



การอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้โดยใช้การแผ่รังสีอินฟราเรดไกลร่วมกับอากาศร้อน

วีระ ศรีอริยะกุล*

สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมกรรมการทำความเย็นและการปรับอากาศ, ภาควิชาเทคโนโลยีเครื่องต้นกำลัง,
วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: weera.s@cit.kmutnb.ac.th

วันที่รับบทความ: 7 สิงหาคม 2564; วันที่ทบทวนบทความ: 5 ตุลาคม 2564; วันที่ตอบรับบทความ: 20 ตุลาคม 2564

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 13 ธันวาคม 2564

บทคัดย่อ: วัตถุประสงค์งานวิจัยนี้เพื่อศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดของการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้สุกด้วยเทคนิครังสีอินฟราเรดไกลร่วมกับอากาศร้อน และประเมินคุณภาพด้านสีและความแข็งของมะม่วงน้ำดอกไม้สุกหลังการอบแห้ง โดยอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้สุกที่มีความชื้นเริ่มต้น 332% Dry Basic และมีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ 16-20°Brix ด้วยเทคนิครังสีอินฟราเรดไกลร่วมกับอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 50, 60 และ 70°C และใช้ความเร็วอากาศร้อน 0.3 m/s จนกระทั่งมะม่วงน้ำดอกไม้สุกมีความชื้นสุดท้ายที่ 16% Dry Basic ผลการทดลองพบว่า ระยะเวลาอบแห้งที่ใช้มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้น โดยเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดของการอบแห้งนี้คือ การแช่มะม่วงน้ำดอกไม้สุกในสารยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล และการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้สุกที่อุณหภูมิ 70°C เป็นระยะเวลา 350 นาที จะได้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ 68.84 MJ/kg_{evap} ส่วนการทดสอบคุณภาพด้านสีและความแข็งของมะม่วงน้ำดอกไม้สุกอบแห้ง พบว่า มะม่วงน้ำดอกไม้สุกอบแห้งมีค่าความสว่าง และค่าสีเหลืองเพิ่มขึ้น แต่มีค่าสีแดงลดลง เมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้น และมะม่วงน้ำดอกไม้สุกอบแห้งมีค่าความแข็งเฉลี่ย 3.46 N นอกจากนี้ยังพบว่า สมการอบแห้งชั้นบางของ Modilli สามารถทำนายผลการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้สุกด้วยเทคนิครังสีอินฟราเรดไกลร่วมกับอากาศร้อนได้ดีที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ, ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย และค่าไคสแควร์เท่ากับ 0.9995, 0.0061 และ 4.15×10^{-5} ตามลำดับ

คำสำคัญ: การอบแห้ง; มะม่วงน้ำดอกไม้; การแผ่รังสีอินฟราเรดไกล



Drying of Nam Dok Mai Mango Using Far-Infrared Radiation in Combination with Hot-Air

Weera Sriariyakul*

Division of Refrigeration and Air Conditioning Engineering Technology,
Department of Power Engineering Technology, College of Industrial Technology, King Mongkut's
University of Technology North Bangkok

* Corresponding author, E-mail: weera.s@cit.kmutnb.ac.th

Received: 7 August 2021; Revised 5 October 2021; Accepted: 20 October 2021

Online Published: 13 December 2021

Abstract: This research aimed to study the optimal condition of ripe Nam Dok Mai mangoes drying using far-infrared radiation combined with hot air technique and evaluate the qualities in terms of color and hardness of dried ripe Nam Dok Mai mangoes. Ripe Nam Dok Mai mangoes were dried with an initial moisture content of 332% dry basis, and the total soluble solid of 16-20°Brix using far-infrared radiation combined with hot air technique at temperatures of 50, 60 and 70°C and a hot air velocity of 0.3 m/s until the ripe Nam Dok Mai mangoes had the final moisture content at 16% dry basis. From the experimental results, it was found that the drying time decreased when the drying temperature increased. The optimum condition for this drying was soaking the ripe Nam Dok Mai mangoes in a browning inhibitor and drying the ripe Nam Dok Mai mangoes at 70°C for 350 min to obtain a specific energy consumption of 68.84 MJ/kg_{evap}. From the color and hardness evaluation of dried ripe Nam Dok Mai mangoes, it was found that dried ripe Nam Dok Mai mangoes had higher lightness (L*-value) and yellowness (b*-value) but had lower redness (a*-value) when the drying temperature increased. In addition, the thin-layer drying equation of Modilli provided the best prediction of drying of ripe Nam Dok Mai mangoes using far-infrared radiation combined with hot air technique with the decision coefficient, the square root of the mean square error and the chi-squared of 0.9995, 0.0061 and 4.15x10⁻⁵, respectively.

Keywords: Drying; Nam Dok Mai Mango; Far-Infrared Radiation



1. บทนำ

มะม่วงน้ำดอกไม้ (Mangifera indica L. 'Nam Dork Mai') เป็นผลไม้เมืองร้อนที่มีประวัติการผลิต การเพาะปลูก และการค้ามายาวนานโดยส่วนใหญ่ มีแหล่งเพาะปลูกในพื้นที่เขตร้อนแถบประเทศเอเชีย เช่น ไทย เมียนมาร์ เวียดนาม อินเดีย และฟิลิปปินส์ เป็นต้น จากสถิติข้อมูลขององค์การอาหารและการเกษตรแห่งสหประชาชาติ (Food and Agriculture Organization of the United Nations : FAO) ปัจจุบันทั่วโลกมีจำนวน 103 ประเทศ ที่มีการเพาะปลูก มะม่วง ซึ่งมะม่วงน้ำดอกไม้ถือเป็นผลไม้ที่มี คุณประโยชน์และสรรพคุณที่หลากหลายเช่น สามารถ ช่วยสร้างภูมิคุ้มกันให้กับร่างกาย ดีต่อตับและไต และยังสามารถช่วยลดอาการคลื่นไส้ วิงเวียนศีรษะได้อีก ด้วยตลาดส่งออกที่สำคัญได้แก่ จีน เกาหลี ไต้หวัน ในปี 2564 เดือนมกราคม-มีนาคม ประเทศไทยส่งมี ปริมาณการส่งออกให้กับประเทศจีน 917 ตัน เพิ่มขึ้น ร้อยละ 78.92 มีมูลค่าการนำเข้า 2.02 ล้านเหรียญ สหรัฐฯ เพิ่มขึ้นร้อยละ 15.22 เมื่อเทียบกับช่วงเวลา เดียวกันปี 2563 [1]

การอบแห้งหรือกระบวนการลดความชื้น ส่วนมาก ใช้หลักการถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุ เพื่อไล่ ความชื้นออกโดยการระเหย เพื่อให้ผลิตภัณฑ์ที่ผ่าน กระบวนการอบแห้งเก็บรักษายาวนาน โดยทั่วไป สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การอบแห้งด้วยอากาศ ร้อน การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง การอบแห้ง ด้วยไมโครเวฟ การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด การ อบแห้งด้วยสุญญากาศ และการอบแห้งด้วยความ ร้อน ซึ่งการอบแห้งในแต่ละวิธีมีข้อดีข้อเสียที่แตกต่าง กันไป [2] การอบแห้งด้วยการแผ่รังสีอินฟราเรดไกล

(Far-infrared radiation: FIR) เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ได้รับ ความนิยมอย่างมาก เนื่องจากประหยัดพลังงาน โดย พลังงานจากการแผ่รังสีอินฟราเรดจะทำให้โมเลกุล ของน้ำที่อยู่ในผลิตภัณฑ์เกิดการสั่นสะเทือน ซึ่งการ สั่นสะเทือนดังกล่าวจะเกิดขึ้นในช่วง 25-100 μm [3] ทั้งนี้ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่จะมีน้ำเป็นส่วนประกอบ จำนวนมาก ดังนั้นการที่น้ำดูดกลืนรังสีอินฟราเรดไว้ จึงเป็นปัจจัยสำคัญในการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด และหากพิจารณา กลไกการสั่นสะเทือนของน้ำใน ผลิตภัณฑ์ที่ก่อให้เกิดพลังงานความร้อนก็จะพบว่า มักเกิดที่ความยาวคลื่นของการแผ่รังสีที่มากกว่า 25 μm ซึ่งอยู่ในช่วงรังสีอินฟราเรดไกล เนื่องจาก ความยาวคลื่นสูงทำให้สามารถทะลุผ่านเข้าไปใน ผลิตภัณฑ์ได้มากที่สุด และผลิตภัณฑ์ จะมี ส่วนประกอบหลักคือ น้ำ แป้ง และโปรตีน ซึ่ง ส่วนประกอบเหล่านี้มักจะดูดซับพลังงานการแผ่รังสี ของรังสีอินฟราเรดไกลได้ดี [4] ด้วยเหตุนี้จึงทำให้การ ใช้รังสีอินฟราเรดไกลหรือ FIR มีความเหมาะสมใน การอบแห้งผลิตภัณฑ์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้มี วัตถุประสงค์ศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดของการ อบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้สุกด้วยเทคนิครังสีอินฟราเรด ไกลร่วมกับอากาศร้อน เพื่อประหยัดพลังงาน โดย อบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้สุกที่มีความชื้นเริ่มต้น 332% Dry Basic และมีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ 16-20°Brix ด้วยเทคนิครังสีอินฟราเรดไกลร่วมกับ อากาศร้อนที่อุณหภูมิ 50, 60 และ 70°C และใช้ ความเร็วอากาศร้อน 0.3 m/s จนกระทั่งมะม่วง น้ำดอกไม้สุกมีความชื้นสุดท้ายที่ 16% Dry Basic และประเมินคุณภาพหลังการอบแห้ง ได้แก่ ค่าสีและ ความแข็งของมะม่วงน้ำดอกไม้สุกหลังการอบแห้ง



ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

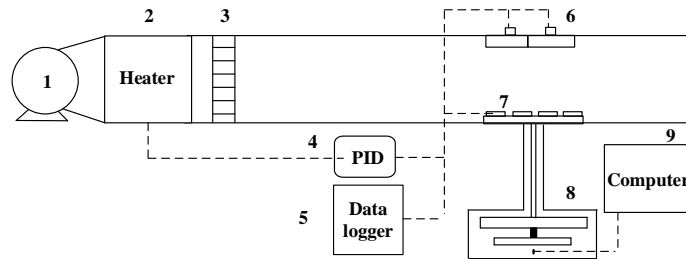
2. วิธีการดำเนินงานทดลอง

2.1 อุปกรณ์การทดลอง

รูปที่ 1 แสดงรายละเอียดชุดทดลอง ซึ่งประกอบด้วย 1.พัดลมแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางใบพัดชนิดโค้งหลัง โดยใช้มอเตอร์ขนาด 1.5 kW ความเร็วลมถูกควบคุมด้วยเครื่องควบคุมความเร็วรอบ (Fuji, FRN1.5E1S-4A, Tokyo, Japan) ที่ต่อกับมอเตอร์ แหล่งให้ความร้อนของห้องอบแห้งได้จากฮีตเตอร์ไฟฟ้า 5 ชุด (ชุดละ 2 kW) โดยมีท่อรังผึ้งใช้สำหรับปรับความเร็วลมให้สม่ำเสมอตลอดหน้าตัดท่อติดตั้งด้านหลังฮีตเตอร์ไฟฟ้าเครื่องทำความร้อนหลอดรังสีอินฟราเรดไกล (Infrapara, A-2-400, Selangor, Malaysia) ขนาด 0.4 kW จำนวน 2 หลอดติดตั้งไว้ด้านบนของห้องอบแห้ง เครื่องควบคุมอุณหภูมิแบบ PID (Shinko, JCS-33A-A/M, Osaka, Japan) ค่าความถูกต้อง $\pm 1^{\circ}\text{C}$ เครื่องบันทึกอุณหภูมิ (Yokogawa, FX-100, Tokyo, Japan) ใช้สำหรับบันทึกผลของอุณหภูมิของอากาศทางเข้าทางออกห้องอบแห้งและอุณหภูมิของวัสดุ ถูกวัดอย่างต่อเนื่องโดยใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K ค่าความถูกต้อง $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ เครื่องวัดความเร็วลมแบบ hot-wire (TSI, 8388-M-GB, Shoreview, MN) ค่าความถูกต้อง $\pm 0.02\text{ m/s}$ ใช้ในการวัดความเร็วของอากาศก่อนเข้าห้องอบแห้ง การเปลี่ยนแปลงมวลของวัสดุถูกวัดอย่างต่อเนื่องโดยใช้โวลต์เซลล์ (TedeA-Huntleigh, 1022, Taipei, Taiwan) ค่าความถูกต้อง $\pm 0.2\text{ g}$

2.2 วิธีการทดลอง

วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลองคือ มะม่วงน้ำดอกไม้สุก ทำการเลือกมะม่วงน้ำดอกไม้สุกที่มีความยาวประมาณ 15-18 cm น้ำหนักของผลประมาณ 350-500 g หลังจากนั้นนำมะม่วงน้ำดอกไม้มาล้างน้ำ เพื่อทำความสะอาดในเบื้องต้น และปอกเปลือกด้วยมีด ปอกผลไม้โดยจะปอกเปลือกลงไปพอประมาณ เพื่อลดความต้านทานการสูญเสียน้ำบริเวณผิวของมะม่วง ซึ่งจะส่งผลต่อระยะเวลาการอบแห้ง มะม่วงน้ำดอกไม้สุกที่นำมาทดลองจะวัดปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำโดยใช้เครื่อง Refractometer (TLEAD, RHB-32ATC, Shenzhen, China) ค่าความถูกต้อง $\pm 0.2\%$ ได้ค่าอยู่ในช่วง 16-20°Brix [5] หลังจากนั้นนำมะม่วงน้ำดอกไม้ที่เตรียมไว้มาหั่นให้มีขนาดความกว้าง 3 cm ยาว 3 cm และความหนา 1 cm และนำมาแช่ด้วยสารยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลโดยจะทำการเตรียมน้ำกลั่น 1 ลิตร ผสมด้วยกรดซิตริก กรดแอสคอร์บิก และแคลเซียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น (1%CA+1%AA+1%CC) ใช้เวลาแช่ทั้งหมด 5 นาที เช่นเดียวกับกับวิธีของ Raikham *et al.* [6] หลังจากนั้นนำมะม่วงที่แช่มาขึ้นมาวางบนตะแกรงเพื่อให้หน้าที่เกาะบริเวณชั้นมะม่วงลดลงเป็นเวลา 10 นาที แล้วนำขึ้นมะม่วงบางส่วนมาหาความชื้นเริ่มต้นก่อนการอบแห้งโดยการอบแห้งในตามมาตรฐาน AOAC [7] สำหรับผลไม้แห้ง ที่อุณหภูมิอบแห้ง $\pm 70^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 6 ชั่วโมง อบแห้งภายใต้ความดันสุญญากาศที่ 13.3 kPa โดยใช้ตัวอย่าง 5 g Raikham *et al.*, [6] หลังจากนั้นนำขึ้นมะม่วงใส่ถาด เพื่ออบแห้งปริมาณ 70 g ที่มีความชื้นเริ่มต้นของมะม่วง 332 % Dry Basic ทำการอบแห้งจนกระทั่ง



รูปที่ 1 แผนภูมิชุดทดสอบการอบแห้งแบบรังสีอินฟราเรดไกลร่วมกับอากาศร้อนประกอบด้วย (1) พัดลม (2) ฮีตเตอร์ไฟฟ้า (3) ท่อรังผึ้ง (4) ชุดควบคุมอุณหภูมิ (5) เครื่องบันทึกอุณหภูมิ (6) หลอดรังสีอินฟราเรดไกล (7) วัสดุ (8) อุปกรณ์วัดน้ำหนัก และ (9) คอมพิวเตอร์

ความชื้นสุดท้าย 16 % Dry Basic โดยเงื่อนไขการทดลองคือ แบบไม่แช่สารยับยั้งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล (Untreated) และแบบแช่สารยับยั้งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล (Treated) และอุณหภูมิอบแห้งที่ 50, 60 และ 70°C ในระหว่างการทดลองมีการบันทึกข้อมูลการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักและอุณหภูมิมอบแห้งทุกๆ 10 นาที

2.3 จลนพลศาสตร์การอบแห้ง

การศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งแบบรังสีอินฟราเรดไกลร่วมกับอากาศร้อนของมะม่วงน้ำดอกไม้สุกที่ความชื้นเริ่มต้น 332 % Dry Basic จนกระทั่งความชื้นสุดท้าย 16 % Dry Basic โดยความชื้นของผลิตภัณฑ์คำนวณได้จากสมการที่ (1)

การวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งนอกจากค่าความชื้น ยังมีค่าที่บอกถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงมวลของน้ำในวัสดุเทียบกับความชื้นเริ่มต้น เมื่อเวลาการอบแห้งดำเนินไปตลอดเวลาใดๆ คือ อัตราส่วนความชื้น (Moisture Ratio, MR) โดยอัตราส่วนความชื้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2)

$$MC = \frac{W_w - W_d}{W_d} \times 100\% \quad (1)$$

เมื่อ MC คือ ความชื้นมาตรฐานแห้งของวัสดุ (% Dry Basic)
 W_w คือ มวลของวัสดุชื้น (g)
 W_d คือ มวลของวัสดุแห้ง (g)

$$MR = \frac{M_i - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} \times 100\% \quad (2)$$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น
 M_i คือ ความชื้นฐานแห้งที่เวลาใดๆ (% Dry Basic)
 M_0 คือ ความชื้นฐานแห้งที่เวลาเริ่มต้น (% Dry Basic)
 M_{eq} คือ ความชื้นสมดุลของวัสดุ (% Dry Basic)



2.4 การวิเคราะห์คุณภาพหลังการอบแห้ง

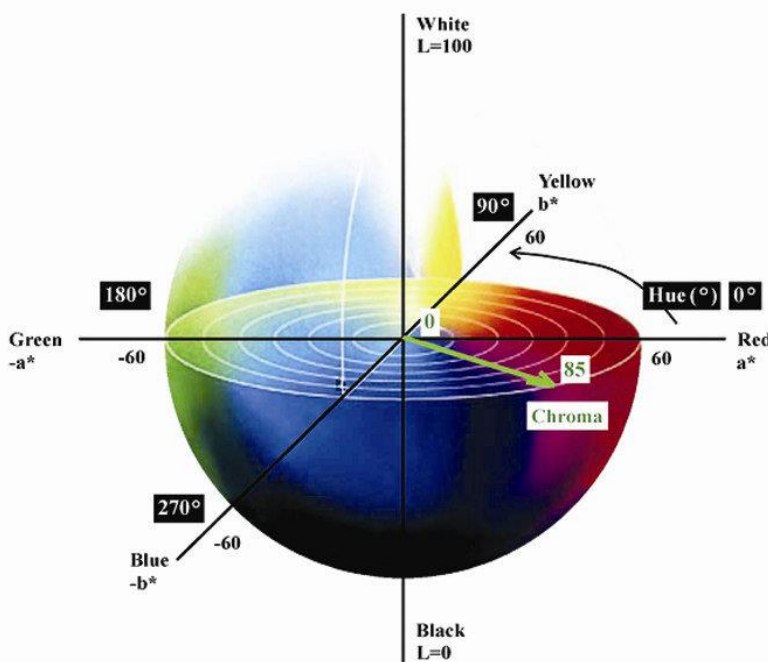
ค่าสีของมะม่วงน้ำดอกไม้หลังการอบแห้งสามารถตรวจได้จากเครื่องวัดสีอาหาร Hunter Lab รุ่น ColorFlex การวัดจะใช้ระบบการวัดสีของ CIE (Commission International de l'Eclairage) โดยค่าของสีจะแสดงในรูปแบบของตัวแปร L^* , a^* และ b^* โดยค่าตัวแปร L^* มีค่าเป็นหนึ่งในร้อยแสดงถึงสีขาว ค่าตัวแปร a^* แสดงค่าสีแดง ($+a^*$) หรือสีเขียว ($-a^*$) และค่าตัวแปร b^* แสดงค่าสีเหลือง ($+b^*$) หรือสีน้ำเงิน ($-b^*$) ดังแสดงในรูปที่ 2 ส่วนค่าคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสความแข็ง ทำได้โดยใช้เครื่อง Texture Analyser รุ่น TA.XT.Plus (Stable Microsystems Texture Technologies Inc., UK)

2.5 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC)

คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาณพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งต่อปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุอบแห้ง [9] โดยสามารถคำนวณได้จากสมการ (3)

$$SEC = \frac{E_{heater} + E_{FIR}}{M_W} \quad (3)$$

- เมื่อ SEC คือ ค่าพลังงานจำเพาะที่ใช้ระเหยน้ำ (MJ/kg_{evap})
- E_{heater} คือ พลังงานที่ใช้กับฮีตเตอร์ (MJ)
- E_{FIR} คือ พลังงานที่ใช้กับหลอดรังสีอินฟราเรดไกล (MJ)
- M_W คือ ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุ (kg_{evap})



รูปที่ 2 ระบบการวัดสีของ CIE [8]



2.6 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งเป็นการจำลองการถ่ายเทความร้อนและมวลในระหว่างการอบแห้งของวัสดุ จากการสำรวจเอกสารรายงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นิยมใช้ในการศึกษาอาหารหรือวัสดุชีวภาพจำพวกผักและผลไม้ คือ แบบจำลองคณิตศาสตร์ในรูปเอมไพริคัล (Empirical Model) ซึ่งในการศึกษานี้จะคัดเลือกมาทำการศึกษจำนวน 10 แบบจำลอง ดังนี้ แบบจำลองคณิตศาสตร์ของ Newton, Page, Modified Page, Henderson and Pabis, Modilli, Logarithmic, Wang and Singh, Verma et al., Modified Henderson and Pabis, และ Jena and Das [10-16]

การวิเคราะห์หาสมการอบแห้งซึ่งบางที่เหมาะสมสามารถทำได้โดยนำค่าอัตราส่วนความชื้นที่เวลาใดๆ ทำนายค่าความชื้น ซึ่งอยู่ในรูปสมการแบบกึ่งทฤษฎี (Semi Theoretical Drying Equation) ซึ่งการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสมการอบแห้งซึ่งบางใช้เทคนิคการวิเคราะห์ความถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Non-linear regression) มีดัชนีบ่งชี้ความสามารถในการทำนายของสมการ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2) และค่ารากที่สองของความคลื่อนเฉลี่ย (Root mean square error, RMSE) และค่าไคสแควร์ (Chi-square, χ^2) [10-16] ดังสมการที่ (4)-(5) โดยสมการที่ให้ค่า R^2 สูงที่สุด และค่า RMSE และ χ^2 ต่ำที่สุด จะเป็นสมการที่เหมาะสมที่สุดสำหรับจลนพลศาสตร์การอบแห้ง

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \left[\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2 \right]} \quad (4)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N-p} \quad (5)$$

เมื่อ $MR_{exp,i}$ คือ อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลอง

$MR_{pre,i}$ คือ อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการคำนวณ

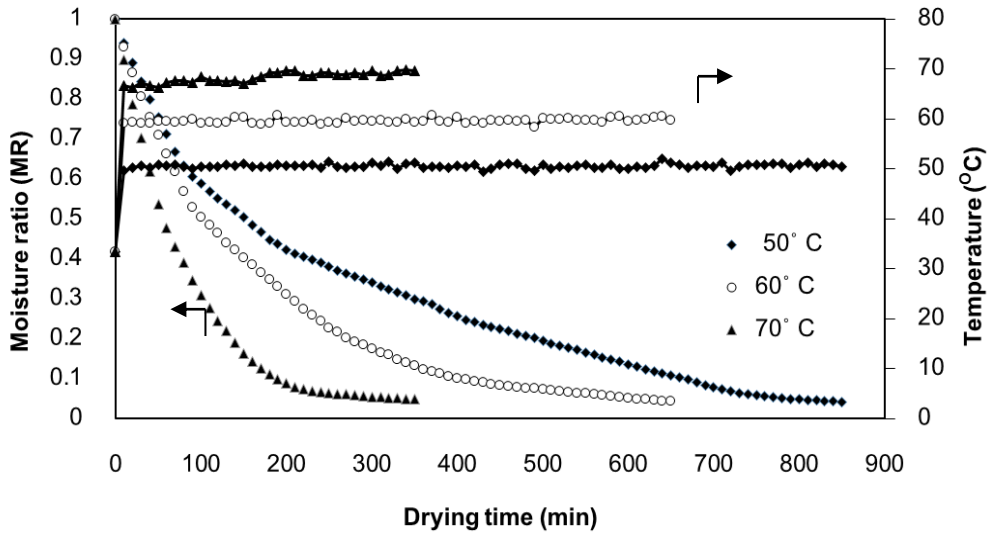
N คือ จำนวนข้อมูลในการทดลอง

p คือ จำนวนพารามิเตอร์ในแต่ละสมการ

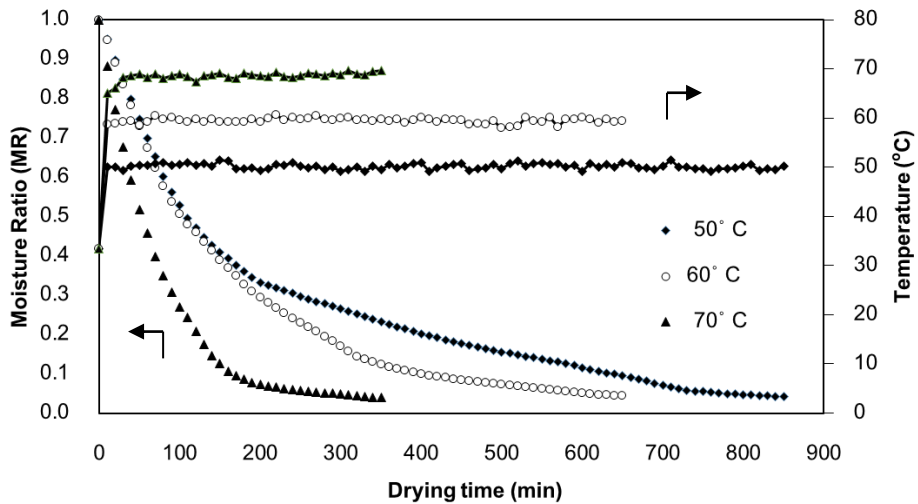
3 ผลการทดลองและการอภิปรายผล

3.1 จลนศาสตร์การอบแห้ง

รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นและอุณหภูมิของมะม่วงน้ำดอกไม้กับเวลากรณีไม่แช่สารยับยั้งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล โดยใช้อุณหภูมิการอบแห้ง 50, 60 และ 70°C ความเร็วลม 0.3 m/s พบว่า เมื่ออุณหภูมิการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70°C จะทำให้อัตราส่วนความชื้นลดลงเร็ว และใช้ระยะเวลาการอบแห้งสั้นสุดที่ 350 นาที เมื่อเปรียบเทียบกับที่อุณหภูมิ 50°C และ 60°C ใช้เวลาการอบแห้ง 850 นาที และ 650 นาที ตามลำดับเนื่องจากอุณหภูมิการอบแห้งที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิผิวของวัสดุและภายในเนื้อวัสดุมากขึ้น ทำให้การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sriariyakul et al., [17] และ Srithai [18] สำหรับกรณีแช่สารยับยั้งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล ดังรูปที่ 4 เปรียบเทียบกับกรณีไม่แช่สารยับยั้งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่อุณหภูมิเดียวกัน ไม่มีผลต่ออัตราส่วนความชื้นและระยะเวลาการอบแห้ง



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นและอุณหภูมิของมะม่วงน้ำดอกไม้กับเวลา กรณีไม่แช่สารยับยั้งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นและอุณหภูมิของมะม่วงน้ำดอกไม้กับเวลา กรณีแช่สารยับยั้งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล



3.2 คุณภาพหลังการอบแห้ง

ตารางที่ 1 แสดงค่าสีของมะม่วงหลังการอบแห้งแบบรังสีอินฟราเรดไกลร่วมกับอากาศร้อนด้วยการไม่แช่สารยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล (Untreated) และแช่สารยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล (Treated) ที่อุณหภูมิอบแห้ง 50, 60 และ 70°C พบว่ามะม่วงอบแห้งที่อุณหภูมิ 70°C ผ่านแช่สารยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล (Treated) เงื่อนไข (1%CA+1%AA+1%CC) แนวนอนให้ค่าความสว่าง (L*) และสีเหลือง (b*) เพิ่มขึ้น ค่าสีแดง (a*) ลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Sriithai [18] เนื่องจากการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำทำให้ช่วยลดระยะเวลาการอบแห้งและกรดซิตริกและกรดแอสคอร์บิก สามารถช่วยลดการเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่มีเอนไซม์เกี่ยวข้องกับบริเวณที่ผิวของมะม่วงจึงส่งผลให้ชั้นมะม่วงหลังจากการอบแห้งมีค่าความสว่างเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 2 แสดงค่าคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสความแข็งของมะม่วงน้ำดอกไม้หลังอบแห้งแบบรังสีอินฟราเรดไกลร่วมกับอากาศร้อนด้วยการไม่แช่สารยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล (Untreated) และแช่สารยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล (Treated) ที่อุณหภูมิอบแห้ง 50, 60 และ 70°C จะเห็นได้ว่ากรณีแช่สารยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล (Treated) อบแห้งที่อุณหภูมิ 70°C มีแนวโน้มทำให้ค่าความแข็ง 3.46 N ซึ่งน้อยกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 และ 60°C ที่ความแข็ง 10.64 และ 7.51 N ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องมาจากการใช้ระยะเวลาการอบแห้งสั้นทำให้ตัวอย่างหดตัวน้อยลง ซึ่งส่งผลให้ตัวอย่างมีความแข็งน้อยลง สำหรับการแช่สารยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล (Treated) มีผลต่อความแข็งของมะม่วงเล็กน้อย

ตารางที่ 1 ค่าสีของมะม่วงน้ำดอกไม้หลังอบแห้ง ที่อุณหภูมิจากการอบแห้งแบบต่างๆ

	Condition					
	Hot-air Temp (°C)	FIR Temp (°C)	Drying Time (min)	L*	a*	b*
Untreated	50	50	850	37.44	9.54	22.03
	60	60	650	36.14	7.17	23.17
	70	70	350	42.15	7.51	25.65
Treated	50	50	850	59.81	14.45	47.84
	60	60	650	55.81	13.36	47.52
	70	70	350	60.26	11.75	54.80



ตารางที่ 2 ค่าคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสความแข็งของมะม่วงน้ำดอกไม้หลังอบแห้ง ที่อุณหภูมิการอบแห้งแบบต่างๆ

	Condition			
	Hot-air Temp (°C)	FIR Temp (°C)	Drying Time (min)	Hardness (N)
Untreated	50	50	850	12.89
	60	60	650	8.69
	70	70	350	4.57
Treated	50	50	850	10.64
	60	60	650	7.51
	70	70	350	3.46

3.3 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC)

ตารางที่ 3 แสดงค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของมะม่วงน้ำดอกไม้หลังอบแห้งแบบรังสีอินฟราเรดไกลร่วมกับอากาศร้อนด้วยการไม่แช่สารยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล (Untreated) และแช่สารยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล (Treated) ที่อุณหภูมิอบแห้ง 50, 60 และ 70°C พบว่ากรณีแช่สารยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล (Treated) อบแห้งที่อุณหภูมิ 70°C มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) เท่ากับ 68.84 MJ/kg_{evap} ซึ่งต่ำกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 และ 60°C ที่ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) เท่ากับ 201.59 และ 131.14 MJ/kg_{evap} ตามลำดับ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Sriariyakul *et. al.*, [17] และ Srithai [18] เนื่องจากการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง ทำให้อัตราการอบแห้ง

เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาในการอบแห้งลดลง เมื่อนำมาคำนวณค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) จึงทำให้ค่าลดลง

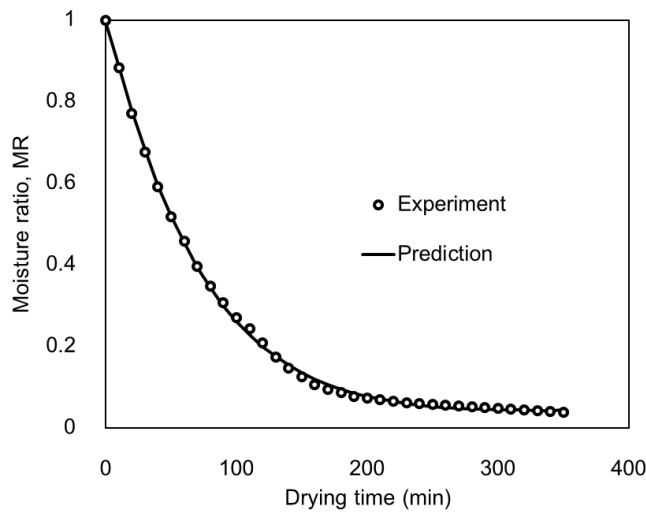
3.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบต่างๆ จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาการอบแห้ง จากการทดลองเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบต่างๆ ดังตารางที่ 4 พบว่าแบบจำลอง Modilli มีค่า R² สูงที่สุด คือ 0.9995 ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีความแม่นยำและสามารถใช้ทำนายผลการอบแห้ง ค่า RMSE มีค่าเท่ากับ 0.0061 และค่า χ^2 มีค่าเท่ากับ 4.15x10⁻⁵ น้อยที่สุด เมื่อนำแบบจำลองมาสร้างกราฟดังแสดงในรูปที่ 5 จะเห็นได้ว่าแบบจำลอง Modilli มีช่วงการกระจายข้อมูลน้อยมาก แสดงให้เห็นว่าแบบจำลอง Modilli มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด และสามารถใช้อธิบายผลการอบแห้งได้ดีที่สุด



ตารางที่ 3 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของมะม่วงน้ำดอกไม้หลังอบแห้ง ที่อุณหภูมิการอบแห้งแบบต่างๆ

	Condition			SEC (MJ/kg _{evap})
	Hot-air Temp (°C)	FIR Temp (°C)	Drying Time (min)	
Untreated	50	50	850	203.82
	60	60	650	133.26
	70	70	350	76.31
Treated	50	50	850	201.59
	60	60	650	131.14
	70	70	350	68.84



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาการอบแห้งจากผลการทดลองเทียบกับแบบจำลอง Modilli



ตารางที่ 4 การวิเคราะห์ความแม่นยำทางสถิติของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

Model	k	n	a	b	c	g	h	R ²	RMSE	χ^2
1. Newton										
MR=exp(-kt)	0.0130	-	-	-	-	-	-	0.9972	0.0162	2.68x10 ⁻⁴
2. Page										
MR=exp(-kt ⁿ)	0.0148	0.9713	-	-	-	-	-	0.9969	0.0157	2.59x10 ⁻⁴
3. Modified Page										
MR=exp((-kt) ⁿ)	0.0173	0.7520	-	-	-	-	-	0.9972	0.0162	2.76x10 ⁻⁴
4. Henderson and Pabis										
MR=aexp(-kt)	0.0130	-	0.9978	-	-	-	-	0.9972	0.0161	2.76x10 ⁻⁴
5. Modilli										
MR=aexp(-kt ⁿ)+bt	0.0102	1.0649	0.9945	0.0001	-	-	-	0.9995	0.0061	4.15x10 ⁻⁵
6. Logarithmic										
MR=aexp(-kt)+c	0.0143	-	0.9893	-	0.0259	-	-	0.9987	0.0094	9.61x10 ⁻⁵
7. Wang and Singh										
MR=1+at+bt ²	-	-	-0.0064	0.0000	-	-	-	0.9214	0.1176	1.46x10 ⁻²
8. Verma et al.										
MR=aexp(-kt)+(1-a)exp(-gt)	0.0140	-	0.9761	-	-	0.00001	-	0.9986	0.0101	1.11x10 ⁻⁴
9. Modified Henderson and Pabis										
MR=aexp(-kt)+bexp(-gt)+cexp(-ht)	0.0143	-	0.9893	0.0000	0.0259	0.0060	0.0001	0.9987	0.0095	1.07x10 ⁻⁴
10. Jena and Das										
MR=aexp(-kt+bt ^{1/2} +c)	0.0130	-	0.5975	0.0000	0.5128	-	-	0.9972	0.0161	2.93x10 ⁻⁴



4. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดของการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้สุกด้วยเทคนิครังสีอินฟราเรด ไกลร่วมกับอากาศร้อนและประเมินคุณภาพด้านสีและความแข็งของมะม่วงน้ำดอกไม้สุกหลังการอบแห้งพบว่า การแช่มะม่วงน้ำดอกไม้สุกในสารยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล และการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้สุกที่อุณหภูมิ 70°C เป็นระยะเวลา 350 นาที จะได้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ 68.84 MJ/kg_{evap} ส่วนการทดสอบคุณภาพด้านสีและความแข็งของมะม่วงน้ำดอกไม้สุกอบแห้ง พบว่า มะม่วงน้ำดอกไม้สุกอบแห้งมีค่าความสว่าง และค่าสีเหลืองเพิ่มขึ้น แต่มีค่าสีแดงลดลง เมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้น และมะม่วงน้ำดอกไม้สุกอบแห้งมีค่าความแข็งเฉลี่ย 3.46 N และนอกจากนี้ยังพบว่า สมการอบแห้งชั้นบางของ Modilli สามารถทำนายผลการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้สุกด้วยการแผ่รังสีอินฟราเรดระยะไกลร่วมกับอากาศร้อนได้ดีที่สุด โดยมีค่า R² สูงที่สุด คือ 0.9995 ค่า RMSE มีค่าเท่ากับ 0.0061 และค่า χ^2 มีค่าเท่ากับ 4.15×10^{-5} น้อยที่สุด

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ตามสัญญาเลขที่ Res-CIT0335/2021

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] www.ditp.go.th/ditp_web61/article_sub_view.php?filename=contents_attach/732720/732720.pdf&title=732720&cate=414&d=0. (Accessed on 6 July 2021)
- [2] A.S. Mujumdar, Handbook of industrial drying, 3rd Ed., Marcel Dekker., NY, 1995, 567-588.
- [3] N. Sakai and T. Hanzawa, Applications and advances in far-Infrared heating in Japan, Trends in Food Science & Technology, 1994, 5(11), 357-362.
- [4] C. Sandu, Infrared radiative drying in food engineering a process analysis, Biotechnology Progress, 1986, 2(3),109-119.
- [5] N. Harnkamsujarit and C. Sanguansri, Influence of collapsed structure on stability of β -carotene in freeze-dried mangoes, Food Research International, 2011, 44(10), 3188-3194.
- [6] C. Raikham, S. Prachayawarakorn, A. Nathakaranakule and S. Soponronnarit, Influences of pretreatment and drying process including fluidized bed puffing on quality attributes and microstructural changes of banana slices, Drying Technology, 2015, 33(8), 915-925.
- [7] AOAC, Official methods of analysis, 16th ed, Association of Official Agricultural Chemists, Washington, DC, 1995.



- [8] www.ptallinstrument.com/article/5/%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B8%A7%E0%B8%B1%E0%B8%94%E0%B8%AA%E0%B8%B5-color-measurement (Accessed on 6 July 2021)
- [9] S. Jaturonglumlert, J. Varith and T. Kiatsiroat, Influence of drying method on drying kinetics and qualities of longan fruit leather, Maejo International Journal of Science and Technology, 2015, 9(1), 54-63. (in Thai)
- [10] M. Younis, D. Abdelkarim and AZ. El-Abdein, Kinetics and mathematical modeling of infrared thin-layer drying of garlic slices, Saudi Journal of Biological Sciences, 2018, 25(2), 332-338.
- [11] U. Teeboonma and S. Jongjam, Ginger drying using infrared-vacuum technique, Burapha Science Journal, 2010, 15, 76-86. (In Thai)
- [12] S.J. Babalis, E. Papanicolaou, N. Kyriakis and VG. Belessiotis, Evaluation of thin-layer drying models for describing drying kinetics of figs (*Ficus carica*), Journal of Food Engineering, 2006, 75, 205-214.
- [13] V. Demir, T. Gunhan and A.K. Yagcioglu, Mathematical modelling of convection drying of green table olives, Biosystems Engineering, 2007, 98(1), 47-53.
- [14] K. Witinaatakit and S. Jaekhom, Mathematical modeling of combined infrared and vacuum drying of galangals, Kasem Bundit Engineering Journal, 2019, 9(3), 29-44. (In Thai)
- [15] K. Mugodo and TS. Workneh, The kinetics of thin-layer drying and modelling for mango slices and the influence of differing hot-air drying methods on quality, Heliyon, 2021, 7, 1-14.
- [16] T. Sarkar, SK. Saha, M. Saluddin, and R. Chakraborty, Drying kinetics, fourier-transform infrared spectroscopy analysis and sensory evaluation of sun, hot-air, microwave and freeze dried mango leather, Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences, 2021, 10, 1-7.
- [17] W. Sriariyakul, T. Swasdisevi, S. Devahastin, and S. Soponronnarit, Drying of aloe vera puree using hot air in combination with far-infrared radiation and high-voltage electric field: Drying kinetics, energy consumption and product quality evaluation, Food and Bioproducts Processing, 2016, 100, 391-400.
- [18] S. Sriithai, The Development of Natural Dried Mango Products without Sugar Added Solvent Using Step-Down Temperature Technique in Conjunction with Microwave and Hot Air Belt Conveyor Drying, Thesis, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Thailand. 2016. (in Thai)