

การศึกษาจลนพลศาสตร์และคุณภาพชิ้นกล้วยอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งสุญญากาศ ร่วมกับอินฟราเรด

The Study of Drying Kinetics and Qualities of Dried Banana Slices by Vacuum-Infrared dryer

ณัฐภัก อิมเอิบ* กิตติศักดิ์ วิธินันทกิตต์

สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก 43 ม.6 ต.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี 20110

Natthapak Im-erb* Kittisak Witinantakit

Energy Technology Department, School of Engineering and Innovation,

Rajamangala University of Technology Tawan-ok

43 Moo 6 Bangpra Subdistrict, Sriracha District, Chonburi 20110

*Corresponding author Email: natthapak_im@rmutto.ac.th

(Received: June 24, 2021; Accepted: August 20, 2021)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งชิ้นกล้วยด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรด ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ คุณภาพด้านสีและปริมาณน้ำอิสระ ทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งด้วยสมการเอมพิริคัล และหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลและพลังงานกระตุ้น โดยอบแห้งชิ้นกล้วยจากความชื้นเริ่มต้นประมาณร้อยละ 181-186 มาตรฐานแห้ง ภายใต้ความดันสัมบูรณ์ 10 กิโลปาสคาล และอุณหภูมิการอบแห้ง 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส จนได้ความชื้นสุดท้ายประมาณร้อยละ 10 มาตรฐานแห้ง ผลการศึกษาพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งมีผลให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้น ระยะเวลาการอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลง โดย ชิ้นกล้วยมีความชื้นสุดท้ายอยู่ระหว่างร้อยละ 7.25-10.54 มาตรฐานแห้ง ค่าปริมาณน้ำอิสระอยู่ระหว่าง 0.263-0.319 และอุณหภูมิอบแห้งไม่มีผลต่อความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของค่า L^* a^* และ b^* ของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นการอบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ 10 กิโลปาสคาล อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จึงเป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมในการอบแห้งชิ้นกล้วย นอกจากนี้สมการของมิตลิสสามารถทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งได้ดีที่สุดโดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงสุดเท่ากับ 0.99974 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยต่ำที่สุดเท่ากับ 0.00462 ค่าการลดลงไคกำลังสองต่ำที่สุดเท่ากับ 2.432×10^{-05} และสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลมีค่าอยู่ระหว่าง 6.85×10^{-11} - 14.03×10^{-11} ตารางเมตรต่อวินาที โดยมีค่าพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 31,160.83 กิโลจูลต่อโมล

คำสำคัญ: ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ รังสีอินฟราเรด สุญญากาศ อบแห้งกล้วย

ABSTRACT

The objective of this research was to study of drying kinetics, specific energy consumption, color quality, water activity, develop empirical mathematical modeling, effective moisture diffusivity

coefficient and activated energy for drying of banana slices by combined vacuum and infrared. An initial moisture content of banana slices was about 181-186% dry basis (d.b.). Drying processes were conducted by an absolute pressure at 10 kPa with drying temperature at 40, 50 and 60 °C, completely, final moisture content of banana slices was 10% d.b. The result shown that an increasing of temperature would affect to drying rate increased whereas drying time and specific energy consumption decreased. The final moisture content of banana slice was 7.2-10.54% d.b. and water activity was about 0.263-0.319. However, the changing in color of banana slices would not significantly different in L*, a* and b* values. Therefore, the drying of banana slices at absolute pressure of 10 kPa and drying temperature at 60 °C was the optimized condition for drying banana slices. Furthermore, the best equation for predicting of drying kinetics was a drying equation of Midilli with the highest decision coefficient (R^2) at 0.99974, the lowest root mean square error (RMSE) was 0.00462 and the lowest chi-squared reduction (χ^2) was 2.432×10^{-05} . Effective moisture diffusivity coefficients were between 6.85×10^{-11} - 14.03×10^{-11} m²/s and the activated energy was 31,160.83 kJ/mol.

Keyword: Specific energy consumption, mathematical model, infrared radiation, vacuum, banana drying.

1. บทนำ

กล้วย มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Musa sapientum* Linn. วงศ์ Musaceae เป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่งของประเทศไทย กล้วยเป็นพืชที่สามารถพบเห็นได้ทั่วไปในทุกภาคของประเทศ เนื่องจากปลูกง่าย และทุกส่วนของกล้วยสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ กล้วยที่นิยมบริโภคส่วนใหญ่ ได้แก่ กล้วยหอม กล้วยน้ำว้า และกล้วยไข่ [1] กล้วยมีหลากหลายชนิด และเป็นที่นิยมต่อการบริโภค มีสมบัติทางยา มีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระที่แตกต่างกัน และในปัจจุบันผลิตภัณฑ์อาหารสุขภาพ (Healthy food) กำลังเป็นที่นิยม เนื่องจากผู้คนเริ่มหันมาใส่ใจเรื่องสุขภาพ และอาหารการกินมากขึ้น แป้งกล้วยจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งของผู้บริโภค เนื่องจากเป็นผลิตภัณฑ์ที่ทำได้ทั่วไป และง่ายต่อการบริโภค [2] อีกทั้งกล้วยเป็นผลไม้ที่เน่าเสียเร็ว การนำกล้วยมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆจึงช่วยลดปัญหาดังกล่าวได้ [3] ในปัจจุบันจึงได้มีผู้นำกล้วยดิบมาผลิตเป็นแป้ง ซึ่งในกระบวนการผลิตแป้งกล้วยดิบนั้นสามารถทำได้โดยการนำกล้วยดิบไปอบแห้ง จากนั้นนำมาบดเป็นแป้ง และนำไปใช้เป็นส่วนผสมในอาหารชนิดต่างๆ เช่น พาสต้า [4] เส้นก๋วยเตี๋ยว [5] การใช้ทดแทนแป้งสาลี

เช่น แป้งชูบทอด [6] ขนมบราวนี่กรอบ [7] เป็นต้น

เนื่องจากกล้วยดิบมีความโดดเด่นในเรื่องของกรรมวิธีในการอบแห้งที่ใช้ในการผลิตแป้งกล้วยสามารถทำได้หลายวิธี ตั้งแต่วิธีการดั้งเดิม ได้แก่ การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งเป็นวิธีการที่ง่ายแต่ใช้พื้นที่ในการตากแดดมาก [9] การอบแห้งด้วยลมร้อนที่ 50 °C ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งค่อนข้างนานประมาณ 7 ชั่วโมง [2] และการทำแห้งด้วยวิธีแช่เยือกแข็งซึ่งมีค่าใช้จ่ายที่สูง [10]

การอบแห้งโดยใช้เทคนิคสุญญากาศ (Vacuum drying) เป็นวิธีการลดความดันขณะอบแห้งซึ่งทำให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้นเพราะจุดเดือดของน้ำลดต่ำลง และความดันไอน้ำในอากาศลดลง ผลต่างระหว่างความดันไอน้ำที่ผลิตภัณฑ์และอากาศมีมากขึ้น ส่งผลให้อัตราการถ่ายเทน้ำภายในมายังที่ผิวของผลิตภัณฑ์ได้ง่ายขึ้น [11] การนำรังสีอินฟราเรดมาเป็นแหล่งผลิตความร้อนให้กับเครื่องอบแห้งสามารถช่วยลดระยะเวลาการในอบแห้ง

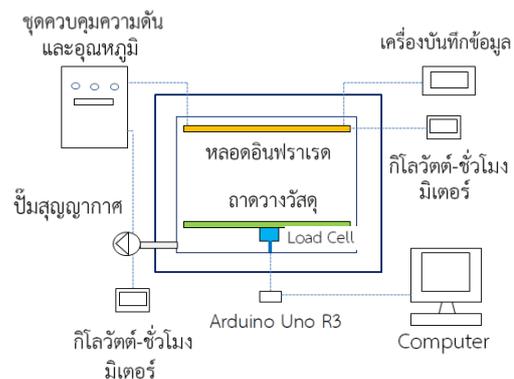
เนื่องจากรังสีอินฟราเรดสามารถแผ่ทะลุผ่านเข้าไปในเนื้อของวัสดุอบแห้ง ส่งผลให้โมเลกุลของน้ำภายในวัสดุอบแห้งสั่นและเกิดความร้อน ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิตั้งแต่สูงกว่าอุณหภูมิที่ผิว มีผลทำให้พื้นผิวภายนอกของวัสดุอบแห้งไม่เหี่ยวแห้ง และมีสีที่ใกล้เคียงกับวัตถุดิบก่อนอบแห้ง [12] จากข้อดีของเทคนิคสุญญากาศและการใช้แหล่งความร้อนจากรังสีอินฟราเรดที่กล่าวมาข้างต้น เมื่อนำมาใช้อบแห้งชิ้นกล้วยเพื่อผลิตเป็นแป้งกล้วย ซึ่งคาดว่าจะช่วยลดเวลาในการอบแห้งและได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดีหลังการอบแห้ง งานวิจัยนี้จึงมีความสนใจเกี่ยวกับวิธีการอบแห้งกล้วยด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ คุณภาพด้านสี ค่าปริมาณน้ำอิสระ ทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งโดยใช้สมการเอมพิริคัล หาสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล และพลังงานกระตุ้น เพื่อที่สามารถนำองค์ความรู้ในงานวิจัยนี้ใช้ในการศึกษากรรมวิธีการแปรรูปผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรต่อไป

2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

2.1 เครื่องอบแห้งสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด

ประกอบด้วยห้องอบแห้งทรงกระบอกหุ้มฉนวนหนา 2 cm มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 cm สูง 60 cm ติดตั้งหลอดอินฟราเรดขนาด 250 W จำนวน 4 หลอด โดยระยะห่างระหว่างหลอดอินฟราเรดที่อบแห้งกับหลอดอินฟราเรดประมาณ 20 cm และใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิดเคร่วมกับเครื่องควบคุมอุณหภูมิแบบ PID สามารถตรวจจับอุณหภูมิของอินฟราเรดช่วง 10 ถึง 260 °C รองรับกระแสตรง 4 อินพุต 0 ถึง 20 mA ความแม่นยำในการควบคุม ± 1 °C เพื่อควบคุมอุณหภูมิการอบแห้ง สร้างสภาวะสุญญากาศภายในห้องอบแห้งโดยปั๊มสุญญากาศขนาด 0.35 kW และใช้อุปกรณ์วัดร่วมกับอุปกรณ์ควบคุมความดัน เพื่อควบคุมความดันที่ใช้ในการอบแห้ง ซึ่งน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ระหว่างอบแห้งด้วยโพลีเอทิลีนความละเอียด 0.1 g และบันทึกการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก

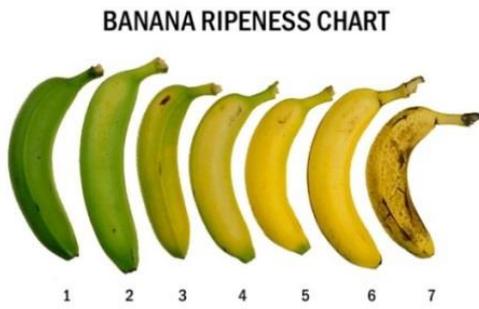
ของผลิตภัณฑ์ด้วยโปรแกรม Arduino ผ่านบอร์ด Arduino รุ่น UNO R3 และต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์ วัดปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้งด้วย Kilowatt hour meter ความละเอียด 0.01 kWh และบันทึกอุณหภูมิการอบแห้งด้วยเครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger, Graphtec midi logger รุ่น GL820) ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 เครื่องอบแห้งสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด

2.2 วิธีการทดลอง

กล้วยที่ใช้ในการทดลองนี้คือกล้วยน้ำว้าสายพันธุ์ปากช่อง 50 ซึ่งกล้วยมีระยะการสุกต่างๆ แสดงในรูปที่ 2 การทดลองนี้ใช้กล้วยในระยะสุกที่ 1 (สีเขียวทั้งผล) ปอกเปลือก หั่นเป็นแผ่นบางขนาด 5 mm จากนั้นแช่ด้วยสารละลายกรดซิตริก 5% w/w เพื่อป้องกันการเกิดสีน้ำตาล [14] นำขึ้นกล้วยที่ผ่านการแช่สารละลายกรดซิตริกประมาณ 300 g วางเรียงบนถาดในตู้อบแห้งต่อสายเทอร์โมคัปเปิลเพื่อวัดอุณหภูมิในห้องอบแห้งและขึ้นกล้วย เปิดปั๊มสุญญากาศเพื่อทำความดันสุญญากาศในห้องอบแห้งที่ประมาณ 10 kPa ตั้งค่าอุณหภูมิควบคุมในห้องอบแห้งที่ 40 50 และ 60 °C บันทึกน้ำหนักกล้วยขณะอบแห้งและอุณหภูมิทุก 1 นาที และบันทึกค่าพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหลอดรังสีอินฟราเรดและปั๊มสุญญากาศด้วย Kilowatt-hour meter อบแห้งจนได้ความชื้นประมาณร้อยละ 10 d.b. โดยทดลองจำนวน 3 ซ้ำ และนำผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอบแห้งไปวิเคราะห์คุณภาพต่อไป



รูปที่ 2 ระยะสุกของกล้วย [13]

2.3 การหาความชื้นของผลิตภัณฑ์

นำตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอบแห้งมาทำการบด ชั่งน้ำหนักผลิตภัณฑ์ก่อนอบแห้งแล้วนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 103 °C ด้วยตู้อบลมร้อนเป็นเวลา 72 ชั่วโมง [15] เพื่อหาผลแห้งหรือน้ำหนักผลิตภัณฑ์หลังอบแห้งแล้วนำไปคำนวณหาปริมาณความชื้นโดยใช้สมการที่ 1

$$MC = \frac{w - d}{d} \quad (1)$$

เมื่อ MC คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (d.b.)
w คือ น้ำหนักผลิตภัณฑ์ก่อนอบแห้ง (g)
d คือ น้ำหนักผลิตภัณฑ์หลังอบแห้ง (g)

2.4 การหาอัตราการอบแห้ง

การวิเคราะห์อัตราการอบแห้ง (Drying rate) แสดงถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของกล้วยในห้องอบแห้งต่อหนึ่งหน่วยเวลา ซึ่งสามารถคำนวณหาอัตราการอบแห้งของกล้วยได้ดังสมการที่ 2 [16]

$$DR = \frac{M_0 - M_t}{t} \quad (2)$$

เมื่อ DR คือ อัตราการอบแห้ง (Drying rate)
(g_w/g_{dry solid} min)
M₀ คือ ความชื้นเริ่มต้น (g_w/g_{dry solid})
M_t คือ ความชื้นที่เวลาใดๆ (g_w/g_{dry solid})
t คือ เวลาในการอบแห้ง (minute)

2.5 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) ที่ใช้ในการอบแห้งสามารถหาได้จากการนำมวลวัสดุก่อนการอบแห้ง มวลหลังการอบแห้ง และค่าปริมาณพลังงานที่ใช้ตลอดกระบวนการอบแห้งที่อ่านได้จาก Kilowatt hour meter มาคำนวณหาความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งได้จากสมการที่ 3 [11]

$$SEC = \frac{3.6E_p}{m_i - m_f} \quad (3)$$

เมื่อ SEC คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (MJ/g of water evaporated)
E_p คือ ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (kWh)
m_i คือ มวลของกล้วยก่อนอบแห้ง (g)
m_f คือ มวลของกล้วยหลังอบแห้ง (g)

2.6 การวัดค่าปริมาณน้ำอิสระ

นำตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอบแห้งในอุณหภูมิที่แตกต่างกันมาวิเคราะห์ปริมาณน้ำอิสระ (Water activity, a_w) ด้วยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณน้ำอิสระยี่ห้อ AquaLab 3TE ช่วงการอ่านค่า 0.03 ถึง 1.00 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความแม่นยำในการวัด ± 0.003 โดยทำการบดตัวอย่าง 5 g ใส่ในภาชนะ ทำการวิเคราะห์ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ ซึ่งผลิตภัณฑ์ประเภทอาหารแห้งต้องมีปริมาณน้ำอิสระไม่เกิน 0.6 จุลินทรีย์ประเภทเชื้อราจึงไม่สามารถเจริญเติบโตได้ [17]

2.7 การทดสอบคุณภาพสีหลังอบแห้ง

ทำการทดสอบคุณภาพสีของชิ้นกล้วยที่ได้จากการอบแห้งด้วยเครื่องวัดสี 3HN รุ่น Portable colorimeter NH310 ระบบสี CIE L*a*b* ใช้แสงสว่างที่ 6500 K ค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องวัดสีน้อยกว่า 0.04 (ΔE *ab) โดยค่า L* คือ ค่าความสว่างมีค่าระหว่าง 0-100 หรือสีดำถึงสีขาว ค่า a* แสดงค่า (+) สีแดง หรือ (-) สีเขียว และค่า b* แสดงค่า (+) สีเหลือง หรือ (-) สีน้ำเงิน

นำค่าสี่ที่วัดได้ไปวิเคราะห์ค่าทางสถิติ และเปรียบเทียบความแตกต่างของกล้วยก่อนและหลังอบแห้ง ดังสมการที่ 4 [11]

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (4)$$

เมื่อ ΔE คือ ความแตกต่างกันของสี
 ΔL^* คือ ความแตกต่างของความสว่าง
 Δa^* คือ ความแตกต่างของความเป็นสีแดง
 ถึงสีเขียว
 Δb^* คือ ความแตกต่างของความเป็นสีเหลือง
 ถึงสีน้ำเงิน

2.8 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัล

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัล เป็นสมการที่นิยมใช้ในการทำนายอัตราการอบแห้ง เนื่องจากเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ที่วิเคราะห์ง่ายและไม่ซับซ้อน ซึ่งสมการเอมพิริคัลจะแสดงอยู่ในรูปแบบความสัมพันธ์กับอัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio, MR) การคำนวณหาอัตราส่วนความชื้นจำเป็นต้องทราบค่าความชื้นสมดุล [18] โดยที่อัตราส่วนความชื้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5 ในการทดลองนี้ไม่คิดค่าความชื้นสมดุลเนื่องจากมีค่าน้อยกว่าความชื้นเริ่มต้นและความชื้นที่เวลาใดๆค่อนข้างมาก จึงสามารถจัดรูปสมการได้ดังสมการที่ 6

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_{in} - M_{eq}} \quad (5)$$

$$MR = \frac{M_t}{M_{in}} \quad (6)$$

เมื่อ M_{in} คือ ความชื้นเริ่มต้น (d.b.)
 M_t คือ ความชื้นที่เวลาใดๆ (d.b.)
 M_{eq} คือ ความชื้นสมดุล (d.b.)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัลใช้เทคนิคการวิเคราะห์สมการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear regression) ซึ่งมีค่าดัชนีบ่งชี้ความสามารถในการทำนายสมการทางคณิตศาสตร์ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2) ค่าการลดลงไคกำลังสอง (Chi-square, χ^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root meansquare error, RMSE) โดยสมการที่ให้ค่า R^2 สูงที่สุด และให้ค่า RMSE และ χ^2 ต่ำที่สุด จะเป็นสมการที่เหมาะสมที่สุด ค่า R^2 RMSE และ χ^2 มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (7), (8) และ (9) ตามลำดับ [9]

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

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

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

เมื่อ $MR_{exp,i}$ คือ อัตราส่วนความชื้นจากการทดลอง
 $MR_{pre,i}$ คือ อัตราส่วนความชื้นที่คำนวณได้จากสมการเอมพิริคัล
 N คือ จำนวนข้อมูลในการทดลอง
 p คือ จำนวนพารามิเตอร์ในสมการเอมพิริคัล

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัลที่ใช้ในการทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งของกล้วยที่ใช้ในงานวิจัยนี้มี 6 สมการ ได้แก่ Newton, Page, Modified Page, Henderson and Pabis, Logarithmic และ Midilli แสดงดังตารางที่ 1 [9]

ตารางที่ 1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัล

ลำดับ ที่	ชื่อสมการ	รูปแบบสมการ
1	Newton	$MR = \exp(-kt)$
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$
3	Modified Page	$MR = \exp(-(kt)^n)$
4	Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$
5	Logarithmic	$MR = a \exp(-kt)+c$
6	Midilli	$MR = a \exp(-kt^n)+bt$

* a b c k และ n คือ ค่าคงที่จากการวิเคราะห์สมการเอมพิริคัล และ t คือ เวลาในการอบแห้ง (minute)

2.9 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลและพลังงานกระตุ้น

สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (Effective moisture diffusivity coefficient) เป็นสมบัติเฉพาะทางกายภาพที่แสดงถึงความสามารถในการเคลื่อนที่ของของเหลวในวัสดุ ที่เกิดจากโมเลกุลที่เคลื่อนที่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำ โดยที่โมเลกุลของตัวถูกละลายจะค่อยๆ แพร่กระจายออกไปจนเป็นสารละลายเนื้อเดียวกันจึงหยุดการแพร่ซึ่งอยู่ในสภาวะสมดุล [19] ในงานวิจัยนี้ สมมติฐานให้ชิ้นกล้วยเป็นวัสดุที่เป็นแผ่นระนาบที่มีความยาวมาก (infinite slab) ดังนั้นในการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล สามารถเขียนสมการได้ดังสมการที่ 10 [20]

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{p=0}^{\infty} \left[\frac{1}{(2p+1)^2} \right] \exp \left[-\frac{(2p+1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{l^2} \right] \quad (10)$$

เมื่อ D_{eff} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (m^2/s)

l คือ ครึ่งหนึ่งของความหนาชิ้นกล้วย (m)

t คือ เวลาในการอบแห้ง (s)

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลเป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอบแห้งและมีความสัมพันธ์ตามรูปสมการของอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) กับค่าของพลังงานกระตุ้น (Activation energy) ซึ่งเป็นค่าพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นน้ำหรือความชื้นให้เคลื่อนที่ออกจากวัสดุ โดยค่าพลังงานกระตุ้นสามารถวิเคราะห์ได้จากความลาดชันระหว่าง $\ln(D_{eff})$ กับ $(1/T_{abs})$ ซึ่งมีค่าเท่ากับ $(-E_a/R)$ และปัจจัยเลขชี้กำลังหาได้จากสมการความสัมพันธ์ของ $\ln(D_{eff})$ กับ $(1/T_{abs})$ ดังสมการที่ (11) และ (12) [9]

$$D_{eff} = D_o \exp \left(-\frac{E_a}{RT_{abs}} \right) \quad (11)$$

หรือ

$$\ln(D_{eff}) = \ln(D_o) - \frac{E_a}{RT_{abs}} \quad (12)$$

เมื่อ D_o คือ ปัจจัยเลขชี้กำลัง (m^2/s)

E_a คือ พลังงานกระตุ้น (kJ/mol)

R คือ ค่าคงที่สากลของแก๊ส (8.314 J/mol K)

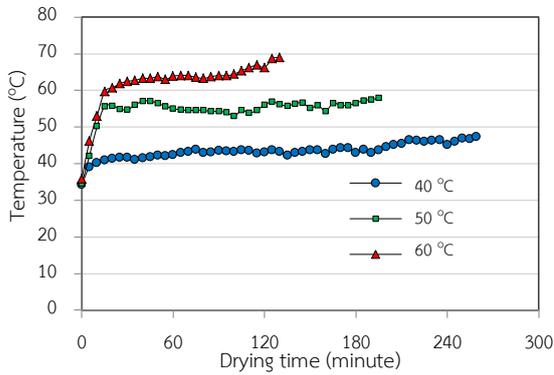
T_{abs} คือ อุณหภูมิอบแห้ง (K)

3. ผลการทดลอง

3.1 ผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงจลนพลศาสตร์การอบแห้งของผลิตภัณฑ์

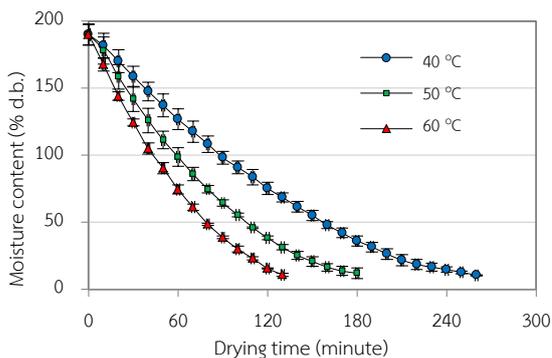
เมื่อชิ้นกล้วยถูกอบแห้งอยู่ในสภาวะสุญญากาศ จุดเดือดของน้ำในชิ้นกล้วยจะมีค่าลดลง จากตารางคุณสมบัติของน้ำที่สภาวะความดัน 10 kPa จุดเดือดของน้ำอยู่ที่ประมาณ 45.8 °C [9] ซึ่งในการทดลองนี้กำหนดอุณหภูมิห้องอบแห้งคือ 40 50 และ 60 °C เมื่อเริ่มให้ความร้อนด้วยหลอดอินฟราเรด ชิ้นกล้วยจะดูดกลืนรังสีและเปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อน น้ำในชิ้นกล้วยจะใช้พลังงานความร้อนในรูปความร้อนแฝงในการระเหยน้ำออกจากชิ้นกล้วย จากนั้นปริมาณความร้อนที่ชิ้นกล้วยได้รับจากการแผ่รังสีอินฟราเรดจะมากกว่าปริมาณความร้อนแฝงที่ใช้ในการระเหยน้ำ ปริมาณความร้อนที่เหลือจะถูกเปลี่ยนไปเป็นการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในชิ้นกล้วย ทำให้อุณหภูมิผิวหน้าค่อยๆ เพิ่มขึ้น [21] เมื่อระยะเวลา

ผ่านไปประมาณ 10 นาที อุณหภูมิผิวหน้าอยู่ในช่วงที่กำหนดไว้คือ 40 50 และ 60 °C (รูปที่ 3)



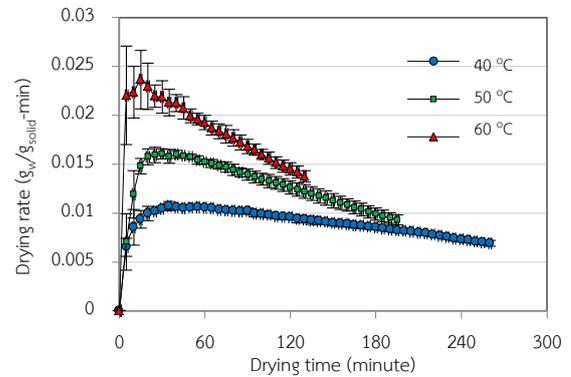
รูปที่ 3 อุณหภูมิของชิ้นกล้วยขณะอบแห้ง

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงความชื้นของชิ้นกล้วยขณะอบแห้งดังภาพที่ 4 พบว่า กราฟที่อุณหภูมิอบแห้ง 60 °C มีความลาดชันมากที่สุด ซึ่งแสดงถึงการลดลงของความชื้นเร็วที่สุด และใช้เวลาในการอบแห้งสั้นที่สุด เนื่องจากการใช้อุณหภูมิการอบแห้งที่สูงขึ้น มีผลทำให้ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อน และสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นมีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้การถ่ายเทมวลดีขึ้น [18] และทำให้อัตราอบแห้งสูงขึ้น (รูปที่ 5) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่อุณหภูมิอบแห้ง 50 และ 40 °C ที่มีอัตราการลดลงของความชื้น และอัตราการอบแห้งต่ำกว่าที่อุณหภูมิ 60 °C โดยในช่วงตอนเริ่มต้นของการอบแห้งนั้น ความชื้นจะลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากความชื้นของกล้วยมีปริมาณสูง เมื่อกล้วยได้รับความร้อนทำให้ปริมาณน้ำบริเวณผิวกล้วยถูกนำออกไปจากกล้วยได้อย่างรวดเร็ว [22]



รูปที่ 4 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของกล้วยระหว่างการอบแห้ง

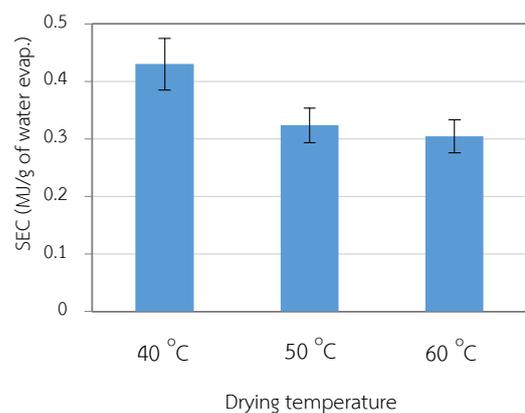
และความชื้นจะลดลงในช่วงท้ายๆ ของกระบวนการ เนื่องจากผิวหน้าของชิ้นกล้วยแห้งและน้ำที่อยู่ภายในชิ้นกล้วยเคลื่อนที่ออกมาที่ผิวช้ากว่าการระเหยน้ำออกจากผิว ทำให้อัตราการอบแห้งลดลง [21]



รูปที่ 5 อัตราการอบแห้งของกล้วย

3.2 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

เมื่อนำค่าน้ำหนักของกล้วยก่อนการอบแห้ง น้ำหนักกล้วยหลังการอบแห้ง และปริมาณพลังงานที่ใช้ตลอดกระบวนการอบแห้งมาคำนวณหาค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ พบว่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 °C มีค่าต่ำที่สุด และที่ 40 °C มีค่ามากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 6 เนื่องจากที่อุณหภูมิอบแห้งที่สูงขึ้นทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้นส่งผลให้น้ำเกิดการระเหยได้เร็วขึ้นและระยะเวลาการอบแห้งสั้นลง



รูปที่ 6 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

3.3 สีและปริมาณน้ำอิสระของชิ้นกล้วยหลังอบแห้ง

ความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการอบแห้งที่ความดัน 10 kPa อุณหภูมิ 40 50 และ 60 °C ได้ร้อยละความชื้นสุดท้าย 10.54 7.25 และ 9.67 d.b. ตามลำดับ และปริมาณน้ำอิสระมีค่า 0.319 0.263 และ 0.312 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าต่ำกว่า 0.6 จัดเป็นอาหารที่มีความชื้นต่ำซึ่งจุลินทรีย์ประเภทเชื้อราไม่สามารถเจริญได้ [17] ดังแสดงในตารางที่ 2 และ ค่า L^* a^* b^* ของกล้วยสดก่อนอบแห้งและผลิตภัณฑ์หลังอบแห้งทั้ง 3 อุณหภูมิไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงในตารางที่ 3 โดยที่ค่า L^* ของกล้วยสดมีค่า 88.14 และกล้วยหลังอบแห้งมีค่าอยู่ระหว่าง 89.52-89.63 a^* ของกล้วยสดมีค่า 3.24 กล้วยหลังอบแห้งมีค่าอยู่ระหว่าง 2.51-2.87 และค่า b^* ของกล้วยสดมีค่า 13.38 กล้วยหลังอบแห้งมีค่าอยู่ระหว่าง 10.00-10.19 จะสังเกตได้ว่าหลังอบแห้งค่า L^* มีค่าเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ค่า a^* และ b^* หลังอบแห้งมีค่าลดลง ซึ่งจากงานวิจัยเรื่องการผลิตกล้วยน้ำว้าอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน [23] พบว่าการใช้ระยะเวลาอบแห้งที่นานขึ้นมีผลทำให้ชิ้นกล้วยมีค่าสีที่คล้ำขึ้นทั้งนี้เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลชนิดที่เกิดจากเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากไม่ได้มีการแช่ในสารเคมีที่ช่วยในการยับยั้งปฏิกิริยาสีน้ำตาลก่อนการอบแห้ง ซึ่งในการทดลองนี้ใช้สารละลายกรดซิตริกเป็นตัวยับยั้งปฏิกิริยาสีน้ำตาลจึงมีผลการยับยั้งเอนไซม์ดังกล่าว ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่มีสีคล้ำลง (รูปที่ 7) และเมื่อพิจารณาค่าความแตกต่างกันของสี (ΔE) พบว่าเมื่อใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้นค่าความแตกต่างของสีจะมีค่าลดลงโดยแนวโน้มของค่า L^* พบว่าการใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นลงทำให้ผลิตภัณฑ์มีความสว่างมากกว่าการอบแห้งที่ใช้ระยะเวลานาน ค่า a^* พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออบแห้งระยะเวลาเพิ่มขึ้น แต่ค่า b^* มีค่าลดลงเมื่อใช้ระยะเวลาการอบแห้งนานขึ้น ซึ่งงานวิจัยเรื่อง การใช้สารป้องกันการเกิดสีน้ำตาลในกล้วยหอมทองตัดแต่งก่อนนำไปทอดแบบสุญญากาศ [14] ก็พบว่า ค่า L^* ที่สูงกว่ามีผลต่อค่าการยอมรับของผู้บริโภคในผลิตภัณฑ์มากกว่า

ตารางที่ 2 ความชื้นและ a_w ของผลิตภัณฑ์

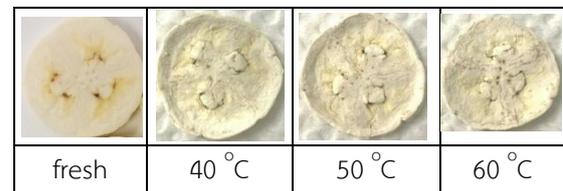
Drying Temp. (°C)	Moisture content (% d.b.)	a_w^{ns}
40	10.54	0.319±0.061
50	7.25	0.263±0.030
60	9.67	0.298±0.064

^{ns} คือไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 3 สีของกล้วยและค่าความแตกต่างของสีหลังอบแห้ง

T (°C)	L^{*ns}	a^{*ns}	b^{*ns}	ΔE^{ns}
fresh	88.14±1.59	3.24±0.22	13.38±2.48	-
40	89.63±0.28	2.51±0.63	10.00±2.30	4.06±0.36
50	89.60±0.21	2.76±0.49	10.19±1.85	3.80±0.23
60	89.52±0.40	2.87±0.50	10.08±1.89	3.78±0.46

^{ns} คือไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 7 ชิ้นกล้วยก่อนอบและหลังอบที่อุณหภูมิต่างๆ

3.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัล

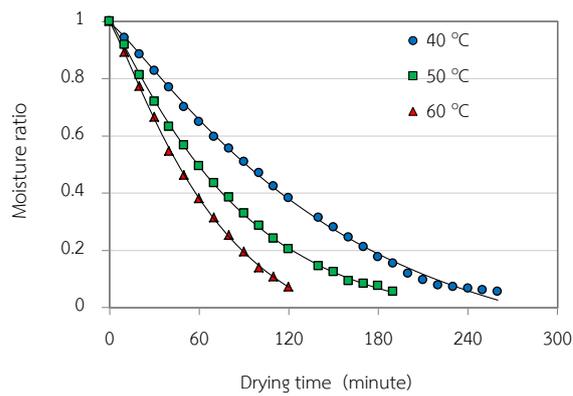
เมื่อนำผลการทดลองที่ได้จากการอบแห้งกล้วยที่ความดัน 10 kPa อุณหภูมิ 40 50 และ 60 °C ไปทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ในแต่ละสมการของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัลจำนวน 6 สมการ โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัลที่เหมาะสมที่สุดจะสามารถทำนายผลการทดลองได้ดีที่สุด ต้องมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) สูงที่สุด ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) และค่าการลดลงโคกำลังสอง (χ^2) ต่ำที่สุด [18] และจากการวิเคราะห์พบว่า ค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) อยู่ระหว่าง 0.98276-0.99974 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) อยู่ระหว่าง

0.00462-0.04122 และค่าเฉลี่ยการลดลงไคกำลังสอง (χ^2) มีค่าระหว่าง 0.02432×10^{-3} - 1.76257×10^{-3} (ตารางที่ 4) สมการที่มีความสามารถในการทำนายผลการทดลองได้ดีที่สุดคือ สมการ Midilli โดยมีค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) 0.99974 สูงที่สุด ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) 0.00462 และค่าการลดลงไคกำลังสองเฉลี่ย (χ^2) มีค่า 0.02432×10^{-3} ต่ำที่สุด เมื่อนำค่าเฉลี่ยอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลอง และค่าอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากสมการของ

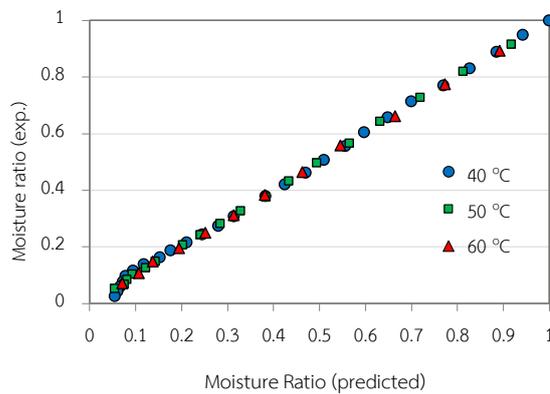
Mildilli มาเปรียบเทียบกับในรูปที่ 8 พบว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน จากนั้นได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทำนายด้วยสมการเอมพิริคัลของ Midilli พบว่า ความสัมพันธ์ของข้อมูลค่อนข้างเป็นเส้นตรง จึงสามารถสรุปได้ว่า สมการของ Mildilli เป็นสมการที่สามารถใช้ในการทำนายการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งชั้นกล้วยได้ดีที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 9

ตารางที่ 4 ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัล

Model	T (°C)	Parameter					R^2	RMSE	χ^2 (10^{-3})
		k	n	a	b	c			
Newton	40	0.00820					0.97409	0.04675	2.22752
	50	0.01236					0.99028	0.04064	1.69352
	60	0.01647					0.98390	0.03628	1.36668
	Average						0.98276	0.04122	1.76257
Page	40	0.00192	1.29968				0.99769	0.01395	0.20221
	50	0.00531	1.18830				0.99782	0.01379	0.20020
	60	0.00636	1.22857				0.99787	0.01321	0.18832
	Average						0.99779	0.01365	0.19691
Modified Page	40	0.00813	1.30936				0.99771	0.01389	0.20056
	50	0.01211	1.26967				0.99925	0.00810	0.06902
	60	0.01633	1.22800				0.99786	0.01323	0.18888
	Average						0.99827	0.01174	0.15282
Henderson & Pabis	40	0.00898		1.08586			0.98431	0.03658	1.39086
	50	0.01343		1.08359			0.98974	0.02990	0.94095
	60	0.01748		1.05687			0.98884	0.03021	0.98541
	Average						0.98763	0.03223	1.10574
Logarithmic	40	0.00543		1.32249		-0.29385	0.99872	0.01039	0.11431
	50	0.00976		1.19801		-0.15691	0.99839	0.01184	0.15144
	60	0.01406		1.15001		-0.11435	0.99765	0.01385	0.21585
	Average						0.99825	0.01202	0.16053
Midilli	40	-0.00210	1.07849	1.00834	-0.00882		0.99977	0.00440	0.02093
	50	0.00462	1.20743	1.00305	-0.00016		0.99965	0.00553	0.03395
	60	0.00911	1.10522	0.99731	-0.00067		0.99981	0.00393	0.01809
	Average						0.99974	0.00462	0.02432



รูปที่ 8 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นระหว่างผลการทดลองและผลการคำนวณจากสมการเอ็มพริคัลของ Mildilli

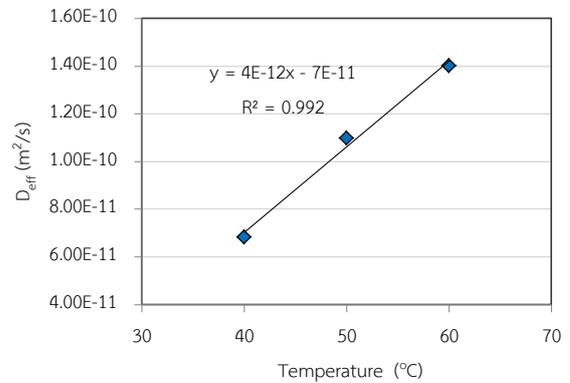


รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นระหว่างผลการทดลองและผลการคำนวณจากสมการเอ็มพริคัลของ Mildilli

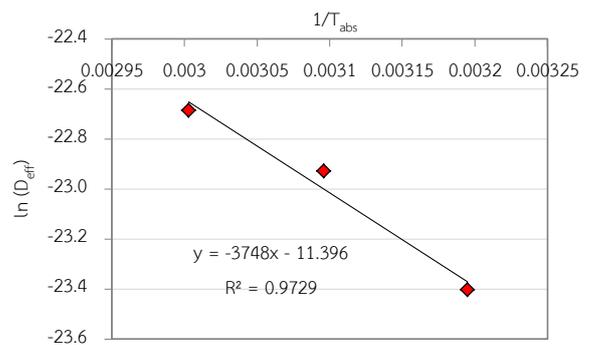
3.5 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลและพลังงานกระตุ้น

จากผลการทดลองพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (D_{eff}) ที่อุณหภูมิอบแห้ง 40 50 และ 60 °C มีค่า 6.85×10^{-11} 11.00×10^{-11} และ 14.03×10^{-11} m^2/s ตามลำดับ ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าอุณหภูมิอบแห้งที่สูงขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลจะมีค่าสูงขึ้นด้วย (รูปที่ 10) สอดคล้องกับรูปที่ 4 ที่พบว่าการใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้นมีผลทำให้การลดลงของความชื้นเร็วมากยิ่งขึ้น โดยอุณหภูมิอบแห้งที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความดันไอมีค่าสูงตามไปด้วย ส่งผลให้ความชื้นที่อยู่ในผลิตภัณฑ์เคลื่อนที่และแพร่ออกจากผลิตภัณฑ์ได้เร็วขึ้น ทำให้ใช้

เวลาในการอบแห้งน้อยลง [16] เมื่อหาค่าความลาดชันระหว่าง $\ln(D_{eff})$ กับ $(1/T_{abs})$ ซึ่งมีค่าเท่ากับ $(-E_a/R)$ (รูปที่ 11) จะคำนวณค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) ได้เท่ากับ 31,160.83 kJ/mol และปัจจัยเลขชี้กำลังมีค่า $11.25 \times 10^{-6} m^2/s$



รูปที่ 10 ผลของอุณหภูมิอบแห้งต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลกับอุณหภูมิอบแห้ง

4. สรุป

การอบแห้งขึ้นกล้วยน้ำว้าด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด ที่ความดันสัมบูรณ์ 10 kPa อุณหภูมิอบแห้ง 40 50 และ 60 °C พบว่า การใช้อุณหภูมิอบแห้งที่สูงขึ้นมีผลทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานลดลง โดยที่อุณหภูมิ 60 °C มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำที่สุดและที่อุณหภูมิ 40 °C มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะสูงที่สุด และการใช้

อุณหภูมิอบแห้งที่ต่างกันไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของค่าสีและปริมาณน้ำอิสระของผลิตภัณฑ์หลังอบแห้ง ดังนั้นการอบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ 10 kPa อุณหภูมิ 60 °C เป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมในการอบแห้งชิ้นกล้วย ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาเป็นเครื่องอบแห้งขนาดใหญ่ระดับครัวเรือนหรืออุตสาหกรรมสำหรับแปรรูปกล้วยน้ำว้าเป็นชิ้นกล้วยอบแห้งโดยมีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำและได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพ เมื่อพิจารณาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัลที่ใช้ทำนายอัตราส่วนความชื้นได้ดีที่สุดคือ สมการของ Midilli โดยมีค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเฉลี่ย (R^2) 0.99974 สูงที่สุด ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) 0.00462 และค่าการลดลงโคกำลังสอง (χ^2) 2.432×10^{-05} ต่ำสุด นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลมีค่าระหว่าง 6.85×10^{-11} - 14.03×10^{-11} m²/s และค่าพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 31,160.83 kJ/mol

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก ที่สนับสนุนงานวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Lertkaeo, T. Promma, S. Wisitsirikun, N. Khamcharoen, A. Boondech, P. Phukongchai, N. Panjai, T. Jansai, S. Sunthornphong, P. Chamchoy and A. Klinkalong, "Comparisons of antioxidant activities and total Phenolic content of *Musa sapientum*, Linn. (Kluai Khai) peels," in *The 7th Phayao Research Conference*, Phayao, 2018, pp. 1379-1387.
- [2] A. Pengpoo and K. Jamjang, "The Production of banana flour with antioxidant from 4 types of bananas," in *The 3rd Kamphaeng Phet Rajabhat University National Conference*, Kamphaeng Phet, 2016, pp. 410-415.
- [3] K. Sittisuanjik, K. Sriruksa. "Comparative study on antioxidant activity, total phenolic contents and physicochemical properties of banana flours" *Agricultural Sci. J.*, vol. 44, no. 2, pp. 213-216, May-Aug. 2013.
- [4] J. Boonkong, T. Bunmee and P. Ruenkeaw, "Application of resistant starch from unripe banana "Hom Thong" (*Musa sapientum* L., AAA group) in pasta," *Journal of Food Technology Siam University*, vol. 10, no. 1, pp. 19-29, Oct. 2014-Sep. 2015.
- [5] K. Srikaeo and J. Sangkhiaw, "Effect of amylase and resistant starch on glycemic index of rice noodles," *LWT-Food Science and Technology*, Vol. 59, pp. 1129-1135, Jun. 2014.
- [6] W. Keawsuwan and A. Nuichan, "The use of Kluai Nam-wa flour substitute for wheat flour in coating batter," in *The 7th Muban Chombueng Rajabhat National Conference*, 2019, pp. 365-375.
- [7] V. Khummee, A. Akaraeaktalin, C. Lauraj and C. Rungrueang, "Development of brownies crackerby using banana flour substituted wheat flour" in *The 4th Kamphaeng Phet Rajabhat University National Conference*, Kamphaeng Phet, 2017, pp. 937-946.
- [8] C.V. Bezerra, A.M.D.C. Rodrigues, E.R. Amante and L.H.M.D. Silva, "Nutritional potential of green banana flour obtained by drying in spouted bed," *Revista Brasileira de*

- Fruticultura*, vol. 35, no. 4, pp. 1140-1146, Dec. 2013.
- [9] K. Witinantakit, N. Uengkimbuan and S. Rungsawang, "Mathematical modeling of shiitake mushroom drying using infrared-vacuum technique," *SWU Engineering Journal*, vol. 14, no. 3, pp. 1-13, Sep.-Dec. 2019.
- [10] J. Pico, K. Xu, M. Guo, Z. Mohamedshah, M.G. Ferruzzi and M.M. Martinez, "Manufacturing the ultimate green banana flour: Impact of drying and extrusion on phenolic profile and starch bioaccessibility," *Food Chemistry*, vol. 297, pp. 1-10, Jun. 2019.
- [11] W. Manangan and K. Witinantakit, "Water lily drying pulsed vacuum-infrared combined with silica sand embedding," *Kasem Bundit Engineering Journal*, vol. 10, no. 3, pp. 84-98, Sep.-Dec. 2020.
- [12] U. Teeboonma and S. Jongjam, "Ginger drying using infrared-vacuum technique," *Burapha Science Journal*, vol. 15, pp. 76-86, Jul. - Dec. 2010.
- [13] Postharvest Center University of California. Fruit (1996, Nov.). Produce Facts English. [Online]. Available: http://postharvest.ucdavis.edu/Commodity_Resources/Fact_Sheets/Datastores/Fruit_English/?uid=9&ds=798
- [14] P. Vongsawasdi, N. Dejsuk, S. Phuengpa, S. Timhom and N. Suebsaisich, "Using anti-browning agents in fresh-cut Hom-Thong banana before vacuum-frying," *Agricultural Sci. J*, vol. 44, no. 2, pp. 505-508, May.-Aug. 2013.
- [15] AOAC. Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists. 17th ed. Maryland: Gaithersburg, 2000.
- [16] S. Jaekhom and K. Witinantakit, "Drying kinetics of chicken using superheated steam technique," *Kasem Bundit Engineering Journal*, vol. 9, no. 3, Sep.-Dec. 2019.
- [17] P. Roskhrua and M. Kitchaicharoen, "Effects of sugar, citric acid and pectin content on quality of mulberry fruit leather product," *RMUTP Research Journal*, vol. 14, no. 1, pp. 58-69, Jan.-Jun. 2020.
- [18] S. Jaekhom, K. Witinantakit and E. Boonthum, "Kaffir lime leaves drying using far infrared-vacuum technique," *SWU Engineering Journal*, vol. 16, no. 1, pp. 59-70, Jan.-Apr. 2021.
- [19] M. Nachaisin and S. Dondee, "Determination of heat transfer coefficient and effective moisture diffusivity of phlai drying," *Journal of Research for Social and Community Development, Rajabhat Maha Sarakham University*, vol. 1, no. 2, pp. 117-124, Feb.-Jul. 2014.
- [20] W. Junlakan, "Vacuum drying kinetics of mango (*Mangifera indica* L. Var.) Slices," *Burapha Science Journal*, vol. 22, no. 3, pp. 358-373, Sep.-Dec. 2017.
- [21] R. Ngamchum, "Far infrared radiation - vacuum drying of sliced cavendish," M.E. thesis, School of Energy and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand, 2004.

- [22] S. Tirawanichakul, N. Thongmark, P. Chongkasaem and Y. Tirawanichakul, "Convective hot air drying of *Musa nana* Linn. by LPG and electrical heating : drying kinetics, quality and energy consumption," *Wichcha Journal*, vol. 38 no. 1, pp. 91-105, Jan.-Jun. 2019.
- [23] P. Tubtimsri, R. Kengkuntod and D. Krueangngern, "The production of dried *Musa sapientum* Linn. by Infrared combine with hot air," in *The 3rd Kamphaeng Phet Rajabhat University National Conference*, Kamphaeng Phet, 2016, pp. 535-546.