การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ของกล้วย

สุรจิตร์ พระเมือง[1*], วีรชน มีฐาน[1], เลิศพันธุ์ เพียรสร้างสรรค์[2], สำราญ เลิศคอนสาร[2] และชฎารัฐ ขวัญนาค[3]

[1] คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย
[2] คณะวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาลัยพิชญบัณฑิต
[3] คณะวิทยาศาสตร์ วิทยาลัยพิชญบัณฑิต

บทคัดย่อ

กลไกการลดความชื้น โดยอาศัยลมร้อนจากแสงอาทิตย์ด้วยการถ่ายโอนความร้อน ในการวิจัยนี้นำกล้วยน้ำว้าไปอบลดความชื้นในตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดเรือนกระจกขนาดเล็ก ด้านรับแสงเป็นผิวโค้งพาราโบลา ผนังโดยรอบเป็นแผ่นโพลีคาร์บอเนตใส มีแผ่นเหล็กทาสีดำด้านเป็นแผ่นดูดรังสีอาทิตย์ด้านล่าง ทำการเก็บข้อมูล 3 รอบ ๆ ละ 3 วัน ความชื้นเริ่มต้น 235, 63, 236.40 และ 248.58 %d.b. มีความชื้นสุดท้าย 23.37, 19.16 และ 26.38 %d.b. ตามลำดับ ที่ความเข้มรังสีอาทิตย์เฉลี่ย 543.8 W/m^2 อัตราการไหลของลมร้อนโดยเฉลี่ย 0.08 kg/s ได้อัตราการอบแห้งเฉลี่ย 9.05 kg/h เมื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ตามแบบจำลองของ Newton and Lewis ได้สมการเป็น $MR = e^{-0.1022t}$ (r^2 = 0.9784, RMSD = 0.1059, MBD = 0.0112) แบบจำลองของ Page ได้สมการเป็น $MR = e^{-0.6465t^{0.1866}}$ (r^2 = 0.9592, RMSD = 0.1463, MBD = 0.0214) แบบจำลองของ Modified Page ได้สมการเป็น $MR = e^{-0.5470t^{0.1864}}$ (r^2 = 0.9784, RMSD = 0.1060, MBD = 0.0110) แบบจำลองของ Henderson and Pabis ได้สมการเป็น $MR = 1.2055e^{-0.1012t}$ (r^2 = 0.9784, RMSD = 0.0832, MBD = 0.0069) แบบจำลองของ Two Term ได้สมการเป็น $MR = 0.9162e^{-0.0511t} + 0.0110e^{-0.0511t}$ (r^2 = 0.9449, RMSD = 0.1350, MBD = 0.0182) และแบบจำลองของ Wang and Singh ได้สมการเป็น $MR = 1 - 0.0633t + 0.0010t^2$ (r^2 = 0.9882, RMSD = 0.0602, MBD = 0.0036) โดยแบบจำลองที่เหมาะสมกับการอบแห้งกล้วยทั้งลูกจะเป็นแบบจำลองของ Wang and Singh

คำสำคัญ: กล้วยอบพลังงานแสงอาทิตย์ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ตู้เรือนกระจก

** ผู้รับผิดชอบบทความ : surajitr@lru.ac.th*

***รับบทความ**: 5 พฤษภาคม 2568* ***แก้ไขเสร็จ:** 4 กันยายน 2568* ***ตอบรับบทความ**: 11 กันยายน 2568*

Mathematical Model Investigation of Solar Drying for Banana

Surajitr Pramuang[1*], Weerachon Meethan[1], Lerdpan Piansangsan[2], Samran Lertkonsarn[2] and Chadarat khwunnak[3]

[1] Faculty of Science Technology, Loei Rajabhat University
[2] Faculty of Engineering, Pitchayabundit College
[3] Faculty of Science, Pitchayabundit College

Abstract

Mechanism of solar drying is the heat transfer by hot air. This study fabricated a small greenhouse solar dryer for banana drying. Its sun facing side designed to be the parabolic curve covering with the clear polycarbonate sheet. The solar absorber at the bottom painted flat black color. There were 3 rounds of experiments with 3 days for each. The initial moisture contents were 235,63, 236.40 and 248.58 %d.b. obtaining final moisture contents of 23.37, 19.16 and 26.38 %d.b., respectively under solar intensity of 543.8 W/m^2 and hot air flow rate 0.08 kg/s. The drying rate was averaged of 9.05 kg/h. The mathematical model for drying was formulated. The equation of Newton and Lewis model was MR = $e^{-0.1022t}$ (r^2 = 0.9784, RMSD = 0.1059, MBD = 0.0112). The equation of Page model was MR = $e^{-0.6465t^{0.1866}}$ (r^2 = 0.9592, RMSD = 0.1463, MBD = 0.0214). The equation of Modified Page model was MR = $e^{-0.5470t^{0.1864}}$ (r^2 = 0.9784, RMSD = 0.1060, MBD = 0.0110). The equation of Henderson and Pabis model was MR = $1.2055e^{-0.1012t}$ (r^2 = 0.9874, RMSD = 0.0832, MBD = 0.0069). The equation of Two Term model was MR = $0.9162e^{-0.0511t} + 0.0110e^{-0.0511t}$ (r^2 = 0.9449, RMSD = 0.1350, MBD = 0.0182). And, the equation of Wang and Singh model was MR = $1 - 0.0633t + 0.0010t^2$ (r^2 = 0.9882, RMSD = 0.0602, MBD = 0.0036). The appropriate mathematical model for banana drying was Wang and Singh model.

Keywords: Solar dried banana, Mathematical model, Solar dryer, Greenhouse cabinet

** Corresponding author: surajitr@lru.ac.th*

***Received**: 5 May 2025* ***Revised:** 4 September 2025* ***Accepted**: 11 September 2025*

1. บทนำ

การอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์เป็นหนึ่งในวิธีถนอมอาหารที่มีภูมิปัญญามาตั้งแต่อดีต โดยการลดความชื้นจากอาหารอาศัยพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ ทำให้น้ำในอาหารนั้นระเหยออกมา ด้วยกลไกการเปลี่ยนเฟสของน้ำ และผลต่างความดันไอน้ำที่อยู่ด้านในอาหารกับบริเวณผิวผ่านรูขนาดเล็ก การตากแดดเป็นกระบวนการลดความชื้นที่ใช้เทคโนโลยีน้อยที่สุด จนกระทั่งการอบแห้งแบบผสมผสานที่ใช้แหล่งความร้อนเสริมจากหลากหลายแหล่ง และเทคโนโลยีการกักเก็บความร้อนภายในระบบอบแห้งให้มีอัตราการอบแห้งที่สูงขึ้น มีอุณหภูมิที่เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดที่ใช้ความร้อนแตกต่างกันเพื่อรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์นั้น ๆ การพัฒนาเทคโนโลยีการอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ มีหลักคิดที่สำคัญ 2 ประการคือ การกักเก็บพลังงานความร้อนไว้ภายในเครื่องอบแห้งให้สูญเสียน้อยที่สุด ที่เรียกว่า Minimal heat losses และการขยายเวลาการอบแห้งเพิ่มขึ้นในเวลาที่ไม่มีแสงอาทิตย์ที่เรียกว่า Extended heat sources พร้อม ๆ กับการกำจัดหรือระบายไอน้ำที่ออกจากผลิตภัณฑ์ ด้วยกระบวนการถ่ายโอนมวลสารและกระบวนการถ่ายโอนความร้อนที่จำเป็นต้องมีการออกแบบระบบอบแห้งที่เหมาะสมกับชนิดของผลิตภัณฑ์ เนื่องจากใช้อุณหภูมิในการอบแห้งแตกต่างกัน เทคโนโลยีการกักเก็บความร้อนและการลดการสูญเสียความร้อน จะมุ่งเน้นการเลือกใช้วัสดุที่มีสมบัติทางความร้อนที่เหมาะสม ทั้งในประเด็นการดูดกลืนความร้อน การแผ่รังสีความร้อน การสะท้อนและการทะลุผ่านของแสง จึงเป็นเหตุผลที่เครื่องอบแห้งด้านรับแสงอาทิตย์จะเลือกวัสดุโปร่งใสที่มีค่าทะลุผ่านสูง ๆ แผ่นดูดรังสีอาทิตย์จะเลือกวัสดุที่มีสมบัติการแผ่รังสีความร้อนสูง ๆ ส่วนวัสดุด้านอื่น ๆ จะเลือกวัสดุที่เป็นฉนวนกันความร้อนเพื่อลดการนำความร้อน เป็นต้น ในขณะที่เทคโนโลยีการขยายเวลาการอบแห้งให้นานขึ้นจะเลือกใช้แหล่งความร้อนเสริมอื่น ๆ เช่น หลอดรังสีอินฟราเรด ระบบไมโครเวฟ เชื้อเพลิงชีวมวล หรือการใช้วัสดุกักเก็บความร้อน และอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เป็นต้น

จากการพัฒนาระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อลดระยะเวลาการอบแห้ง เพิ่มหรือรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้รับความสนใจมาอย่างต่อเนื่อง จากเปรียบเทียบชนิดวัสดุที่เป็นกระจกใสกับแผ่นโพลีคาร์บอเนตใส เป็นแผ่นรับรังสีอาทิตย์ของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดเล็กชนิดเรือนกระจก พบว่าการใช้กระจกใสทำให้อุณหภูมิสูงกว่า 3 – 5 °C ใช้เวลาสั้นกว่า 3% (Munphookiew et al., 2023) ในการศึกษาการอบแห้งที่ผ่านมาพบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่ออัตราการอบแห้งและสมรรถนะของระบบอบแห้งกล้วย ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ของลมร้อนและความเร็วลม (Lingayat et al., 2017; Shankar et al., 2024) เมื่อมีการใช้แผ่นรับรังสีอาทิตย์ผลิตลมร้อนให้กับระบบอบแห้งแบบผสม (Hybrid Indirect Passive solar dryer, HIP) จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพทางความร้อนของการอบแห้งกล้วยได้สูงขึ้น 18% เทียบกับการอบแห้งแบบปกติ (Ssemwanga et al., 2020) ในการทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งของกล้วยแบบฝานเป็นชิ้นบาง ด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ เมื่อใช้พลังงานความร้อนจากขดลวดไฟฟ้า โดยเพ็ญพร นิ่มนวล และคณะ (2565) ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Modified GAB ในขณะที่ณัฐภัค อิ่มเอิบ และกิตติศักดิ์ วิธินันทกิตต์ (2564) ได้ศึกษาจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งกล้วยด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรด พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมคือ Midilli สำหรับเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีแผ่นรับรังสีอาทิตย์ผลิตลมร้อนนั้น Lingayat et al. (2017) พบว่าเหมาะสมกับแบบจำลองของ Wang and Singh ในบทความนี้ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการอบแห้งกล้วยน้ำว้าด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ความร้อนเสริมเทอร์โมอิเลกทริกจากแผ่นเพลเทียร์ โดยใช้ไฟฟ้าจากเซลแสงอาทิตย์เป็นแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับระบบ ซึ่งใช้รูปแบบการไหลของอากาศแบบพาบังคับด้วยพัดลมที่ติดตั้งในท่อ

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อศึกษาอัตราการอบแห้งและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการอบแห้งกล้วยน้ำว้า

3. วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 ขอบเขตการวิจัย

ด้านตัวแปร จะตรวจวัดอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งและอากาศแวดล้อม ความชื้นสัมพัทธ์อากาศภายในเครื่องอบแห้งและอากาศแวดล้อม ชั่งน้ำหนักกล้วย ภายใต้ความเข้มแสงอาทิตย์ ขณะเวลาใด ๆ เพื่อคำนวณค่าความชื้น อัตราส่วนความชื้นและอัตราการอบแห้ง พร้อมทั้งวัดความเร็วลมในระบบเพื่อวัดอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการอบแห้ง จะเลือกใช้บางแบบจำลองที่เหมาะสม จำนวน 6 แบบจำลอง

ด้านเวลา ดำเนินการเก็บข้อมูลในช่วงเดือนมกราคม 2567 ซึ่งเป็นช่วงที่สภาพท้องฟ้าค่อนข้างโปร่ง ทำให้ได้รับแสงอาทิตย์ต่อเนื่องในระหว่างการเก็บข้อมูล

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดเรือนกระจกขนาดความกว้าง 110 cm ยาว 150 cm และสูง 80 cm ติดตั้งบนขาตั้งสูงจากพื้น 85 cm ด้านรับแสงอาทิตย์โค้งพาราโบลา ด้านล่างใช้แผ่น เหล็กทาสีดำด้านเป็นแผ่นดูดรังสีความร้อน ผนังโดยรอบใช้แผ่นโพลีคาร์บอเนตใส ชั้นตากผลิตภัณฑ์อยู่กึ่งกลาง มีประตูเปิดปิดด้านหลัง ดังภาพที่ 1 ต่อท่ออากาศขาเข้าจากทางด้านล่าง โดยเจาะปล่องอากาศขนาด 8 cm x 12 cm ติดตั้งพัดลมระบายอากาศที่ใช้เซลแสงอาทิตย์เป็นแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า วัดอุณหภูมิของอากาศที่จุดต่าง ๆ และความเร็วลมด้วย hotwire anemometer Testo 425 วัดความชื้นสัมพัทธ์อากาศด้วยวัดอุณหภูมิ Testo 625 วัดความเข้มรังสีอาทิตย์ด้วย Kipps and Zonen CMP3 Pyranometer และชั่งน้ำหนักกล้วยด้วยเครื่องชั่งดิจิทัลทศนิยม 2 ตำแหน่ง



ภาพที่ 1 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดเรือนกระจก

3.3 การเก็บรวบรวมข้อมูล

การอบแห้งกล้วยโดยเลือกกล้วยน้ำว้าที่สุกเหลืองทั้งลูก ปอกเปลือกชั่งน้ำหนักทีละลูก วางกระจายบนชั้นวางจนเต็มพื้นที่ดังภาพที่ 2 แล้วชั่งน้ำหนักทุกชั่วโมง จนสิ้นสุดการทดลอง เก็บข้อมูลอุณหภูมิอากาศแวดล้อม อุณหภูมิอากาศขาเข้า และอุณหภูมิภายใน พร้อมกับวัดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่จุดเดียวกัน วัดความเร็วลมที่ปล่องอากาศขาเข้าและความเข้มรังสีอาทิตย์ การวัดข้อมูลต่าง ๆ ทุก 10 นาที ระหว่างเวลา 09:00 – 16:00 น.



ภาพที่ 2 การวางกล้วยตากบนชั้นวางในตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

คำนวณหาอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ ตามสมการ

$$\text{อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ} = rvA \ \ (kg/s) \quad (1)$$

เมื่อ r เป็นความหนาแน่นเฉลี่ยของอากาศ เท่ากับ 1.204 kg/m^3, v เป็นความเร็วลมในท่อ (m/s) และ A เป็นพื้นที่หน้าตัดของปล่องอากาศ (m^2) คำนวณค่าความชื้นมาตรฐานแห้งของกล้วย และอัตราส่วนความชื้น ตามสมการ

$$\text{ปริมาณความชื้น (M.C.)} = \frac{w_t - d}{d} \times 100 \ (\%d.b.) \quad (2)$$

$$\text{อัตราส่วนความชื้น (MR)} = \frac{w_t}{w_i} \quad (3)$$

โดยที่ d เป็นสภาพแห้ง ซึ่งเป็นน้ำหนักแห้งของกล้วย หาได้จากการนำกล้วยที่สิ้นสุดขั้นตอนการอบในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ไปอบในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 105 °C นาน 1 – 2 ชั่วโมง หรือจนกระทั่งน้ำหนักไม่มีการเปลี่ยนแปลง w_t เป็นน้ำหนักขณะเวลา t ใด ๆ และ w_i คือน้ำหนักกล้วยตอนเริ่มต้น

อัตราการอบแห้ง (DR) เป็นอัตราส่วนของค่าความชื้นต่อระยะเวลาของการอบแห้ง เป็นปริมาณของน้ำในผลิตภัณฑ์ออก กำจัดออกไปต่อเวลาในช่วงเวลาของการอบแห้ง คำนวณได้จากสมการ

$$\text{อัตราการอบแห้ง (DR)} = \frac{m_i - m_t}{t} \ (kg/h) \quad (4)$$

เมื่อ m_i และ m_t เป็นมวลของน้ำในผลิตภัณฑ์เทียบกับมวลแห้งผลิตภัณฑ์ขณะเริ่มต้น และขณะเวลา t ใด ๆ

3.4 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้ง

คุณลักษณะเฉพาะของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดส่งผลต่อจลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง สำหรับการอบแห้งวัสดุชั้นบางมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายอัตราส่วนความชื้นของวัสดุ ซึ่งในที่นี้จะเลือกมา 6 แบบจำลอง ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งชั้นบางที่เลือกใช้ (สุรจิตร์ พระเมือง, 2566)

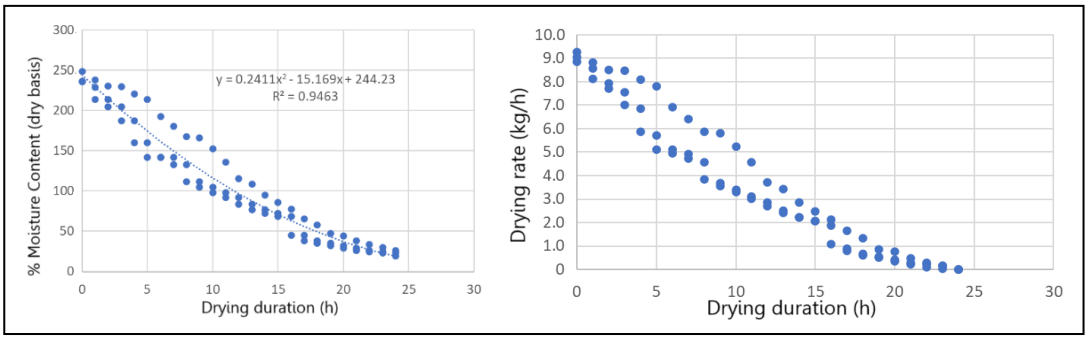
Mathematical model	Equation	Parameter
Newton and Lewis	MR = exp(-kt)	k = drying constant
Page	MR = exp(-kt^n)	n = arbitrary constant
Modified Page	MR = exp(-kt)^n	a = function coefficient

ตารางที่ 1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งชั้นบางที่เลือกใช้ (สุรจิตร์ พระเมือง, 2566) (ต่อ)

Mathematical model	Equation	Parameter
Henderson and Pabis	MR = a exp(-kt)	b = function coefficient
Two Term	MR = a exp(-kt) + b exp(-kt)	t = time of drying
Wang and Singh	MR = 1 + at + bt^2	

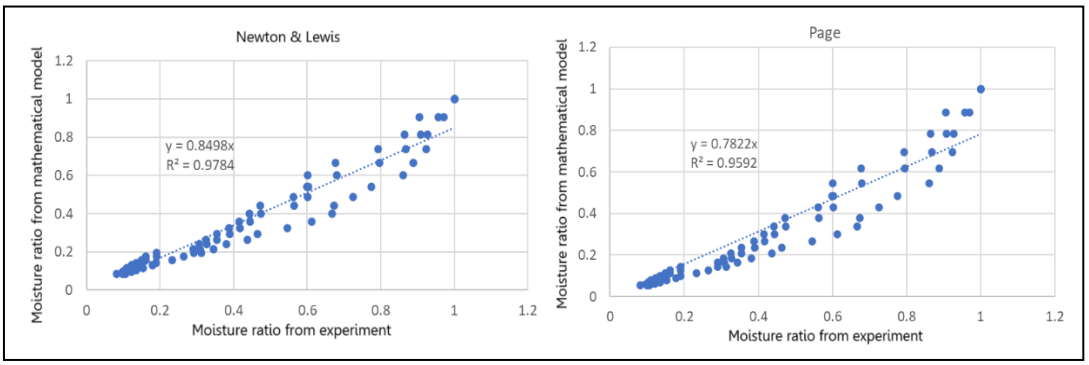
4. ผลการวิจัย

การเก็บข้อมูลระหว่าง 18 – 31 มกราคม 2567 สภาพท้องฟ้าโปร่งมีความเข้มรังสีอาทิตย์เฉลี่ย 543.8 W/m^2 ความเร็วลมระหว่าง 0.58 – 0.61 m/s ทำให้อัตราการไหลเชิงมวลของลมร้อนเฉลี่ย 0.08 kg/m^3 อุณหภูมิอากาศแวดล้อมระหว่าง 28.2 – 36.4 °C ความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมระหว่าง 38.9 – 70.1 %Rh อุณหภูมิในเครื่องอบแห้งสูงสุด 68.8 °C มีค่าเฉลี่ย 39.5 °C ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย 12.3 %Rh การทดลอง 3 รอบ กล้วยมีความชื้นเริ่มต้น 235.63, 236.40, 248.58 %d.b. เวลาทดลองรอบละ 3 วัน ได้ความชื้นสุดท้าย 23.37%, 19.16% และ 26.38 %d.b. ตามลำดับ ดังภาพที่ 3 มีค่าอัตราการอบแห้ง เท่ากับ 9.05 kg/h

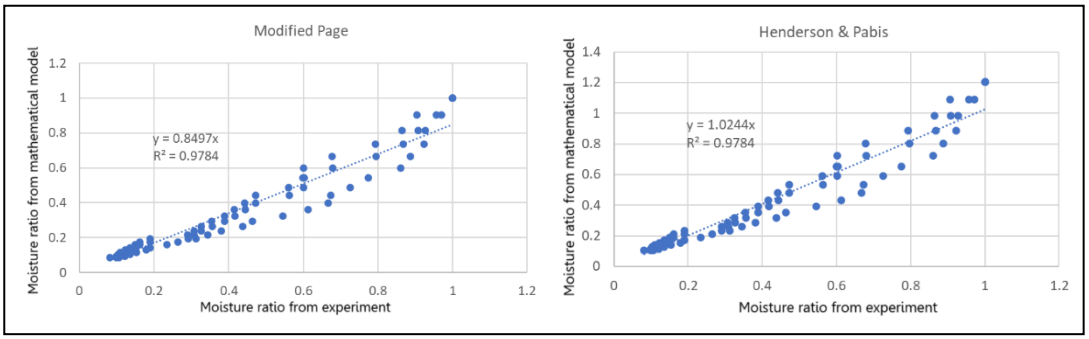


ภาพที่ 3 ความชื้นมาตรฐานแห้งและอัตราการอบแห้งของกล้วยจากการทดลอง

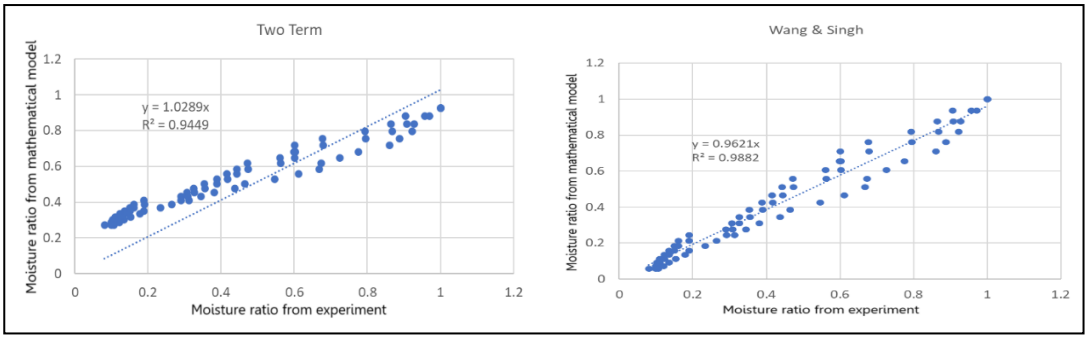
เมื่อสร้างสมการจลนพลศาสตร์เพื่อทำนายการอบแห้ง ตามแบบจำลองทางศาสตร์ของ Newton and Lewis, Page, Modified Page, Henderson and Pabis, Two Term และ Wang and Singh เปรียบเทียบผลการทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นกับการทดลอง พร้อมวิเคราะห์สถิติค่ารากที่สองการเบี่ยงเบนเฉลี่ย (Root mean square deviation, RMSD) ค่าเบี่ยงเบนไบแอสเฉลี่ย (Mean bias deviation, MBD) และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน (Pearson's relative coefficient, r^2) ได้ผลดังภาพที่ 4 ถึงภาพที่ 6 และตารางที่ 2 โดยพบว่า แบบจำลองของ Henderson and Pabis และแบบจำลองของ Two Term ได้แนวโน้มผลการทำนายมีค่าสูงกว่าผลลัพธ์จากการทดลอง ในขณะที่แบบจำลองที่เหลือ ได้ผลการทำนายมีค่าแนวโน้มต่ำกว่าผลลัพธ์จากการทดลอง



ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ของผลการทำนายจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Newton and Lewis และ Page กับผลลัพธ์จากการทดลอง



ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ของผลการทำนายจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Modified Page และ Henderson and Pabis กับผลลัพธ์จากการทดลอง



ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ของผลการทำนายจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Two Term และ Wang and Singh กับผลลัพธ์จากการทดลอง

ตารางที่ 2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งกล้วยน้ำว้า

Mathematical models	k	n	a	b	RMSD	MBD	r^2
Newton and Lewis	0.1022	-	-	-	0.1059	0.0112	0.9784
Page	0.6465	0.1869	-	-	0.1463	0.0214	0.9592
Modified Page	0.5470	0.1866	-	-	0.1060	0.0112	0.9784
Henderson and Pabis	0.1012	-	1.2055	9	0.0832	0.0069	0.9784
Two Term	0.0511	-	0.9162	0.0110	0.1350	0.0182	0.9449
Wang and Singh	-	-	-0.0633	0.0010	0.0602	0.0036	0.9882

จากตารางที่ 2 สถิติที่ใช้ในการตัดสินใจได้แก่ค่ารากที่สองการเบี่ยงเบนเฉลี่ย (RMSD) ค่าเบี่ยงเบนไบแอสเฉลี่ย (MBD) และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน (r^2) ซึ่งค่ารากที่สองการเบี่ยงเบนเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนไบแอสเฉลี่ย แสดงให้เห็นว่าผลการคำนวณของแบบจำลองใดเข้าใกล้ศูนย์ ส่วนค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน มีค่าเข้าใกล้ 1 จะเป็นแบบจำลองที่มีความเหมาะสมมากที่สุด เนื่องจากค่า RMSD และ MBD บ่งบอกแนวโน้มของผลการคำนวณตามแบบจำลองเอนเอียงในทิศทางมากกว่าหรือน้อยกว่าค่าที่ได้จากการวัด ถ้าเป็นบวกแสดงว่ามากกว่าผลการวัดในทางกลับกันเป็นลบแสดงว่าน้อยกว่าผลการวัด ในขณะที่ค่า r^2 บ่งบอกว่าผลการวัดกับผลการคำนวณในแบบจำลองมีความสัมพันธ์กันมากน้อยเพียงใด หากมีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่ามีความสัมพันธ์กันมาก โดยจะเห็นว่าแบบจำลองของ Wang and Singh มีความเหมาะสมมากที่สุด

5. อภิปรายผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อธิบายกลไกการถ่ายโอนความร้อนและการถ่ายโอนมวลสารของน้ำในผลิตภัณฑ์ ซึ่งแบบจำลองของ Newton and Lewis มีตัวแปรที่ไม่ซับซ้อน ทำนายการอบแห้งผลิตภัณฑ์ได้หลากหลายชนิด ทั้งประเภทอาหารและผลผลิตทางการเกษตร มักจะให้ผลการทำนายต่ำกว่าค่าที่ได้จากการทดลองเล็กน้อย จะเห็นว่าความชันของกราฟเท่ากับแบบจำลองของ Modified Page ซึ่งปรับปรุงแบบจำลองของ Page สำหรับอธิบายช่วงเวลาการอบแห้งที่ยาวนานขึ้น ตามกฎการแพร่ของฟิกส์ (Fick's second law of diffusion) ที่ไอน้ำมีการแพร่แบบไม่คงตัว เป็นผลมาจากอัตราส่วนความชื้นสูงหรือเป็นแบบชั้นหนา แต่จากผลการทดลองพบว่ายังไม่สอดคล้องมากนักกับแบบจำลองของ Newton and Lewis แบบจำลองของ Page และ Modified Page ในช่วงแรกของการอบแห้งที่มีอัตราส่วนความชื้นสูงแบบจำลองทั้ง 3 แบบจะมีความแปรปรวนสูง จนกระทั่งอัตราส่วนความชื้นลดน้อยลง เข้าใกล้ความชื้นสมดุล ค่าความแปรปรวนจะมีค่าต่ำลงเข้าใกล้ค่าจากการทดลอง สำหรับแบบจำลองของ Henderson and Pabis ได้เพิ่มค่าสัมประสิทธิ์ในสมการของ Newton and Lewis เพื่ออธิบายกลไกการแพร่ที่ไม่คงตัวตามกฎการแพร่ของฟิกส์ โดยเฉพาะช่วงแรกของการอบแห้งที่มีอัตราส่วนความชื้นสูง ซึ่งผลการคำนวณตามแบบจำลอง ส่งผลให้มีแนวโน้มมีค่ามากกว่าผลลัพธ์จากการทดลอง เช่นเดียวกันกับแบบจำลอง Two Term ส่วนแบบจำลองของ Wang and Singh ใช้อธิบายกลไกการระเหยของน้ำแบบไม่เป็นเชิงเส้น พบว่าผลการทำนายตามแบบจำลองสอดคล้องกับผลการทดลองมากที่สุด จึงเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมกับการอบแห้งกล้วยทั้งเป็นแบบแผ่นและแบบทั้งลูก (Ertekin & Firat, 2017; Kadam & Dhingra, 2011)

การทำนายจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งกล้วยน้ำว้า ตามแบบจำลองของ Newton and Lewis ได้สมการเป็น $MR = e^{-0.1022t}$ ($r^2 = 0.9784$) มีค่ารากที่สองของการเบี่ยงเบนเฉลี่ย (RMSD) 0.1059 ค่าเบี่ยงเบนไบแอสเฉลี่ย (MBD) 0.0112 แบบจำลองของ Page ได้สมการเป็น $MR = e^{-0.6465t^{0.1866}}$ ($r^2 = 0.9592$) มีค่ารากที่สองของการเบี่ยงเบนเฉลี่ย (RMSD) 0.1463 ค่าเบี่ยงเบนไบแอสเฉลี่ย (MBD) 0.0214 แบบจำลองของ Modified Page ได้สมการเป็น $MR = e^{-0.5470t^{0.1864}}$ ($r^2 = 0.9784$) มีค่ารากที่สองของการเบี่ยงเบนเฉลี่ย (RMSD) 0.1060 ค่าเบี่ยงเบนไบแอสเฉลี่ย (MBD) 0.0110 แบบจำลองของ Henderson and Pabis ได้สมการเป็น $MR = 1.2055e^{-0.1012t}$ ($r^2 = 0.9784$) มีค่ารากที่สองของการเบี่ยงเบนเฉลี่ย (RMSD) 0.0832 ค่าเบี่ยงเบนไบแอสเฉลี่ย (MBD) 0.0069 และแบบจำลองของ Two Term ได้สมการเป็น $MR = 0.9162e^{-0.0511t} + 0.0110e^{-0.0511t}$ ($r^2 = 0.9449$) มีค่ารากที่สองของการเบี่ยงเบนเฉลี่ย (RMSD) 0.1350 ค่าเบี่ยงเบนไบแอสเฉลี่ย (MBD) 0.0182 แบบจำลองของ Wang and Singh ได้สมการเป็น $MR = 1 - 0.0633t + 0.0010t^2$ ($r^2 = 0.9882$) มีค่ารากที่สองของการเบี่ยงเบนเฉลี่ย (RMSD) 0.0602 ค่าเบี่ยงเบนไบแอสเฉลี่ย (MBD) 0.0036 เมื่อพิจารณาจากค่ารากที่สองของการเบี่ยงเบนเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนไบแอสเฉลี่ยที่ต่ำที่สุดจะพบว่าแบบจำลองของ Wang and Singh ได้ผลการทำนายสอดคล้องกับผลการทดลองมากที่สุด จึงเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมในการอบแห้งกล้วยน้ำว้าทั้งลูก

ข้อเสนอแนะในการวิจัย

1. ควรมีการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นควบคู่กับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับกล้วยน้ำว้า จะช่วยให้ทราบกลไกการอบแห้งกล้วยน้ำว้า นำไปสู่การออกแบบเครื่องมือในการอบแห้งที่เหมาะสม กับกำลังผลิตได้

2. การลดความชื้นของกล้วยทั้งลูกกับแผ่นกล้วย ซึ่งมีความหนาที่แตกต่างกัน ส่งผลต่ออัตราการอบแห้ง (DR) และอัตราส่วนความชื้น (MR) จากระยะเวลาของการระเหยของไอน้ำภายในท่อแคปิลลารีที่แตกต่างกัน และสัมพันธ์กับอุณหภูมิในการอบแห้ง ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดที่มีขนาดของรูคาปิลลิรีแตกต่างกัน และแต่ละแบบจำลอง จะเหมาะสมกับอุณหภูมิของการอบแห้งด้วยเช่นกัน จากปัจจัยของความแตกต่างของอัตราการอบแห้งและอัตราส่วนความชื้น

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย ที่สนับสนุนทุนการวิจัย ในโครงการวิจัยงานมูลฐาน (Fundamental Fund) และขอขอบคุณศูนย์วิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย ที่สนับสนุนเครื่องมือวัดสำหรับการวิจัย ให้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

7. เอกสารอ้างอิง

ณัฐภัค อิ่มเอิบ, และกิตติศักดิ์ วิธินันทกิตต์. (2564). การศึกษาจลนพลศาสตร์และคุณภาพชิ้นกล้วยอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์, 16*(3), 24–36. https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/psru-jite/article/view/244275

เพ็ญพร นิ่มนวล, นภาลัย เหล่ามะลอ, และสราวุฒิ แนบเนียว. (2565). การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุลของกล้วยน้ำว้า. *วารสารวิชาการคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี, 17*(1), 50–58. https://itechjournal.tru.ac.th/ojs/index.php/tru-i-tech/article/view/155

สุรจิตร์ พระเมือง. (2566). พลังงานสุริยะ. มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย.

Ertekin, C., & Firat, M. Z. (2017). A comprehensive review of thin layer drying models used in agricultural products. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 57*(4), 701–717. https://doi.org/10.1080/10408398.2014.910493

Kadam, D. M., & Dhingra, D. (2011). Mass transfer of banana slices during osmo-convective drying. *Journal of Food Process Engineering, 34*(2), 511–532. https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.2009.00373.x

Lingayat, A., Chandramohan, V. P., & Raju, V. R. K. (2017). Design, development and performance of indirect type solar dryer for banana. *Energy Procedia, 109*, 409–416. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.041

Munpookiew, T., Pratummasoot, N., Kongsri, W., & Kallayalert, Y. (2023). An investigation of solar dryers with different covers for solar-dried cultivated bananas. *Progress in Applied Science and Technology, 13*(2), 45–52. https://doi.org/10.14456/past.2023.8

Sathya, S. K., Nalik, P. D., Naveenbabu, N., Cardoza, N., & Rameez, S. (2024). Design, fabrication and analysis of solar banana dryer. *AIP Conference Proceedings, 3060*(1). https://doi.org/10.1063/5.0196540

Ssemwanga, M., Makule, E., & Kayondo, S. I. (2020). Performance analysis of an improved solar dryer integrated with multiple metallic solar concentrators for drying fruits. *Solar Energy, 204*, 419–428. https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.04.065