

อิทธิพลของอุณหภูมิและความเร็วลมต่อการอบแห้งเมล็ดโกโก้แบบลมร้อน

จันทิมา ชั่งสิริพร^{1*} พฤกระยา พงศ์ยี่หล้า¹ และนิรณา ชัยฤกษ์¹

juntima.c@psu.ac.th^{1*}, prukraya.a@hotmail.com¹, nirana_1234@hotmail.com¹

¹สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

Received	: 9-Dec-2022
Revised	: 4-Apr-2023
Accepted	: 20-Apr-2023

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิและความเร็วลมต่อเวลาและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้งเมล็ดโกโก้ ทำการศึกษาอุณหภูมิการอบแห้งที่ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส ความเร็วลมที่ไหลผ่านชั้นเมล็ดโกโก้บนถาดอบที่ 0.05, 0.067, 0.085 และ 0.1 เมตร/วินาที จัดวางเมล็ดโกโก้บนถาดอบ 1 และ 2 ชั้น โดยวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความชื้น อัตราการอบแห้ง และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในกระบวนการอบแห้งเมล็ดโกโก้ จากการทดลองพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิและความเร็วลมทำให้เวลาที่ใช้ในการอบแห้งลดลง โดยสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งที่ใช้เวลาและมีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำ คือ การอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส โดยใช้ความเร็วลม 0.1 เมตร/วินาที ที่การจัดวางเมล็ด 1 ชั้น มีเวลาการอบแห้ง 130 นาที และมีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเท่ากับ 74 เมกะจูล/กิโลกรัมน้ำระเหย สมการกึ่งทฤษฎีของ Midilli et al. เป็นสมการทำนายการลดลงของความชื้นเมล็ดโกโก้ที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ที่สูงที่สุดและให้ค่า RMSE และ SSE ต่ำที่สุด โดยมี R^2 มากกว่า 0.9964 ค่า RMSE และค่า SSE เท่ากับ 0.01774 และ 0.000913 ตามลำดับ ผลการศึกษานี้จะสามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาการอบแห้งเมล็ดโกโก้ให้ได้คุณภาพต่อไป

คำสำคัญ: เมล็ดโกโก้ การอบแห้งด้วยลมร้อน ความชื้น อุณหภูมิ พลังงานจำเพาะ

The Influence of Temperature and Air Velocity on the Hot Air Drying of Cocoa Bean

Juntima Chungsiriporn^{1*}, Prukraya Pongyeela¹ and Nirana Chairerk¹
juntima.c@psu.ac.th^{1*}, prukraya.a@hotmail.com¹, nirana_1234@hotmail.com¹

¹Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University

Received	: 9-Dec-2022
Revised	: 4-Apr-2023
Accepted	: 20-Apr-2023

Abstract

The objective of this research was to investigate the effects of drying parameters on drying time and specific energy consumption of cocoa beans drying. The drying temperature of 50, 60, 70 and 80°C and air velocities of 0.05, 0.067, 0.085 and 0.1 m/s were studied. Amount of cocoa bean placing on drying tray at 1 and 2 layers were monitored. The moisture ratio, drying rate and energy consumption were analyzed. The results showed that the drying time decreased as the drying temperature and the air velocity increased. The optimum condition for drying cocoa beans was at 60°C with air velocity of 0.1 m/s at 1 layer of bean drying. The drying time of 130 min, which was the lowest energy consumption condition as the specific energy consumption of 74 MJ/kg water evaporated. The Midilli et al. model was an equation that predicts the optimum reduction of cocoa bean moisture. The highest decision coefficient (R^2) and the lowest RMSE, and SSE with R^2 greater than 0.9964 RMSE and SSE value were 0.01774 and 0.000913, respectively. These results can be used as a guideline for further development of cocoa bean drying quality.

Keywords: cocoa bean, hot air drying, moisture, temperature, specific energy consumption

1. บทนำ

โกโก้ (Cocoa) เป็นพืชเศรษฐกิจที่รัฐบาลและกระทรวงเกษตรและสหกรณ์มีนโยบายส่งเสริมให้เกษตรกรปลูก โดยทางภาครัฐอยู่ระหว่างการศึกษานโยบายการปลูกโกโก้แซมต้นยางพาราจนถึงการปลูกทดแทนการทำสวนยางพารา เพื่อให้เกษตรกรสามารถสร้างรายได้เพิ่มขึ้นและช่วยลดผลกระทบจากราคายางพาราที่ตกต่ำในช่วงปี พ.ศ. 2559-2563 ไทยมีพื้นที่ปลูกต้นโกโก้เพิ่มขึ้นจาก 150 ไร่ ในปี พ.ศ. 2559 เป็น 1,931 ไร่ ในปี พ.ศ. 2563 [1] ผลโกโก้ประกอบด้วยเมล็ดโกโก้และเปลือกโกโก้ เมล็ดโกโก้ต้องผ่านกระบวนการแปรรูปเป็นเมล็ดแห้งและนำมาแปรรูปเป็นวัตถุดิบซึ่งสามารถใช้ผลิตเป็นอาหาร ขนมหวาน และเครื่องดื่มได้หลายชนิด

เมล็ดโกโก้ (Cocoa bean) ประกอบด้วย แคลอรี ไขมัน โปรตีน คาร์โบไฮเดรต และแร่ธาตุต่างๆ [2] เมล็ดโกโก้แห้งเป็นวัตถุดิบเริ่มต้นที่กลุ่มเกษตรกรทำส่งขายให้โรงงานอุตสาหกรรมเพื่อแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อื่นๆ ขั้นตอนการทำเมล็ดโกโก้แห้งเริ่มต้นจากแกะเมล็ดโกโก้ออกจากผล เมื่อแกะเมล็ดโกโก้แล้วต้องนำมาหมักอีก 6 วัน เพื่อให้ได้กลิ่นและรสชาติที่ดีขึ้น จากนั้นนำเมล็ดโกโก้มาตากแห้ง ซึ่งต้องใช้เวลาประมาณ 1-2 สัปดาห์ เพื่อลดความชื้นจากร้อยละ 60 น้ำหนักเปียก ให้เหลือร้อยละ 7 น้ำหนักเปียก

การอบแห้ง (Drying) เป็นกระบวนการแปรรูปอาหารที่สำคัญมากช่วยในการรักษาคุณภาพ ลดความสูญเสียและยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ เป็นการลดค่าความชื้นในวัสดุเพื่อจะช่วยลดการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และการทำงานของเอนไซม์ที่ส่งผลให้เกิดการเน่าเสีย ที่เป็นสาเหตุสำคัญในการทำให้เกิดการสูญเสียคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ได้แก่ รสชาติ สี และคุณค่าทางอาหาร [3] อัตราการอบแห้งและการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารขึ้นอยู่กับกลไกการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลสารในระหว่างกระบวนการอบแห้ง [4] ระหว่างการอบแห้งเมล็ดโกโก้จะเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลที่ไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ทำให้เมล็ดมีสีน้ำตาลเข้มขึ้น [5] การวิจัยและพัฒนาเพื่อช่วยในการปรับปรุงประสิทธิภาพของการ

อบแห้งจึงเป็นสิ่งสำคัญในการรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์เพื่อให้ได้มาซึ่งผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพผ่านมาตรฐาน

การอบแห้งด้วยลมร้อน (Hot air drying) เป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมเนื่องจากสามารถทำได้ง่ายและมีต้นทุนในการดำเนินการไม่สูง [6] ใช้เวลาในการอบแห้งไม่นาน โดยหลักการอบแห้งอาหารด้วยลมร้อนเป็นวิธีการที่ใช้ลมร้อนเป็นตัวกลางในการให้ความร้อนกับน้ำในชิ้นอาหารและพาน้ำออกจากชิ้นอาหารจนกระทั่งอาหารแห้ง ซึ่งการถ่ายโอนความร้อนและความชื้นโดยการพาความร้อนและมวลสารเป็นกลไกที่มีประสิทธิภาพสูง อุณหภูมิของลมและความเร็วลมที่ใช้ในการอบแห้งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารแห้งที่ได้ การเพิ่มอุณหภูมิและความเร็วลมจะช่วยเพิ่มอัตราการระเหยของน้ำออกจากชิ้นอาหาร ทำให้ลดระยะเวลาในการอบแห้งลง การเปลี่ยนแปลงทางคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารอาจเกิดขึ้นมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของวัตถุดิบและสภาวะที่ใช้ในการอบแห้ง [7]

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อการศึกษาพฤติกรรมการอบแห้งด้วยลมร้อน โดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และอัตราการไหลของลมในการอบแห้งที่ส่งผลต่ออัตราส่วนความชื้น อัตราการอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในกระบวนการ ทั้งนี้เพื่อช่วยให้ได้พฤติกรรมการอบแห้งเมล็ดโกโก้ในการพัฒนากระบวนการอบแห้งต่อไป

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 การอบแห้งเมล็ดโกโก้

เตรียมผลโกโก้พันธุ์ชุมพร 1 จากเกษตรกรปลูกในชุมชน อำเภอป่าบอน จังหวัดพัทลุง แกะเมล็ดโกโก้และทำการหมักเป็นเวลา 7 วัน นำเมล็ดโกโก้ที่ผ่านการหมักวัดค่าความชื้นตั้งต้นได้ร้อยละ 117 น้ำหนักแห้งแสดงดังรูปที่ 1 นำมาทำการอบแห้งครั้งละ 35 กรัม ด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนที่ความเร็วลม 0.05, 0.067, 0.085 และ 0.1 เมตร/วินาที ศึกษาผลของการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส ทดลองอบแห้งที่การจัดวางเมล็ดโกโก้ด้วยความหนา 1

และ 2 ชั้น โดยเมล็ดโกโก้ 1 ชั้นจะมีความหนาประมาณ 1 เซนติเมตร ทำซ้ำ 3 ครั้งและบันทึกน้ำหนักของเมล็ดโกโก้ในระหว่างการอบแห้งทุก 5 นาที กำหนดความชื้นสุดท้ายของเมล็ดที่ร้อยละ 5 น้ำหนักแห้ง จึงหยุดการอบแห้ง โดยคำนวณน้ำหนักสุดท้ายที่ต้องการจากค่าความชื้นเริ่มต้น และหาอัตราส่วนความชื้นและอัตราการอบแห้งของเมล็ดโกโก้ ดังรูปที่ 2



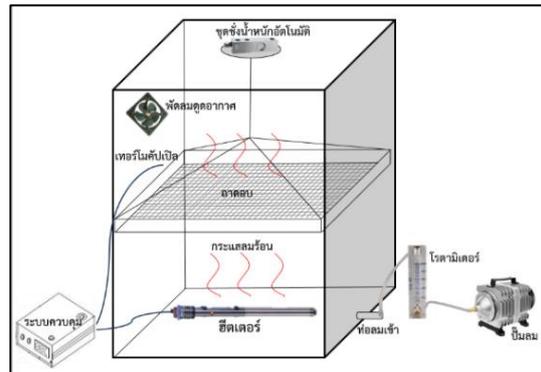
รูปที่ 1 เมล็ดโกโก้ที่ผ่านการหมัก



รูปที่ 2 เมล็ดโกโก้แห้งหลังอบแห้ง

เครื่องอบแห้งที่ใช้ในการศึกษาวิจัย เป็นเครื่องอบแห้งแบบถาดและมีลมร้อนไหลผ่านจากด้านล่างขึ้นด้านบน ขนาดกว้าง 45 เซนติเมตร และยาว 90 เซนติเมตร มีแผ่นฉนวนหุ้มเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน ภายในห้องอบแห้งมีฮีตเตอร์ขนาด 300 วัตต์ ให้ความร้อนในการอบแห้ง ทำการตั้งค่าอุณหภูมิและวัดอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัปเปิลที่เชื่อมกับระบบควบคุม มีถาดเป็นตะแกรงเจาะรูใส่วัตถุดิบจำนวน 1 ถาดที่แขวนต่อกับชุดชั่งน้ำหนักอัตโนมัติ Load cell sensor (HX-711) ที่สามารถชั่งน้ำหนักของวัตถุดิบภายในตู้ได้อัตโนมัติ ติดตั้งพัดลมดูดอากาศด้านบนถาดอบสำหรับระบายความชื้น และควบคุมอัตราการไหล

ของลมด้วยโรตารีมิเตอร์ ซึ่งไม่มีการนำความร้อนจากตู้อบกลับมาใช้ซ้ำ ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ไดอะแกรมเครื่องอบแห้งในการทดลอง

2.2 การวิเคราะห์กระบวนการอบแห้ง

อัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio) คือค่าที่บ่งบอกถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงมวลน้ำในวัสดุเมื่อเทียบกับความชื้นเริ่มต้นเมื่อเวลาการอบแห้งดำเนินต่อไปในเวลาใดๆ ดังสมการที่ (1) [8]

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

- เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น
 M_{in} คือ ความชื้นเริ่มต้น (ร้อยละมาตรฐานแห้ง)
 M_{eq} คือ ความชื้นสมดุล (ร้อยละมาตรฐานแห้ง)
 M_t คือ ความชื้นที่เวลาต่างๆ (ร้อยละมาตรฐานแห้ง)

อัตราการอบแห้ง (Drying rate) คือ อัตราการระเหยน้ำออกจากวัสดุต่อหน่วยเวลาระหว่างการทำแห้ง ดังสมการที่ (2) [9]

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

- เมื่อ M_0 คือ ความชื้นเริ่มต้น (กรัม/กรัมมวลแห้ง)

M_t คือ ความชื้นของวัสดุที่เวลาใดๆ (กรัมน้ำ/กรัมมวลแห้ง)

T คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (นาที)

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption) คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาณพลังงาน ที่ใช้ในการอบแห้งต่อปริมาณน้ำที่ระเหยออก จากวัสดุอบแห้ง ดังสมการที่ (3) [10]

$$SEC = \frac{E}{m_w} \quad (3)$$

เมื่อ SEC คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

(เมกะจูล/กิโลกรัม)

E คือ พลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการอบแห้ง

(เมกะจูล)

m_w คือ ปริมาณน้ำที่ ระเหยจากผลิตภัณฑ์อบแห้ง (กิโลกรัม)

2.3 ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ การอบแห้งเมล็ดโกโก้

นำอัตราส่วนความชื้นที่เวลาใดๆ จากการทดลองสถานะที่เหมาะสมที่ได้จากการอบแห้งมา เปรียบเทียบกับสมการอบแห้งที่ใช้สำหรับทำนายค่า ความชื้น 5 สมการ ด้วยโปรแกรม MATLAB โดยเป็น รูปแบบสมการอบแห้งชั้นบางแบบเอมพิริคัลและกึ่ง ทฤษฎี ดังตารางที่ 1 โดยผลจากโปรแกรมจะแสดงค่า สัมประสิทธิ์ การตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2) รากของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square error: RMSE) และผลรวม กำลังสองของเศษเหลือของแบบจำลอง (SSE)

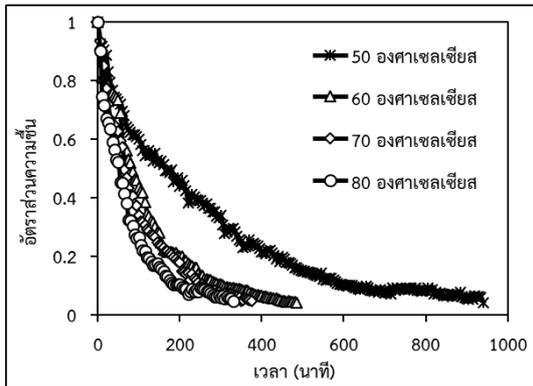
ตารางที่ 1 สมการอบแห้งแบบชั้นบาง

ชื่อสมการ	สมการ
Page [11]	$MR = \exp(-kt^n)$
Henderson and Pabis [12]	$MR = a \exp(-kt)$
Logarithmic [13]	$MR = a \exp(-kt) + c$
Midilli et al. [14]	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$
Two term [15]	$MR = a \exp(-k_1 t) + b \exp(-k_2 t)$

3. ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

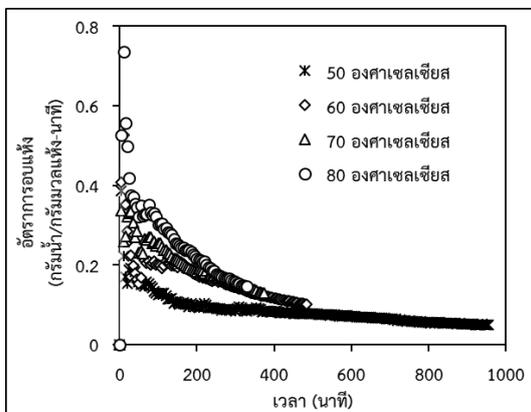
3.1 ผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลง ความชื้น

ผลการทดลองของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ในการอบแห้งในกระบวนการอบแห้งเมล็ดโกโก้มี ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 117 น้ำหนักแห้ง อุณหภูมิ อบแห้ง 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส ที่ความเร็ว ลม 0.05 เมตร/นาที การวางเมล็ด 1 ชั้น กำหนด ความชื้นสุดท้ายเมล็ดโกโก้ของการอบแห้งที่ร้อยละ 5 น้ำหนักแห้ง ดังรูปที่ 4 พบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิ สูงขึ้น (80 องศาเซลเซียส) ส่งผลให้อัตราส่วนความชื้น ในเมล็ดโกโก้ลดลงได้เร็วกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ (50 องศาเซลเซียส) สังเกตได้ว่าอัตราส่วนความชื้นมีค่า ลดลงอย่างต่อเนื่องตามเวลาในการอบแห้ง และการ เพิ่มอุณหภูมิในการอบแห้งเป็น 80 องศาเซลเซียส ทำให้เวลาในการอบแห้งลดลง เนื่องจากการเพิ่มความ ต่างระหว่างอุณหภูมิของอากาศร้อนกับอุณหภูมิ วัสดุมีมากเกิดการถ่ายเทความร้อนสู่น้ำในเนื้อวัสดุได้ดี จึงทำให้น้ำในเนื้อวัสดุเคลื่อนที่และระเหยได้เร็วขึ้น ส่งผลให้ช่วงเวลาการทำแห้งลดลง [16] ซึ่งการอบแห้ง ด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80 องศา เซลเซียส จะใช้เวลาในการอบแห้งประมาณ 940, 485, 375 และ 330 นาที ตามลำดับ



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาที่ความเร็วลม 0.05 เมตร/นาทื และการจัดวาง เมล็ดโกโก้ 1 ชั้น

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับความชื้น ดังรูปที่ 5 พบว่า ที่อุณหภูมิสูงสุด 80 องศาเซลเซียส จะมีอัตราการอบแห้งสูงที่สุด โดยเมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งเพิ่มสูงขึ้น วัสดุที่อบแห้งจะได้รับความร้อนเพิ่มมากขึ้นเป็นผลให้หน้าที่ผิวของวัสดุเกิดการระเหยได้มากขึ้น [17] ส่งผลให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น ในขณะที่ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งลดลง



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับเวลาที่ความเร็วลม 0.05 เมตร/นาทื และการจัดวางเมล็ดโกโก้ 1 ชั้น

3.2 ผลของอุณหภูมิต่อความสัมพันธ์พลังงานจำเพาะ

จากการอบแห้งเมล็ดโกโก้ด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนที่อุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วลม 0.05 เมตร/วินาที พบว่า

สภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งที่มีการใช้พลังงานจำเพาะต่ำสุด คือ การอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ดังตารางที่ 2 โดยมีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ 296 เมกะจูล/กิโลกรัมน้ำระเหย ซึ่งต่ำกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50, 70 และ 80 องศาเซลเซียส แม้จะใช้เวลาการอบแห้งที่นานกว่าแต่มีพลังงานจำเพาะต่ำกว่าอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เนื่องจากที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีการใช้เวลาอบแห้งที่สั้นกว่าจึงทำให้เมื่อพิจารณาค่าพลังงานจำเพาะที่มีปัจจัยขึ้นกับเวลาที่ใช้จึงมีค่าพลังงานจำเพาะที่ต่ำกว่าการใช้อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ดังนั้น จึงเลือกใช้การอบแห้งที่ 60 องศาเซลเซียส ในการดำเนินการศึกษาความเร็วลมในการอบแห้งเมล็ดโกโก้ต่อไป

ตารางที่ 2 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่อุณหภูมิอบแห้ง 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส

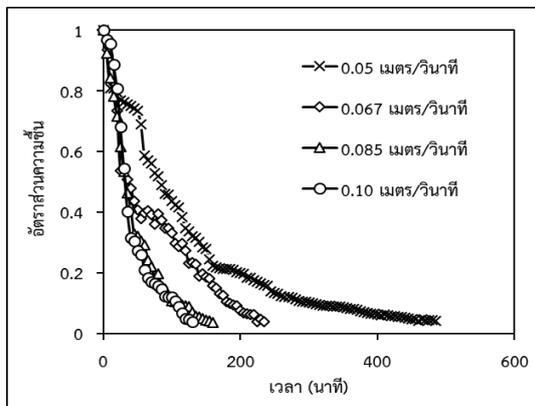
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาทื)	ปริมาณน้ำ (กิโลกรัม)	พลังงานจำเพาะ (เมกะจูล/กิโลกรัมน้ำระเหย)
50	940	0.0156±0.02	517±1.23
60	485	0.0169±0.03	296±2.36
70	375	0.0161±0.05	316±2.02
80	330	0.0149±0.09	389±0.85

3.3 ผลของความเร็วลมต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้น

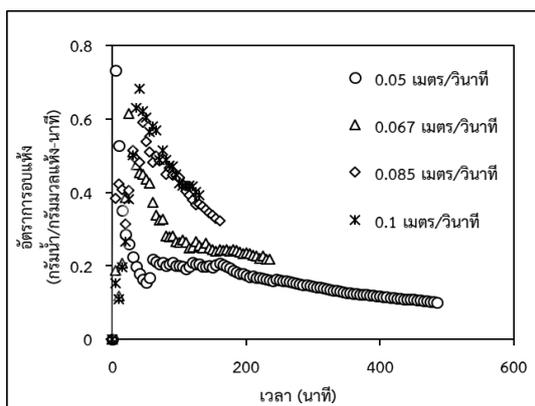
ผลการลดลงของอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งในกระบวนการอบแห้งเมล็ดโกโก้ อุณหภูมิอบแห้ง 60 องศาเซลเซียส การจัดวางเมล็ด 1 ชั้น ที่ความเร็วลม 0.05-0.1 เมตร/วินาที ดังรูปที่ 6 พบว่าการอบแห้งที่ความเร็วลมสูง (0.1 เมตร/วินาที) จะทำให้อัตราส่วนความชื้นลดลงได้เร็วกว่าความเร็วลมต่ำ (0.05 เมตร/วินาที) และใช้เวลาในการอบแห้งต่ำสุดเท่ากับ 130 นาที เนื่องจากการอบแห้งโดยใช้ความเร็วลมต่ำจะทำให้เกิดการกำจัดไอน้ำที่ระเหยออกจากผิว

เมล็ดโกโก้ได้ซ้ำ ส่งผลให้มีปริมาณความชื้นค้างอยู่ในเมล็ดได้สูงกว่า [18]

อัตราการอบแห้ง ในกระบวนการอบแห้งด้วยลมร้อน ดังรูปที่ 7 ผลการศึกษาพบว่า อัตราการอบแห้งจะมีค่าสูงเมื่อความเร็วลมสูงขึ้น โดยอัตราการอบแห้งจะมีค่าสูงในช่วงเริ่มกระบวนการอบแห้งและจะเริ่มลดลงหลังการอบแห้งที่ 60 นาที ซึ่งเป็นช่วงที่เกิดการถ่ายเทความร้อนที่ผิวของเมล็ดและอัตราการอบแห้งจะเริ่มลดลงในช่วงการถ่ายเทความร้อนภายในเนื้อเมล็ด เนื่องจากการเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุมายังผิวช้ากว่าการพาความชื้นจากผิวไปยังอากาศ ทำให้อัตราการอบแห้งลดลง [19]



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาที่อุณหภูมิอบแห้ง 60 องศาเซลเซียส และการจัดวางความหนาเมล็ดโกโก้ 1 ชั้น



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับเวลาที่อุณหภูมิอบแห้ง 60 องศาเซลเซียส และการจัดวางความหนาเมล็ดโกโก้ 1 ชั้น

3.4 ผลความเร็วลมต่อความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

จากการอบแห้งเมล็ดโกโก้ด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความหนาของการวางเมล็ดแบบ 1 ชั้น ที่ความเร็วลม 0.05, 0.067, 0.085 และ 0.1 เมตร/วินาที พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งที่มีการใช้พลังงานต่ำ คือ การอบแห้งที่ความเร็วลม 0.1 เมตร/วินาที ดังตารางที่ 3 โดยมีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ 74 เมกะจูล/กิโลกรัมน้ำระเหย ซึ่งมีความใกล้เคียงกับการอบแห้งที่ความเร็วลม 0.085 เมตร/วินาที ที่มีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ 82 เมกะจูล/กิโลกรัมน้ำระเหย และต่ำกว่าการอบแห้งที่ความเร็วลม 0.05 และ 0.067 เมตร/วินาที

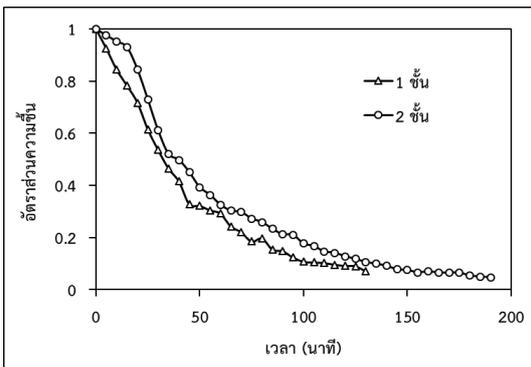
ตารางที่ 3 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่อุณหภูมิอบแห้ง 60 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 0.05, 0.067, 0.085 และ 0.1 เมตร/วินาที

ความเร็วลม (เมตร/วินาที)	เวลา (นาที)	ปริมาณน้ำ (กก.)	พลังงานจำเพาะ (เมกะจูล/กก. น้ำระเหย)
0.05	485	0.0169±0.03	296±1.52
0.067	235	0.0187±0.01	130±3.20
0.085	160	0.020±0.02	82±2.02
0.1	130	0.0185±0.06	74±1.02

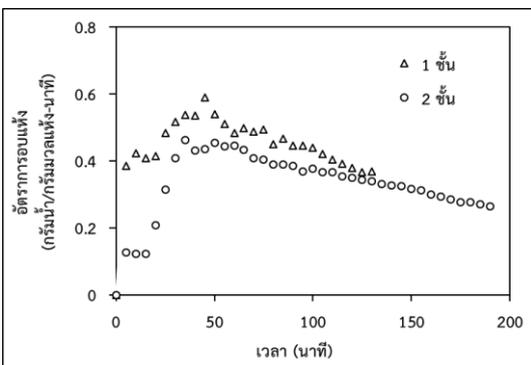
3.5 ผลของความหนาของเมล็ดโกโก้ต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราความชื้น

ผลการลดลงของอัตราส่วนความชื้นกับเวลาและอัตราการอบแห้งกับเวลาในการอบแห้งเมล็ดโกโก้ อุณหภูมิอบแห้ง 60 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วลม 0.1 เมตร/วินาที ที่ความหนาของการวางเมล็ดแบบ 1 ชั้น และ 2 ชั้น ดังรูปที่ 8 และ 9 พบว่า เมื่อเพิ่มความหนาของเมล็ดโกโก้ในการอบแห้งจาก 1 ชั้น เป็น

2 ชั้น อัตราส่วนความชื้นและอัตราการอบแห้งมีการเปลี่ยนแปลงที่สอดคล้องกัน โดยอัตราส่วนความชื้นของการวางเมล็ดแบบ 1 ชั้น จะมีค่าลดลงเร็วและมีอัตราการอบแห้งที่สูงกว่าการวางเมล็ด 2 ชั้น ซึ่งใช้เวลาในการอบแห้ง 130 นาที ซึ่งอัตราการอบแห้งจะมีค่าสูงในช่วงเริ่มกระบวนการอบแห้งที่ 50 นาที ซึ่งเป็นช่วงที่เกิดการถ่ายเทความร้อนที่ผิวของเมล็ดโกโก้และหลังจากนั้นอัตราการอบแห้งจะเริ่มลดลง เนื่องจากเกิดการเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุมายังผิวซ้ำ โดยการวางเมล็ดโกโก้ที่ไม่หนาเกินไปจะทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งต่ำกว่าการวางเมล็ดโกโก้หนา เนื่องจากความหนาของเมล็ดโกโก้จะทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนที่ช้า ทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งนาน



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาที่ความหนาของการวางเมล็ดโกโก้แบบ 1 ชั้น และ 2 ชั้น



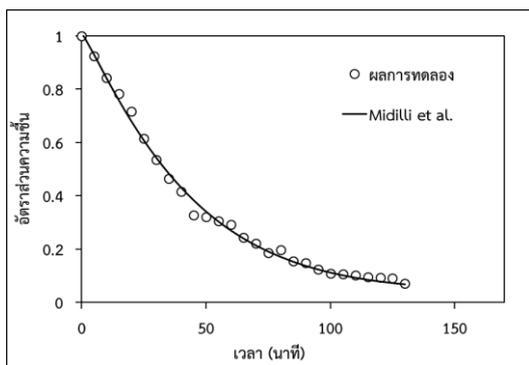
รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับเวลาที่ความหนาของการวางเมล็ดโกโก้แบบ 1 ชั้น และ 2 ชั้น

3.6 ผลของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งเมล็ดโกโก้

พิจารณาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งเมล็ดโกโก้ พบว่า สมการกึ่งทฤษฎีของ Midilli et al. ให้ค่า R^2 สูงสุด และมีค่า RMSE กับ SSE ต่ำสุด โดยมี R^2 มากกว่า 0.9964 ค่า RMSE เท่ากับ 0.01774 และค่า SSE เท่ากับ 0.000913 ดังตารางที่ 4 ซึ่งแสดงถึงความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ซึ่งเหมาะสมกับการใช้ทำนายค่าการอบแห้งเมล็ดโกโก้ จากค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สมการของ Midilli et al. เมื่อนำมาเขียนกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากผลการทดลองและค่าอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังรูปที่ 10 จะเห็นได้ว่าแบบจำลองที่ให้ผลการทำนายที่ดีที่สุด จะให้ค่าอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากผลการทดลองและจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าใกล้เคียงกันทุกเงื่อนไขการทดลอง ซึ่งสามารถทำนายผลการทดลองได้ดีที่สุดตลอดช่วงเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง

ตารางที่ 4 ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งแบบชั้นบาง

สมการ	ตัวแปร		
	R^2	RMSE	SSE
Page	0.9948	0.02066	0.01323
Henderson and Pabis	0.9952	0.01995	0.01234
Logarithmic	0.9954	0.01978	0.01174
Midilli et al.	0.9964	0.01774	0.00913
Two term	0.9954	0.01991	0.01189



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาอบแห้งจากการทดลองและแบบจำลองของ Midilli et al. ที่ 60 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 0.1 เมตร/วินาที และความหนาเมล็ดโกโก้ 1 ชั้น

4. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลอง พบว่าอุณหภูมิและความเร็วลมมีผลต่อเวลาและพลังงานในการอบแห้ง โดยอุณหภูมิและความเร็วลมที่เหมาะสมต่อการอบแห้งเมล็ดโกโก้คือที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 0.1 เมตร/วินาที ที่การจัดวางเมล็ดโกโก้ 1 ชั้น ซึ่งเป็นสถานะที่ใช้เวลาในการอบแห้งและมีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำ โดยมีเวลาการอบแห้ง 130 นาที และมีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเท่ากับ 74 เมกะจูล/กิโลกรัมน้ำระเหย สมการกึ่งทฤษฎีของ Midilli et al. เป็นสมการทำนายการลดลงของความชื้นเมล็ดโกโก้ที่เหมาะสมที่สุด ให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ที่สูงที่สุดและให้ค่า RMSE และ SSE ต่ำที่สุด โดยมี R^2 มากกว่า 0.9964 ค่า RMSE เท่ากับ 0.01774 และค่า SSE เท่ากับ 0.000913

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ที่สนับสนุนสถานที่การทำวิจัยในครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Chotin N. Cocoa, an alternative crop of the future. Technology Chaoban [Internet]. 2021 [cited 2021 Feb 9]. Available from : https://www.technologychaoban.com/bullet-news-today/article_171743. Accessed 21 February 2021. (in Thai)
- [2] Rakitikul W, Sirita J, Yodsuntorn P, Changruanngam T, Nanglae S. Chemical composition analysis to determine the identity of cocoa in Chiang Rai province. Journal of KPRU Science Mathemayics and Technology. 2022;1(1):19-34. (in Thai)
- [3] Maskan M. Microwave/ air and microwave finish drying of banana, Journal Food Engineering. 2000;44:71-8.
- [4] Asavarachan R. Drying agricultural products by microwave. Kasem Bundit Engineering Journal. 2021;1(2):31-42
- [5] Pérez-Marín J, Garrido-Mesa J, García-Sánchez F. Changes in color and phenolic content of cocoa seeds during roasting. Journal of agricultural and food chemistry. 2009;57(17): 7899-906.
- [6] Karam M.C, Petit J, Zimmer D, Baudelaire Djantou E, Scher J. Effects of drying and grinding in production of fruit and vegetable powders: A review. Journal of Food Engineering. 2016;188 :32-49.
- [7] Orikasa T, Wu L, Shiina T, Tagawa A. Drying characteristics of kiwifruit during hot air drying. Journal of Food Engineering. 2008;85:303-8.
- [8] Saniso E, Saudi F, Hanafee R. Moisture diffusivity coefficient specific energy consumption and specific moisture extraction rate of betel nut drying using combined thermal energy. Burapha Science Journal. 2012;17(1):142- 9.

- [9] Kar A. Gupta D.K. Air drying of osmosed button mushroom. *Journal of Food Science and Technology*. 2003;40(1):23-7.
- [10] Farla J, Blok K, Schipper L. Energy efficiency developments in the pulp and paper industry. *Energy Policy*. 1997;25:745–58.
- [11] Kumar P.G.D, Hebbar H.U, Ramesh M.N. Suitability of thin layer models for infrared-hot-air-drying of onion slices. *LWT – Food Science and Technology*. 2006;39:700-5.
- [12] Zhang Q, Litchfield J. An optimization of intermittent corn drying in a laboratory scale thin layer dryer. *Drying Technology*. 1991; 9(2):383- 95.
- [13] Togrul IT, Pehlivan D. Mathematical modelling of solar drying of apricots in thin layers. *Journal of Food Engineering*. 2002;55(3) :209-16.
- [14] Henderson S. Progress in developing the thin layer drying equation. *T ASAE*. 1974;17(6): 1167-8.
- [15] Midilli A, Kucuk H, Tapar Z. A new model for single layer drying. *Drying Technology*. 2002;20(7):1503-13.
- [16] Nagaya K, Li Y, Jin Z, Fukumuro M, Ando Y Akaishi A. Low-temperature desiccant based food drying system with airflow and temperature control. *Journal of Food Engineering*. 2006;75:74-7.
- [17] Barthakur N.N, Arnold N.P. Evaporation rate enhancement of water with air ions from a corona discharge. *International Journal of Biometeorology*. 1995;39:29-33.
- [18] Vongsawasdi P, Noppharatana M, Jiranuntakul W, Vinuntamalakul T. Sitiworapong S. Effect of temperatures and hot air velocities on physical and sensorial qualities of glass noodle. *Food Journal*. 2007;37(1):93-104.
- [19] Wannathon I. A study of temperatures and moist characteristics porous media in hot air dryer chamber using Computational fluid dynamics. Master thesis: Srinakharinwirot University; 2011