในการศึกษาพฤติกรรมการอบแห้งชั้นบาง แต่กับการศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งพาหะลมยังมีอยู่น้อยมากในปัจจุบัน

จากความสำคัญของปัญหาที่กล่าวมาข้างต้น ผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาถึงการพิจารณาค้นหาแบบจำลองอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมสำหรับเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมที่ใช้ในการทดสอบ โดยสมการเอมพิริคัล 10 รูปแบบ ได้รับการคัดเลือกจากความนิยมใช้ในงานวิจัยที่ผ่านมา ทั้งนี้แบบจำลองที่ได้จะมีประโยชน์ในการทำนายอัตราส่วนความชื้นข้าวเปลือกระหว่างกระบวนการอบแห้ง เพื่อใช้วางแผนการทำงานและการจัดการพลังงานของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมได้อย่างเหมาะสมต่อไป

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อคัดเลือกแบบจำลองอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมสำหรับเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลม

วิธีดำเนินการวิจัย

เนื้อหาส่วนนี้อธิบายขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างข้าว การทดลองอบแห้งข้าวเปลือก ตลอดจนวิธีวิเคราะห์หาแบบจำลองชั้นบางที่เหมาะสมในการทำนายอัตราส่วนความชื้นข้าวระหว่างกระบวนการอบแห้ง ประกอบด้วย 4 หัวข้อย่อยดังต่อไปนี้

1. การเตรียมตัวอย่างข้าวสำหรับทดลอง

งานวิจัยนี้ใช้ข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 เป็นตัวอย่างในการอบแห้ง ตัวอย่างข้าวได้รับการตรวจสอบความชื้นเริ่มต้นโดยวิธีอบลมร้อนอุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ตามวิธีมาตรฐานของ AOAC 1990 [13] ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกคำนวณได้จากสมการที่ 1 และ 2 [4] ทำการกำหนดความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกให้มีค่าเท่ากับร้อยละ 24 ฐานเปียก หรือเท่ากับร้อยละ 32 ฐานแห้ง เพื่อให้ความชื้นข้าวสอดคล้องกับข้าวเปลือกที่ผ่านการเก็บเกี่ยวใหม่ จึงต้องคำนวณปริมาณน้ำสำหรับเติมกลับเข้าไปยังข้าวเปลือกให้ได้ความชื้นตามต้องการดังสมการที่ 3 [4] ข้าวเปลือกหลังการเติมน้ำแล้วถูกบรรจุในถุงปิดผนึกและเก็บในห้องเย็นอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดการแพร่กระจายตัวของความชื้นข้าวอย่างทั่วถึงก่อนนำไปทดลอง

$$MC_{db} = \frac{m_w - m_d}{m_d} \quad (1)$$

$$MC_{wb} = \frac{m_w - m_d}{m_w} \quad (2)$$

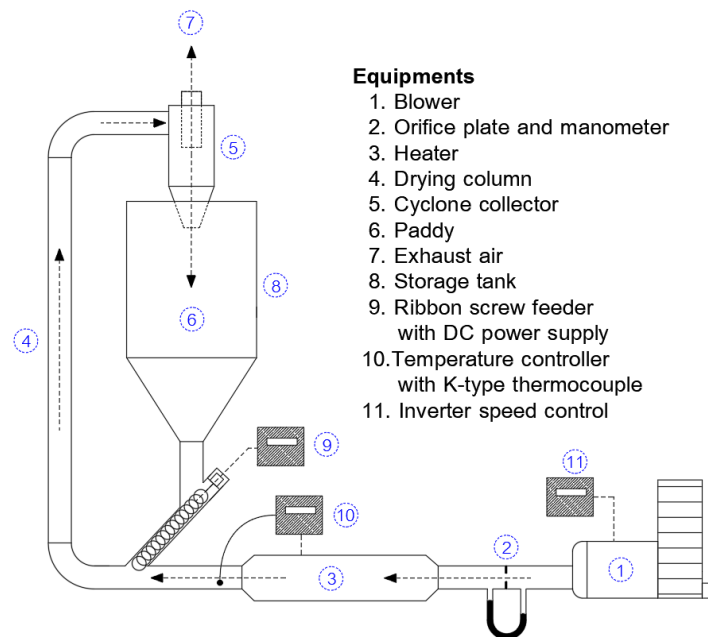
$$m_{add} = m_d (MC_{target} - MC_{db}) \quad (3)$$

โดยที่	MC_{db}	คือ ความชื้นข้าวฐานแห้ง (ทศนิยม)
	MC_{wb}	คือ ความชื้นข้าวฐานเปียก (ทศนิยม)
	m_w	คือ มวลข้าวเปลือกก่อนอบไล่ความชื้น หรือมวลรวมของข้าวเปลือก (กรัม)
	m_d	คือ มวลข้าวเปลือกหลังอบไล่ความชื้น หรือมวลแห้งของข้าวเปลือก (กรัม)
	m_{add}	คือ มวลของน้ำที่ต้องเติมให้แก่ข้าว (กรัม)
	MC_{target}	คือ ความชื้นข้าวที่ต้องการ หรือเท่ากับร้อยละ 32 ฐานแห้ง (ทศนิยม)

2. การทดลองอบแห้งข้าวเปลือก

2.1 เครื่องอบแห้งพาหะลม

งานวิจัยนี้ใช้เครื่องอบแห้งแบบพาหะลมในการอบแห้งข้าวเปลือก ส่วนประกอบต่าง ๆ ของเครื่องอบแห้งแสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 แผนภาพของเครื่องอบแห้งพาสลัม

เครื่องอบแห้งชนิดนี้อาศัยพัดลม (หมายเลข 1) สร้างการไหลอากาศผ่านอุปกรณ์ทำความร้อน (หมายเลข 3) ทำงานร่วมกับชุดควบคุมอุณหภูมิแบบพีไอดี (หมายเลข 10) เพื่อผลิตอากาศร้อน อัตราการไหลอากาศถูกกำหนดโดย มานอมิเตอร์ (หมายเลข 2) และอินเวอร์เตอร์ (หมายเลข 11) ซึ่งควบคุมความเร็วรอบการทำงานของพัดลม ขณะที่ข้าวเปลือก จากถังเก็บ (หมายเลข 8) ไหลลงตามแรงโน้มถ่วงโดยมีเกลียวแบบรีบบิ้นช่วยขับเคลื่อนมวลข้าว (หมายเลข 9) เมื่อข้าวพบกับ อากาศร้อนซึ่งมีความเร็วสูงกว่าความเร็วสุดท้ายของข้าวเปลือก (terminal velocity) ส่งผลให้เมล็ดข้าวจึงล่อนหลุด ผ่านหอบแห้ง (หมายเลข 4) และไหลเข้าสู่ไซโคลน (หมายเลข 5) เพื่อแยกเมล็ดข้าว (หมายเลข 6) และอากาศ (หมายเลข 7) ออกจากกัน

2.2 เงื่อนไขการทดลอง

ข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้น 24% ฐานเปียก ปริมาณ 20 กิโลกรัม ได้รับการอบแห้งโดยกำหนดการความเร็ว อากาศอบแห้งคงที่เป็น 8.5 เมตรต่อวินาที (ผ่านหน้าตัดท่อขนาด 1.5 นิ้ว) มอเตอร์ขับเคลื่อนเกลียวปล่อยข้าวได้รับการจ่ายไฟ กระแสตรง 12 โวลต์ (50 รอบต่อวินาที) เพื่อปล่อยข้าวเปลือกด้วยอัตรา 3.33 กิโลกรัม (มวลแห้ง) ต่อชั่วโมง ตัวแปรเหล่านี้ ถูกควบคุมให้คงที่ตลอดการทดสอบ กำหนดอุณหภูมิอากาศอบแห้งคงที่ในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง แบ่งเป็น 3 ค่า ได้แก่ 60 80 และ 100 องศาเซลเซียส เนื่องจากช่วงอุณหภูมิอบแห้งดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [6-7] ซึ่งทำให้ข้าวเปลือก ยังคงมีร้อยละข้าวต้นสูง แม้จะปะทะกับอากาศร้อนเป็นเวลานานในการอบแห้งเป็นงวด หลังจากนั้นทำการสุ่มเก็บตัวอย่าง ข้าวเปลือก ณ ทางออกของไซโคลนทุก 15 นาที เพื่อนำมาตรวจสอบความชื้นตามสมการที่ 2 สำหรับเป็นข้อมูลในการพัฒนา แบบจำลองต่อไป ทั้งนี้การทดลองในแต่ละเงื่อนไขจะยุติลงเมื่อข้าวเปลือกมีความชื้นลดลงถึงร้อยละ 14 ฐานเปียก

2.3 แบบจำลองอบแห้งชั้นบาง

งานวิจัยนี้คัดเลือกแบบจำลองเอมพิริคัล (Empirical model) ซึ่งได้รับความนิยมในการทำนายการเปลี่ยนแปลง ความชื้นของข้าวเปลือกในกระบวนการอบแห้ง จำนวน 10 แบบจำลอง ประกอบด้วย แบบจำลองของ Newton, Page,

Henderson and Pabis, Logarithmic, Two term, Midilli et al., Verma et al., Modified Henderson and Pabis, Logistic และ Wang and Singh แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แบบจำลองเอมพิริคัลแบบต่าง ๆ [8-13]

ลำดับที่	ชื่อแบบจำลอง	แบบจำลอง
1	Newton	$MR = \exp(-kt)$
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$
3	Henderson and Pabis	$MR = a \cdot \exp(-kt)$
4	Logarithmic	$MR = a \cdot \exp(-kt) + b$
5	Two term	$MR = a \cdot \exp(-kt) + b \cdot \exp(-gt)$
6	Midilli et al.	$MR = a \cdot \exp(-kt^n) + (bt)$
7	Verma et al.	$MR = a \cdot \exp(-kt) + (1-a) \exp(-gt)$
8	Modified Henderson and Pabis	$MR = a \cdot \exp(-kt) + b \cdot \exp(-gt) + c \cdot \exp(-ht)$
9	Logistic	$MR = a / [1 + \exp(-kt)]$
10	Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$

อัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio, MR) คือปริมาณความชื้นภายในวัสดุขณะอบแห้งเทียบกับปริมาณความชื้นทั้งหมดของวัสดุที่ระเหยได้ภายใต้สภาวะอบแห้งหนึ่ง ๆ ประเมินได้จากสมการที่ 4 [4, 8] ข้อมูลนี้เป็นข้อมูลการทดลองที่ใช้เปรียบเทียบกับแบบจำลองอบแห้งชิ้นบางเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ ที่ปรากฏอยู่ในตารางที่ 1 และค่าความชื้นสมดุลสามารถประเมินได้จากสมการกึ่งทฤษฎีซึ่งพัฒนาโดย Henderson [4] ดังสมการที่ 5

$$MR = \frac{MC_{time} - MC_{eq}}{MC_{initial} - MC_{eq}} \quad (4)$$

$$MC_{eq} = \frac{1}{100} \left[\frac{\ln(1 - RH)}{C_1 T} \right]^{1/C_2} \quad (5)$$

โดยที่	MR	คือ อัตราส่วนความชื้น
	MC_{time}	คือ ความชื้นชั่ว ณ เวลาใด ๆ (เปอร์เซ็นต์)
	MC_{eq}	คือ ความชื้นสมดุล (เปอร์เซ็นต์)
	$MC_{initial}$	คือ ความชื้นชั่วเริ่มต้น (เปอร์เซ็นต์)
	T	คือ อุณหภูมิอากาศอบแห้ง (เคลวิน)
	RH	คือ ความชื้นสัมพัทธ์อากาศอบแห้ง (ทศนิยม)
	C_1	คือ ค่าคงที่มีค่าเท่ากับ -3.146×10^{-6}
	C_2	คือ ค่าคงที่มีค่าเท่ากับ 2.464

ค่าคงที่ของแบบจำลองในตารางที่ 1 ประเมินจากการวิเคราะห์เชิงตัวเลขโดยวิธี Levenberg - Marquardt Estimation เนื่องจากเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการแก้ปัญหาค่าตัวแปรพารามิเตอร์สำหรับฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น มีจุดเด่นที่ชัดเจนในเรื่องของความยืดหยุ่น ความเสถียร และประสิทธิภาพ ซึ่งมีความเหมาะสมกับการแก้ปัญหาค่าตัวแปรในแบบจำลองเอมพิริคัล ซึ่งมีความไม่เชิงเส้นและมีความโค้งของข้อมูลที่ซับซ้อน [14-15] ทั้งนี้ระเบียบวิธี Levenberg - Marquardt ที่นำมาใช้งาน ผู้วิจัยดำเนินการด้วยโปรแกรม IBM SPSS Statistics

2.4 การประเมินความเหมาะสมของแบบจำลอง

แบบจำลองทั้ง 10 รูปแบบ ได้รับการตรวจสอบความถูกต้องของการทำนายค่าตัวแปรตาม (อัตราส่วนความชื้น) ด้วยตัวแปรทางสถิติ 3 ตัว ได้แก่ สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination, R^2) รากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error, RMSE) และไคสแควร์ (Chi-Square, χ^2) จำนวนได้ดังสมการที่ 6 ถึง สมการที่ 8 ตามลำดับ [8, 11, 16] โดยที่ R^2 เป็นตัวแปรบ่งชี้ความสอดคล้องของข้อมูลการทดลองกับแบบจำลองที่สร้างขึ้นมีมากน้อยเพียงใด ค่า R^2 มีค่าระหว่าง 0 – 1 หาก R^2 มีค่าเข้าใกล้ 1 มาก แสดงว่าแบบจำลองสามารถอธิบายพฤติกรรม การลดความชื้นได้ดี ส่วน RMSE บ่งบอกถึงขนาดความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยระหว่างค่าคาดการณ์ (Predicted Values) ในที่นี้คือ อัตราส่วนความชื้นที่คำนวณได้จากแบบจำลอง กับค่าจริง (Observed Values) ในที่นี้คืออัตราส่วนความชื้นจริงจากการทดลอง ในทำนองเดียวกัน ค่า χ^2 ได้รับการนำมาพิจารณาร่วมด้วย เนื่องจากการประเมินการกระจายตัวและความสอดคล้องระหว่างข้อมูลการทดลองและแบบจำลอง การที่ RMSE และ χ^2 มีค่าใกล้ 0 แสดงว่า แบบจำลองสามารถอธิบาย พฤติกรรมการลดความชื้นได้ดี มีความคลาดเคลื่อนน้อย และมีความสอดคล้องของข้อมูลในเชิงสถิติที่ดี สำหรับการคัดเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมในงานวิจัย พิจารณาได้จากค่า RMSE กับ ค่า χ^2 ที่เข้าใกล้ 0 และค่า R^2 ที่เข้าใกล้ 1 มากที่สุด

$$R^2 = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^{i=n} (MR_{exp} - MR_{pred})^2}{\sum_{i=1}^{i=n} (MR_{exp} - MR_{avg})^2} \right) \quad (6)$$

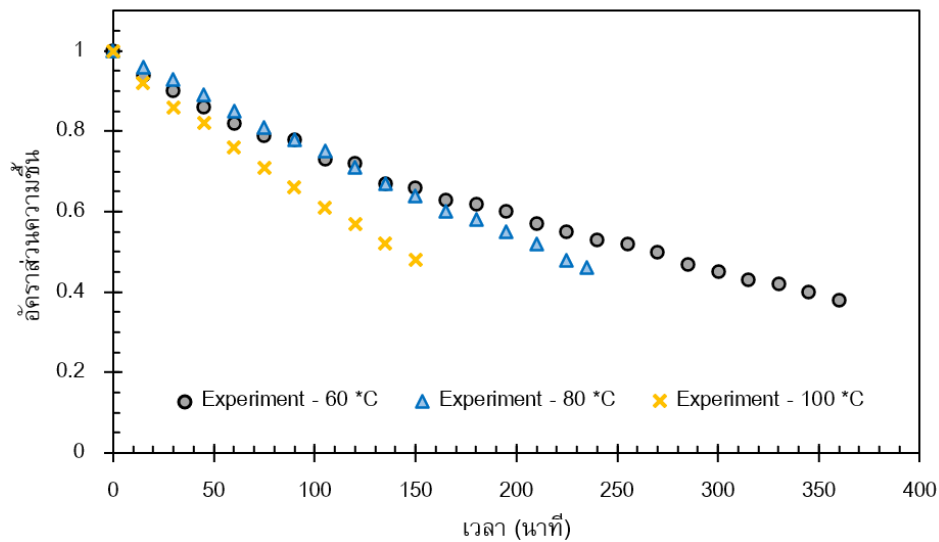
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} (MR_{exp} - MR_{pred})^2}{n}} \quad (7)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (MR_{exp} - MR_{pred})^2}{n - z} \quad (8)$$

โดยที่ MR_{exp} คือ อัตราส่วนความชื้นจากการทดลอง
 MR_{pred} คือ อัตราส่วนความชื้นจากแบบจำลอง
 MR_{avg} คือ อัตราส่วนความชื้นเฉลี่ย
 n คือ จำนวนข้อมูล
 z คือ จำนวนค่าคงที่ในแบบจำลอง

ผลการวิจัย

ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปในระหว่างกระบวนการอบแห้ง ณ อุณหภูมิอากาศอบแห้งคงที่ 60 80 และ 100 องศาเซลเซียส แสดงดังภาพที่ 2 เมื่อนำผลการทดลองนี้ไปใช้เป็นข้อมูลสำหรับหาค่าคงที่ในสมการเอมพิริคัลแบบต่าง ๆ ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.3 ให้ผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 2



ภาพที่ 2 อัตราส่วนความชื้นข้าวที่เปลี่ยนแปลงระหว่างการอบแห้ง ณ เงื่อนไขอุณหภูมิอบแห้งต่าง ๆ

ตารางที่ 2 ค่าคงที่และผลการประเมินความแม่นยำของแบบจำลองเอมพิริคัลในแต่ละเงื่อนไขการอบแห้ง

ชื่อแบบจำลอง	อุณหภูมิ	ค่าคงที่ในแบบจำลอง	R^2	RMSE	χ^2
Newton	60	$k = 0.003$	0.993	0.0152	0.000242
	80	$k = 0.003$	0.992	0.0155	0.000256
	100	$k = 0.005$	0.998	0.0085	0.000080
Page	60	$k = 0.005, n = 0.904$	0.997	0.0092	0.000913
	80	$k = 0.001, n = 1.149$	0.999	0.0073	0.000060
	100	$k = 0.004, n = -0.996$	0.998	0.0080	0.000078
Henderson and Pabis	60	$a = 0.974, k = 0.003$	0.997	0.0098	0.000104
	80	$a = 1.021, k = 0.003$	0.995	0.0121	0.000167
	100	$a = 1, k = 0.005$	0.998	0.0085	0.000089
Logarithmic	60	$a = -0.973, k = 1, b = 0.99$	0.997	0.0094	0.000100
	80	$a = 2.376, k = 0.001, b = -1.374$	0.999	0.0054	0.000036
	100	$a = 1.373, k = 0.003, b = -0.382$	0.998	0.0060	0.000050
Two term	60	$a = 0.4, k = 0.063, b = 0.96, g = 0.002$	0.998	0.0082	0.000081
	80	$a = 0.870, k = 0.003, b = 0.151,$	0.995	0.0121	0.000192

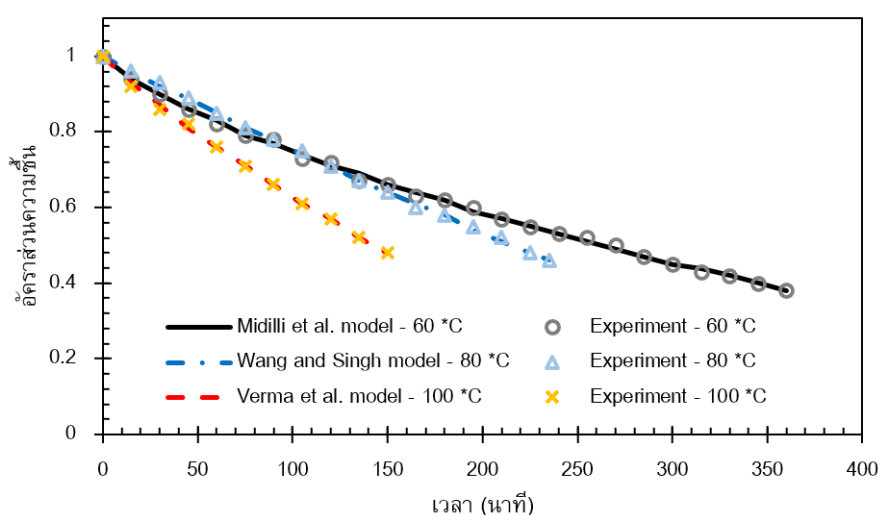
ชื่อแบบจำลอง	อุณหภูมิ	ค่าคงที่ในแบบจำลอง	R^2	RMSE	χ^2
		$g = 0.003$			
	100	$a = 0.995, k = 0.004, b = -0.001, g = -0.021$	0.999	0.0060	0.000057
Midilli et al	60	$a = 1.001, k = 0.008, n = 0.738, b = -0.000463$	0.999	0.0072	0.000062
	80	$a = 0.999, k = 0.002, n = 1.056, b = -0.001$	0.999	0.0054	0.000038
	100	$a = 0.962, k = 0.001, n = -1.247, b = -0.003$	0.998	0.0074	0.000086
Verma et al	60	$a = 0.96, k = 0.002, g = 0.062$	0.998	0.0083	0.000077
	80	$a = -2.673, k = 0.000224, g = 0.001$	0.999	0.0054	0.000036
	100	$a = -8.945 \times 10^{-5}, k = -0.037, g = 0.005$	0.999	0.0052	0.000038
Modified Henderson and Pabis	60	$a = 0.062, k = 0.032, b = -0.000399, g = -0.012, c = 0.938, h = 0.002$	0.999	0.0077	0.000079
	80	$a = 0.807, k = 0.003, b = 0.107, g = 0.003, c = 0.107, h = 0.003$	0.995	0.0121	0.000227
	100	$a = 1.035, k = 0.004, b = -0.001, g = -0.021, c = -0.04, h = 0.004$	0.999	0.0060	0.000080
Logistic	60	$a = 1.895, k = -0.004$	0.991	0.0165	0.000296
	80	$a = 2.004, k = -0.005$	0.999	0.0059	0.000040
	100	$a = 1.967, k = -0.008$	0.998	0.0080	0.000078
Wang and Singh	60	$a = -0.003, b = 2.859 \times 10^{-6}$	0.992	0.0149	0.000243
	80	$a = -0.003, b = 1.195 \times 10^{-6}$	0.999	0.0054	0.000033
	100	$a = -0.004, b = 6.421 \times 10^{-6}$	0.998	0.0080	0.000078

สรุปและอภิปรายผล

พิจารณาพฤติกรรมการอบแห้งข้าวเปลือกดังภาพที่ 2 พบความเป็นเชิงเส้นของจุดข้อมูลสูงในช่วงเวลา 50 ถึง 100 นาทีแรกของการอบแห้งจากทั้ง 3 อุณหภูมิ ในช่วงต่อมาพบการลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียล (Exponential function) โดยมีความโค้งที่เล็กลงตามระยะเวลาการอบแห้ง เมื่อวิเคราะห์หาค่าคงที่ในสมการเอมพิริคัลแบบต่าง ๆ พบว่าแบบจำลองแต่ละรูปแบบที่นำมาวิเคราะห์สามารถทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นข้าวได้เป็นอย่างดี โดยทั้ง 10 แบบจำลองนี้ให้ผลการประเมินความแม่นยำที่ R^2 สูงกว่า 0.99 ประกอบกับค่า RMSE และ χ^2 มีค่าเข้าใกล้ 0 เป็นอย่างมาก พบลักษณะเดียวกันนี้ในทุกแบบจำลองและทุกอุณหภูมิที่ใช้ออบแห้ง อันเนื่องมาจากแบบจำลองเหล่านี้มีฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียลเป็นพื้นฐาน ผิดกับบางฟังก์ชันมีลักษณะเป็นฟังก์ชันโพลิโนเมียล (Polynomials function) ที่สามารถประมาณค่าตัวแปร

เข้ากับข้อมูลการทดลองได้เป็นอย่างดี ทำให้แต่ละแบบจำลองสามารถทำนายผลอัตราส่วนความชื้นข้าวเปลือกระหว่างกระบวนการอบแห้งได้อย่างแม่นยำ

จากการประเมินความสามารถของแบบจำลองในแต่ละอุณหภูมิอากาศอบแห้งตามตารางที่ 2 พบว่า แบบจำลองของ Midilli et al. มีความเหมาะสมแก่การทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นข้าว ณ เงื่อนไขอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 60 องศาเซลเซียส มากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองเอมพิริคัลรูปแบบอื่น โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.999 RMSE เท่ากับ 0.0072 และค่า χ^2 เท่ากับ 0.000062 ส่วนแบบจำลองของ Wang and Singh มีความเหมาะสมแก่การทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นข้าว ณ เงื่อนไขอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80 องศาเซลเซียส โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.999 RMSE เท่ากับ 0.0054 และค่า χ^2 เท่ากับ 0.000033 และแบบจำลองของ Verma et al. มีความเหมาะสมแก่การทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นข้าว ณ เงื่อนไขอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 100 องศาเซลเซียส โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.999 RMSE เท่ากับ 0.0052 และค่า χ^2 เท่ากับ 0.000038 ตามลำดับ ผลของการประมาณค่าอัตราส่วนความชื้นข้าวจากแบบจำลองเหล่านี้ แสดงดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 อัตราส่วนความชื้นข้าวเปลือกจากแบบจำลองที่เหมาะสม ณ เงื่อนไขอุณหภูมิตอบแห้งต่าง ๆ

ถึงแม้ว่าแบบจำลองทั้ง 3 รูปแบบที่ได้กล่าวมาก่อนหน้านี้จะสามารถทำนายผลตัวแปรตามได้เป็นอย่างดี แต่ทำงานได้ดีภายใต้ข้อจำกัดของการอบแห้งแห้งข้าวเปลือกในแต่ละอุณหภูมิเท่านั้น ๆ ซึ่งอาจจะไม่สามารถประเมินการทำงานได้หรือทำงานได้ไม่ดีหากต้องการศึกษาพฤติกรรมการอบแห้งในช่วงอุณหภูมิอากาศอบแห้งระหว่าง 60 ถึง 100 องศาเซลเซียส ดังนั้น ผู้วิจัยจึงทำการเลือกแบบจำลองที่ได้รับการประเมินเบื้องต้นแล้วก่อนหน้านี้ (จากตารางที่ 1) โดยเลือกแบบจำลองที่มีค่า R^2 เกิน 0.998 ขึ้นไปในทุกอุณหภูมิการอบแห้งมาวิเคราะห์ต่อ เพื่อลดข้อจำกัดดังที่ได้กล่าวไว้ และประเมินความสามารถในการทำนายผลตัวแปรตามต่อไป แบบจำลองของ Midilli et al. และแบบจำลองของ Verma et al. ได้รับการคัดเลือกเพื่อมาวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์หน้าตัวแปร โดยผู้วิจัยได้ดัดแปลงและเพิ่มพจน์ของอุณหภูมิอากาศอบแห้งรูปแบบฟังก์ชันโพลิโนเมียลเข้าไปยังค่าคงที่ a, k, b, n, g ในแบบจำลอง ดังสมการที่ 9 – 13 เนื่องจากฟังก์ชันโพลิโนเมียลมีรูปแบบที่ยืดหยุ่นและเหมาะสำหรับการปรับโค้ง (Curve Fitting) กับข้อมูลที่ต้องการความแม่นยำในช่วงที่สนใจ [9, 11] จึงเหมาะสมแก่การนำมาประยุกต์ใช้กับข้อมูลการอบแห้งซึ่งอธิบายโดยความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้น

$$a = a_1T^2 + a_2T + a_3 \quad (9)$$

$$k = k_1T^2 + k_2T + k_3 \quad (10)$$

$$b = b_1T^2 + b_2T + b_3 \quad (11)$$

$$n = n_1T^2 + n_2T + n_3 \quad (12)$$

$$g = g_1T^2 + g_2T + g_3 \quad (13)$$

โดยที่ a_i, k_i, b_i, n_i, g_i คือ ค่าคงที่ของแบบจำลอง ($i=1,2,3$)
 T คือ อุณหภูมิอากาศอบแห้ง

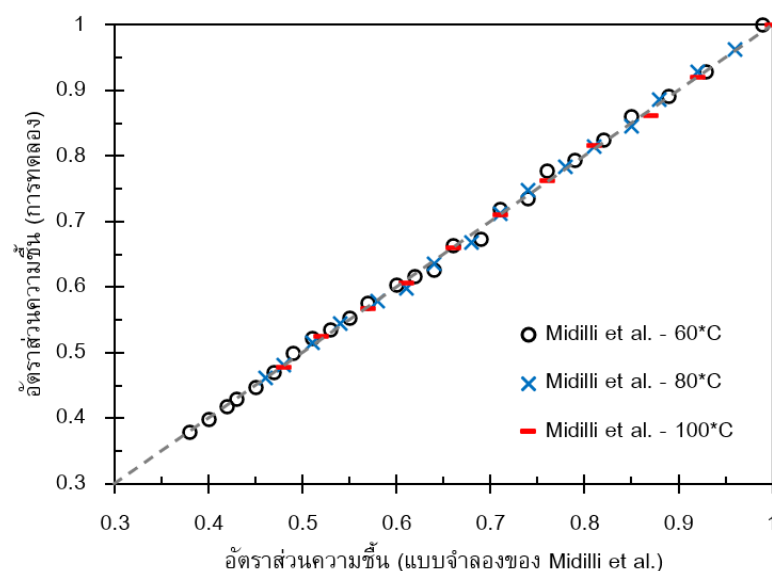
ตารางที่ 3 ค่าคงที่และผลการประเมินความแม่นยำของแบบจำลองเอมพิริคัลในช่วงอุณหภูมิอากาศอบแห้งระหว่าง 60 ถึง 100 องศาเซลเซียส

ชื่อแบบจำลอง	ค่าคงที่ในแบบจำลอง	R^2	RMSE	χ^2
Midilli et al.	$a_1 = -0.012, a_2 = 0.004, a_3 = 0.827, b_1 = 0.012,$ $b_2 = -0.00013, b_3 = 0.014, k_1 = -2.224 \times 10^{-7}, k_2 = 4.14 \times 10^{-5},$ $k_3 = -0.002, n_1 = -0.00016, n_2 = 0.025, n_3 = 0.00016$	0.999	0.0066	0.000047
Verma et al.	$a_1 = -0.001, a_2 = 0.000376, a_3 = -0.037, k_1 = 6.376 \times 10^{-6},$ $k_2 = -0.001, k_3 = 0.041, g_1 = 5.75 \times 10^{-6}, g_2 = -0.001,$ $g_3 = 0.037$	0.997	0.0086	0.000078

พิจารณาผลการประเมินความแม่นยำของแบบจำลองตามตารางที่ 3 พบว่า แบบจำลองของ Midilli et al. สามารถทำนายผลของอัตราส่วนความชื้นข้าวในระหว่างกระบวนการอบแห้งได้แม่นยำสูงสุด โดยผลจากการประเมินแบบจำลอง มีค่า R^2 เท่ากับ 0.999 RMSE เท่ากับ 0.0066 และค่า χ^2 เท่ากับ 0.000047 ขณะที่ แบบจำลองของ Verma et al. มีค่า R^2 เท่ากับ 0.997 RMSE เท่ากับ 0.0086 และค่า χ^2 เท่ากับ 0.000078 จากการประเมินความเหมาะสมของแบบจำลองพบว่า แบบจำลองของ Midilli et al. มีความเหมาะสมมากกว่าแบบจำลองของ Verma et al. เนื่องจากแบบจำลองของ Midilli et al. มีค่า R^2 สูงกว่า และค่า RMSE กับค่า χ^2 ต่ำกว่าแบบจำลองของ Verma et al. หากทำการเปรียบเทียบลักษณะของการลดความชื้นข้าวเปลือกด้วยเครื่องแห้งพาหะลมร้อนในลักษณะเดียวกัน ตามงานวิจัยของกิตติ สถาพรประสารณ์ และโพธิ์ทอง ประณิตพลกรัง [10] พบว่า พฤติกรรมการลดลงของความชื้นข้าวมีความเป็นเชิงเส้นสูงในระยะแรกและการพาความชื้นออกจากเมล็ดข้าวเปลือกจะลดลงในลักษณะของเอ็กโพเนนเชียลในทำนองเดียวกับงานวิจัยนี้ อีกทั้งยังเป็นเครื่องยืนยันว่าแบบจำลองของ Midilli et al. สามารถทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นได้ดีในย่านอุณหภูมิอากาศอบแห้งที่ 70 ถึง 90 องศาเซลเซียส ซึ่งอยู่ในย่านที่งานวิจัยนี้สนใจศึกษาเช่นกัน โดยงานวิจัยดังกล่าวรายงานค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.9998 ถึง 0.9999 และ RMSE อยู่ในช่วง 0.002583 ถึง 0.004342 นอกจากนี้ ยังพบรายงานของอภิสิทธิ์ ภักดีแก้ว

และคณะ [13] ในการใช้แบบจำลองของ Midilli et al. เพื่ออธิบายค่าอัตราส่วนความชื้นข้าวที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างกระบวนการอบแห้งในย่านอุณหภูมิอากาศอบแห้งที่ 70 และ 80 องศาเซลเซียส ซึ่งมีผลการวิจัยที่เป็นไปในทิศทางเดียวกัน

แนวโน้มการลดลงของความชื้นในวัสดุทางการเกษตรระหว่างกระบวนการอบแห้งมักจะไม่เป็นเชิงเส้นสูงส่วนใหญ่มีลักษณะการลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียล ทำให้แบบจำลองที่มีรูปแบบฟังก์ชันนี้เป็นส่วนประกอบ โดยแบบจำลองของ Midilli et al. มักเป็นที่นิยมในการนำมาใช้เป็นตัวแบบที่สามารถนำมาทำนายการทดลองที่อุณหภูมิอบแห้งต่างๆ อย่างไรก็ตามแบบจำลองที่สร้างขึ้นสามารถทำนายอัตราส่วนความชื้นข้าวเปลือกได้เป็นอย่างดีดังภาพที่ 4 แต่แบบจำลองดังกล่าวยังคงมีข้อจำกัดในเรื่องของการนำแบบจำลองนี้ไปใช้กับการทำนายอัตราส่วนความชื้นนอกเหนือขอบเขตที่ทำการศึกษาร่วม เช่น การนำแบบจำลองไปทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นข้าวในการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยพาหะลมที่มีอุณหภูมิอากาศร้อนต่ำกว่า 60 องศาเซลเซียส หรือสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส หรือการดำเนินการที่มีความเร็วอากาศอบแห้ง หรืออัตราการป้อนข้าวเปลือกค่าอื่นๆ นอกเหนือไปจากช่วงของตัวแปรควบคุมที่ศึกษา โดยเฉพาะการอบแห้งด้วยลมร้อนต่ำกว่า 60 องศาเซลเซียส หรือสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส จะส่งผลให้พฤติกรรมของการลดความชื้นมีลักษณะแตกต่างกันออกไป ค่าคงที่ที่ได้จากแบบจำลองอาจเปลี่ยนแปลงได้จากพฤติกรรมที่ต่างกันเหล่านี้ การใช้แบบจำลองที่งานวิจัยนี้นำเสนอจึงอาจเกิดความคลาดเคลื่อนได้หากนำไปใช้ศึกษาพฤติกรรมรอบแห้งนอกเหนือจากขอบเขตงาน นอกจากนี้ สัมประสิทธิ์ค่าคงที่ของแบบจำลองที่ได้จากการศึกษาอาจเกิดความคลาดเคลื่อนได้จากความแปรปรวนของอิทธิพลอื่นที่เกี่ยวข้องอื่นๆ เช่น ความแปรปรวนของความเร็วอากาศที่ใช้อบแห้ง ความแปรปรวนของมวลข้าวเปลือกเริ่มต้นในการอบแห้งที่ใช้ในแต่ละงวดของการอบ หรือการอบแห้งวัสดุทางการเกษตรอื่นที่มีรูปทรงแตกต่างกัน ดังนั้นวิธีการหาแบบจำลองการอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมที่ผู้วิจัยได้นำเสนอนี้ สามารถนำไปปรับใช้กับการศึกษาในแง่ของการทำนายความชื้นหรือการจัดการพลังงานในกรณีที่ทำการอบแห้งวัสดุทางการเกษตรอื่นได้ในอนาคต แต่ให้พึงระวังถึงความแปรปรวนจากตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องดังที่กล่าวมา



ภาพที่ 4 การเปรียบเทียบระหว่างอัตราส่วนความชื้นข้าวเปลือกจากแบบจำลองที่เหมาะสมกับผลการทดลอง

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Thai Rice Exporters Association. (2024). *Export statistics*. Thai Rice Exporters Association. Retrieved September 29, 2024, from <http://www.thairiceexporters.or.th> (in Thai)
- [2] International Rice Research Institute. (2023). *Moisture content for safe storage*. <http://www.knowledgebank.irri.org/step-by-step-production/postharvest/storage/moisture-content-for-safe-storage>
- [3] Chakraverty, A., and Singh, R. P. (2014). *Postharvest technology and food process engineering*. CRC Press.
- [4] Soponronnarit, S. (2022). *Agricultural product drying: 40-year experience in research and development in collaboration with agricultural industry sector* (2nd ed.). Bangkok: King Mongkut's University of Technology Thonburi.
- [5] Thauynak, P., Chuchonak, M., Yapha, M., and Bunyawanichakul, P. (2014). Review of development of paddy dried in industry. *Srinakharinwirot University Engineering Journal*, 9(1), 68-74. (in Thai)
- [6] Nimmol, C. (2019). Performance, energy, and product quality aspects of a modified pneumatic dryer for rapid drying of high-moisture paddy. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 62(6), 1531-1539.
- [7] Wongbubpa, N., Treeamnuk, K., Treeamnuk, T. (2022). Influence of pulse flow drying air on paddy drying with pneumatic dryer. *Farm Engineering and Automation Technology Journal*, 8(2), 131-143. (in Thai)
- [8] Erbay, Z., and Icier, F. (2010). A review of thin layer drying of foods: Theory, modeling, and experimental results. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 50(5), 441-464.
- [9] Sritunyakorn, S., Suluksna, K., and Chitsomboon, T. (2020). Diffusion coefficient modelling of thin-layer drying of paddy using spouted free fall bed dryer. *RMUTP Research Journal Sciences and Technology*, 14(2), 183-197. (in Thai)
- [10] Sathapornprasath, K., and Praneetpolkrang, P. (2017). Mathematical model for paddy drying by jet spouted bed dryer. *Engineering and Technology Horizons*, 34(4), 22-29. (in Thai)
- [11] Khaengkarn, S., Meesukjaosumrun, S., and Chitsomboon, T. (2018). Genetic algorithm for the selection of rough rice drying model for the free-fall paddy dryer. *Journal of Research and Applications in Mechanical Engineering*, 1(1), 63-75. (in Thai)
- [12] Rattanawong, S., Phaenurai, W., Promphiphak, P., and Duanguppama, K. (2022). Mathematical modeling for paddy drying by rotary drier. *Udon Thani Rajabhat University Journal of Sciences and Technology*, 10(1), 125-142. (in Thai)

- [13] Association of Official Analytical Chemists. (1990). *Official methods of analysis* (15th ed.). Arlington, VA: Association of Official Analytical Chemists.
- [14] Selvakumarasamy, S., Kulathooran, R., and Rengaraju, B. (2024). Effect of drying on insulin plant leaves for its sustainability and modeling the drying kinetics by mathematical models and artificial neural network. *Environmental Modeling and Assessment*, 29(5), 901-914.
- [15] Tepe, T. K., Azarabadi, N., and Tepe, F. B. (2024). Convective drying of the zucchini slices; impact of pretreatments on the drying characteristics and color properties, evaluation of artificial neural network modeling and thin-layer modeling. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 14(1), 168-193. <https://doi.org/10.31466/kfbd.1373651>
- [16] Pakdeekaew, A., Treeamnuk, K., and Treeamnuk, T. (2022). Appropriate thin layer drying model for paddy drying with pneumatic dryer. *Farm Engineering and Automation Technology Journal*, 8(2), 99-109. (in Thai)