



ศึกษาแบบจำลองและผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีกายภาพของซิงดองแช่อิ่มอบแห้ง Drying Modelling and Influence of Temperature on Physicochemical Properties of Soft Dried Pickled Ginger

รัชฎา แย้มสรวล¹, ขนิษฐา รุตรัตนมงคล¹ และฤทธิชัย อัสวราชันย์^{2*}

Ratchada Yamsuan¹, Khanitta Ruttarattanamongkol¹ and Rittichai Assavarachan^{2*}

¹ภาควิชาอุตสาหกรรมเกษตร, คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยนเรศวร พิษณุโลก, 65000

²หน่วยวิจัยเทคโนโลยีการอบแห้งและการลดความชื้น คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่, 50290

*Corresponding author: Tel: +66-8-5704-9146, Fax: +66-34-351-896, E-mail: rittichai.assavarachan@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และผลกระทบของอุณหภูมิในการอบแห้งของซิงดองแช่อิ่มด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดขนาดห้องปฏิบัติการ โดยอบแห้งซิงดองแช่อิ่มจากความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 70.56 ± 0.58 g_{water}/g_{dry matter} จนเหลือความชื้น 0.17 ± 0.03 g_{water}/g_{dry matter} ที่อุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80 °C ความเร็วลมคงที่ที่ 0.4 m s^{-1} ซึ่งใช้เวลาในการอบแห้ง 13.00, 10.58, 9.08 และ 6.83 h ตามลำดับ การวิเคราะห์แบบถดถอยเป็นวิธีที่ใช้หาความเหมาะสมของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้ง 5 แบบจำลอง ได้แก่ Newton, Henderson and Pabis, Page, Modified Page และ Midilli et al. ผลการศึกษาพบว่า แบบจำลองของ Midilli et al สามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของซิงดองแช่อิ่มอบแห้งได้เหมาะสมที่สุด เนื่องจากให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ($R^2=0.9967-0.9996$) สูงที่สุด ในขณะที่ให้ค่าไคกำลังสอง ($\chi^2=0.0000-0.0001$) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE=0.0033-0.0099) มีค่าต่ำสุด และจากการศึกษาผลอุณหภูมิในการอบแห้งต่อการเปลี่ยนแปลงสีของซิงดองแช่อิ่มอบแห้ง ด้วยค่าพารามิเตอร์ในระบบ CIE- L^*, a^*, b^* และในระบบ Munsell (chroma, hue angle) ค่าความแตกต่างสีรวม (ΔE^*) ค่าดัชนีการเป็นสีน้ำตาล (BI) และปริมาณน้ำตาลทั้งหมด พบว่าที่ซิงดองแช่อิ่มที่อบแห้งที่ 80 °C จะทำให้ผลิตภัณฑ์มีสีคล้ำกว่าเมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิต่ำกว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการอบแห้งส่งผลให้ค่าดัชนีการเป็นสีน้ำตาล (BI) และปริมาณน้ำตาลทั้งหมดเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$)

คำสำคัญ: ซิงดองแช่อิ่มอบแห้ง การอบแห้งด้วยลมร้อน แบบจำลองการอบแห้งทางคณิตศาสตร์

Abstract

This study aimed to determine the Mathematical modeling and study the influence of drying temperatures of soft dried pickled ginger underwent the laboratory-scaled-tray drying system. The initial moisture content of 70.56 ± 0.58 g_{water}/g_{dry matter} to the final moisture content of 0.17 ± 0.03 g_{water}/g_{dry matter} on drying temperatures of 50, 60, 70 and 80°C with a constant air velocity of 0.4 m/s was 13.00, 10.58, 9.08 and 6.83 h, respectively. Nonlinear least square method is statistical analysis of drying model and the obtained experimental data was applied to five mathematical models (Newton, Henderson and Pabis, Page, Modified Page and Midilli et al.) and the model with the best fit was determined. The results showed that the Midilli et al. model could describe the drying characteristics with the most satisfactory level because it statistical results showed the highest coefficient of determination (0.9967-0.9996), the least chi-square (0.0000-0.0001), and the lowest root mean square error (0.0033-0.0099). The results of the effect of temperature on color changes of soft dried pickled ginger in term of CIE- L^*, a^*, b^* and Munsell systems (Chroma, Hue angle) Total color difference (ΔE^*), Browning index (BI) and Total Sugar were found that the most physical change in color of dried pickled ginger was the drying process temperature at 80 °C. These was because an increase of the brown color. The color change was significantly ($P < 0.05$) increased when increasing the drying temperature drying, browning index (BI) and total sugar.

1 บทนำ

ขิง (*Zingiber officinale* Roscoe) เป็นพืชล้มลุก ส่วนที่ใช้รับประทาน คือเหง้าใต้ดิน มีเปลือกนอกสีน้ำตาลแกมเหลือง เนื้อในสีขาวนวล เหง้าแก่สด มีกลิ่น หอม รสเผ็ดร้อน ปัจจุบันขิงถูกนำมาแปรรูปเพื่อจุดประสงค์ทางการค้าโดยผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการที่เหมาะสมเพื่อให้่ายต่อการเก็บรักษา เช่น ดอง แช่อิ่ม และอบแห้ง เป็นต้น เพื่อช่วยยืดอายุการเก็บรักษาและยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ โดยคำนึงถึงลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ (อำไพศักดิ์ และศักดิ์ชัย, 2553) การอบแห้งเป็นกระบวนการที่สำคัญในการถนอมผลิตภัณฑ์ให้มีอายุการเก็บรักษาที่ยาวนานขึ้น โดยการลดความชื้นหรือปริมาณน้ำอิสระในผลิตภัณฑ์ซึ่งมีผลต่อจุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุทำให้ผลิตภัณฑ์เน่าเสียไม่สามารถเจริญได้ รวมทั้งยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ หรือชะลอปฏิกิริยาต่างๆ ทั้งทางเคมี และทางชีวเคมี โดยทั่วไปการอบแห้งแบบดั้งเดิมมักใช้การอบแห้งด้วยลมร้อนเนื่องจากเป็นวิธีสะดวกและไม่ซับซ้อน

ในปัจจุบันมีการเพาะปลูกขิงเป็นจำนวนมากทำให้เกิดปัญหาผลผลิตล้นตลาด และมักประสบกับปัญหาการราคาตกต่ำ ดังนั้นจึงยืดอายุการเก็บรักษาโดยการดองด้วยเกลือเพื่อให้่ายต่อการเก็บรักษาและการใช้ประโยชน์ ในขั้นตอนกระบวนการตัดแต่งมีขิงบางส่วนที่ไม่ได้มาตรฐานเหลือเป็นจำนวนมากจึงได้นำขิงดองที่เหลือจากกระบวนการดังกล่าวมาเพิ่มมูลค่าด้วยการผลิตเป็นขิงดองแช่อิ่มอบแห้ง โดยนำขิงดองที่มีขนาดไม่ได้มาตรฐานมาหั่นเป็นชิ้นลูกเต๋านำไปแช่น้ำเชื่อม แล้วนำไปอบในตู้อบลมร้อนพบว่าได้ขิงอบแห้งที่มีรสชาติที่ดี แต่ประสบปัญหาในเรื่องสีของผลิตภัณฑ์ที่คล้ำ ดังนั้นในงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาและหาแนวทางในการพัฒนากระบวนการอบแห้งเพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงคุณภาพสีของขิงดองแช่อิ่มอบแห้ง และการหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งอาหาร เนื่องจากการหาสภาวะที่เหมาะสมจะต้องทำการทดลองหลายครั้งเพื่อหาข้อมูลผลกระทบของปัจจัยต่างๆ ซึ่งจะทำให้เสียค่าใช้จ่ายและเวลาที่ต้องใช้ในการทดลอง รวมทั้งเกิดความยุ่งยากในการทดลอง ดังนั้นการทดลองเพื่อกำหนดสภาวะการอบแห้งและแบบจำลองการอบแห้งจึงเป็นสิ่งที่สำคัญอย่างยิ่งในการออกแบบระบบการอบแห้ง ปัจจุบันแบบจำลองการอบแห้งได้นำไปใช้ในการจำลองสภาวะการอบแห้งและศึกษาผลกระทบของปัจจัยต่างๆ ในกระบวนการตลอดจนการทดลองและเปรียบเทียบเงื่อนไขการอบแห้งแบบต่างๆ เพื่อกำหนดสภาวะที่เหมาะสมแทนการทดลองจริง (สั๊กมน, 2555)

การทำนายจลนพลศาสตร์การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio, MR) ของขิงดองแช่อิ่มในระหว่างการอบแห้งด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (mathematical modeling) เป็นวิธีการที่ประหยัดได้ทั้งเวลาและค่าใช้จ่ายในการทดลอง สามารถวิเคราะห์หาข้อมูลจำนวนมากอย่างละเอียดซึ่งอาจจะเป็นข้อมูลที่วัดได้ยากหรือวัดไม่ได้เลยในห้องปฏิบัติการ

(สั๊กมน, 2555) ปัจจุบันการจำลองจลนพลศาสตร์การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของผลิตภัณฑ์สามารถทำได้ด้วยวิธีการปรับเส้นโค้ง (curve fitting) ให้ผลการจำลองข้อมูลสอดคล้องกับผลการทดลอง (วิภาดาและคณะ, 2556) โดยสามารถจำแนกได้เป็นแบบจำลองเชิงเส้น (linear model) แบบจำลองไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear model) และแบบจำลองพหุนาม (polynomial model) เพื่อใช้ในการจำลองการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในระหว่างกระบวนการอบแห้ง และอธิบายกระบวนการอบแห้ง การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสม ด้วยค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) สูงที่สุด และค่าไคกำลังสอง (χ^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ที่น้อยสุด (ฤทธิชัย, 2558) ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาแบบจำลองและผลกระทบของอุณหภูมิที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของขิงดองแช่อิ่มอบแห้ง รวมถึงการวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมของจลนพลศาสตร์การอบแห้งของขิงดองแช่อิ่ม เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานให้ผู้ประกอบการในการปรับปรุงกระบวนการอบแห้งภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิอบแห้งในช่วง 50-80 °C จากการศึกษาดังกล่าวเป็นแนวทางในการปรับปรุงกระบวนการอบแห้งขิงดองแช่อิ่มเพื่อปรับปรุงสีของขิงดองแช่อิ่มอบแห้งต่อไป

2 อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 วัตถุดิบ

ขิงดองได้จากกระบวนการตัดแต่งขิงที่มีขนาดไม่ได้มาตรฐานและเหลือเป็นจำนวนมากในกระบวนการผลิตในจังหวัด เชียงราย จากนั้นบรรจุใส่ถุงซิลิโคนสุญญากาศ และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 0-4 °C จนกว่านำไปวิเคราะห์ข้อมูลในขั้นต่อไป

การเตรียมวัตถุดิบเริ่มต้นนำขิงดองมาหั่นเป็นลูกเต๋ารูปร่าง 1.5 cm³ จากนั้นนำมาล้างด้วยน้ำสะอาดเพื่อกำจัดความเค็ม โดยแช่น้ำทิ้งไว้ 5-6 h และเปลี่ยนน้ำทุกๆ ชั่วโมง วัดค่าความเค็มให้เท่ากับ 0 ทุกครั้งก่อนเข้าสู่กระบวนการ จากนั้นนำขิงมาต้มน้ำเดือดที่อุณหภูมิ 80-90 °C เป็นเวลา 1 h ร่วมกับการใส่กรดแอสคอร์บิก 1% (w/w) จากนั้นรอให้สะเด็ดน้ำ และเข้าสู่กระบวนการแช่อิ่ม โดยแช่อิ่มที่ระดับความเข้มข้นของสารละลายซูโครส 43 °Brix เวลาในการแช่อิ่ม 6 h และอุณหภูมิในการแช่อิ่ม 70 °C อัตราส่วนระหว่างสารละลายออสโมซิสต่อขิงดอง 1:1 (โดยน้ำหนัก) แช่ตัวอย่างขิงดองในสารละลายออสโมติกที่เตรียมไว้ในบีกเกอร์ที่ปิดฝาด้วยอะลูมิเนียมฟอยล์ และควบคุมอุณหภูมิใช้ในการออสโมซิสด้วยหม้อต้มน้ำควบคุมอุณหภูมิ จากนั้นสะเด็ดน้ำให้หมาด แล้วคลุกด้วยน้ำผึ้ง ทิ้งไว้อย่างน้อย 1 คืน (ขิง 1 kg / น้ำผึ้ง 42 g) จากนั้นนำไปทดลองต่อไป

2.2 การวิเคราะห์ค่าความชื้นเริ่มต้น

การวิเคราะห์ความชื้นเริ่มต้นของขิงดองแช่อิ่มตามวิธีมาตรฐาน (AOAC, 2010) ใช้ตัวอย่างจำนวน 5.0 g ใส่ในถ้วยอะลูมิเนียมขนาด 3 oz ที่ผ่านการอบเพื่อไล่ความชื้น จำนวน 20

ตัวอย่าง และทำการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ จากนั้นนำไปอบแห้งด้วยตู้อบแห้งลมร้อน (500/108I, Memmert, Germany) ที่อุณหภูมิ $105 \pm 2^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 24 h (AOAC, 2010) จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งระบบดิจิทัล (CP2245, Sartorius Analytical, Switzerland) ความชื้นของตัวอย่าง (MC , $g_{\text{dry matter}}^{-1}$) คำนวณโดยใช้สมการที่ (1).

$$MC = \frac{W_i - W_f}{W_f} \quad (1)$$

เมื่อ W_i และ W_f คือน้ำหนักเริ่มต้นของตัวอย่าง (g) และน้ำหนักสุดท้ายของตัวอย่าง (g) ตามลำดับ

2.3 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของซิงคองแช่อบแห้ง

เครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดถูกออกแบบและสร้างโดยสาขาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ซึ่งมีส่วนประกอบที่สำคัญ ได้แก่ ระบบสร้างลมร้อนซึ่งประกอบด้วยขดลวดไฟฟ้าขนาด 1.1 kW จำนวน 3 ขด และพัดลมซึ่งถูกควบคุมด้วยอุปกรณ์ปรับความเร็ว (DVUS-940W1, Panasonic Corp., Japan) ควบคุมอุณหภูมิของอากาศร้อนด้วยเครื่องควบคุมอุณหภูมิระบบ PID (TTM J4/J5, Toho, Japan) ถาดสำหรับวางตัวอย่างติดตั้งตาข่าย (CDR-3, CST, China) สำหรับวัดและบันทึกค่าน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงของตัวอย่างซิงคองแช่อบแห้ง และบันทึกค่าผ่านจากช่องสัญญาณ RS-485 ซึ่งเชื่อมต่อกับอุปกรณ์แปลงสัญญาณและเครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับบันทึกข้อมูล โดยข้อมูลที่ถูกบันทึกค่าประกอบด้วยน้ำหนักของตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงไปในระหว่างการอบแห้ง ซึ่งถูกบันทึกทุกๆ 5 min นำข้อมูลที่ได้ไปคำนวณในรูปแบบของค่าความชื้น และอัตราส่วนความชื้นตามสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาแบบจำลองที่เหมาะสมด้วยเทคนิคการวิเคราะห์แบบถดถอย (ฤทธิ์ชัย, 2556)

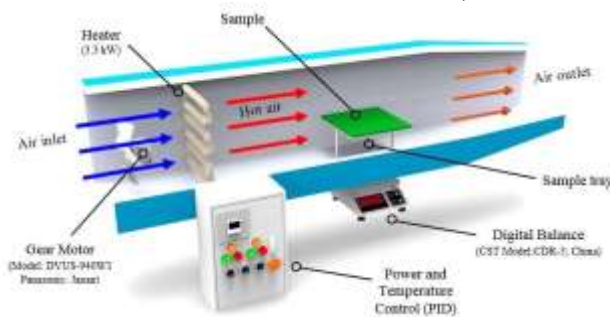


Figure 1. Diagram of the tray drying system.

(Source: Assawarachan. R. et al., 2016).

อัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งของซิงคองแช่อบแห้ง สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2)

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} \quad (2)$$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น และ M_t , M_i , M_e คือ ความชื้นที่เวลาใดๆ ความชื้นเริ่มต้น และความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content, EMC) ตามลำดับ การหาค่าความชื้นที่เวลาใดๆ โดยนำตัวอย่างซิงคองแช่อบแห้งที่มีน้ำหนักเริ่มต้น 100 ± 5 g อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาด (Figure 1) ที่อุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80°C และความเร็วลมคงที่ 0.4 m s^{-1} จากความชื้นเริ่มต้นจนถึงความชื้นสุดท้ายที่ $0.17 \pm 0.03 g_{\text{water}} / g_{\text{dry matter}}$ และการหาค่าความชื้นเริ่มต้น โดยเริ่มจากนำซิงคองแช่อบแห้งเข้าตู้อบแห้งแบบลมร้อน (Hot air drying) ที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 24 h และการวิเคราะห์หาความชื้นสมดุล โดยนำซิงคองแช่อบแห้งมาอบแห้งที่อุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80°C โดยใช้เครื่องอบแห้งแบบลมร้อน (Hot air drying) เป็นเวลา 72 h จากนั้นนำมาคำนวณค่าความชื้นสมดุล (Henderson and Perry, 1976).

2.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้ง

แบบจำลองการอบแห้งที่นิยมใช้ในการศึกษาลักษณะการอบแห้งของอาหารหรือวัสดุทางการเกษตร ได้แก่ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Newton, Henderson and Pabis, Page, Modified Page และ Midilli et al. ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ดัง Table 1 สมการที่ (3)-(7) การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองการอบแห้งใช้เทคนิคการวิเคราะห์แบบสมการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear regression) ด้วยวิธีปรับเส้นโค้ง (Doymaz and İsmail, 2011; Assawarachan, 2013; Unhapipatpong, et al., 2015; ฤทธิ์ชัย, 2558)

Table 1 Mathematical models given by various authors.

Model name	Model equation
1. Newton	$MR = \exp(-k t)$ (3)
2. Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-k t)$ (4)
3. Page	$MR = \exp(-k t^n)$ (5)
4. Modified Page	$MR = \exp(-(kt)^n)$ (6)
5. Midilli et al	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$ (7)

k คือค่าคงที่การอบแห้ง ($1/\text{min}$), n คือค่าดัชนีการอบแห้ง a , b คือค่าคงที่ของรูปแบบสมการ

การวิเคราะห์รูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมใช้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงสุด (R^2), ค่าโคก้างสอง (χ^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย ($RMSE$) เป็นดัชนีบ่งบอกความแม่นยำในการทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไป ดังแสดงในสมการที่ (8) และ (9)

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

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

เมื่อค่า $MR_{exp, i}$ และ $MR_{pre, i}$ คือ ค่าอัตราส่วนความชื้นจากการทดลองและค่าอัตราส่วนความชื้นจากการทำนายของแบบจำลองการอบแห้ง N คือจำนวนข้อมูลในการทดลอง และ n_p คือจำนวนตัวแปรของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้ง

2.5 การเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงทัศนศาสตร์ของซิงดองแช่ขี้มออบแห้ง

นำซิงแช่ขี้มออบแห้งและซิงดองมาวัดสีโดยใช้เครื่อง Konica Minolta's CR-10 spectrophotometer; Japan) แสดงตาม Figure 2. วัดค่าความสว่าง (L^* -value) ค่าความเป็นสีแดง-เขียว (a^* -value), ค่าความเป็นสีเหลือง-น้ำเงิน (b^* -value) ค่าที่บ่งบอกถึงความเข้มหรือความจางของสี (chroma) และ ค่าสีที่สะท้อนมาจากสีของวัตถุ (hue value) จากนั้นนำค่าสีวิเคราะห์ค่าความแตกต่างสีโดยรวม (ΔE^*) โดยเปรียบเทียบสีของซิงดองแช่ขี้มอกับซิงดองแช่ขี้มอที่ผ่านกระบวนการอบแห้ง ดังสมการที่ (10)

$$\Delta E^* = ((L^* - L_0^*)^2 - (a^* - a_0^*)^2 - (b^* - b_0^*)^2)^{1/2} \quad (10)$$

เมื่อค่า L_0^* , a_0^* และ b_0^* คือค่าความสว่าง, ค่าความเป็นสีแดง-เขียว ค่าความเป็นสีเหลือง-น้ำเงินของซิงดองแช่ขี้มอ และ L^* , a^* และ b^* คือค่าความสว่าง, ค่าความเป็นสีแดง-เขียว ค่าความเป็นสีเหลือง-น้ำเงิน ของซิงดองแช่ขี้มออบแห้ง



Figure 2. Photography of CR-10 chroma meter (Konica Minolta; Japan).

2.6 การวิเคราะห์หาค่า Browning index (BI)

ซังตัวอย่างซิงดองแช่ขี้มออบแห้งสับละเอียด 5 ± 0.5 g ใส่ในขวดรูปชมพู่เติม 2% acetic acid ปริมาตร 30 ml ทิ้งไว้ 30 min นำไปกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 4 จากนั้นนำสารละลายที่กรองได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นของแสงที่ 420 nm โดยเทียบกับสารละลาย 2% acetic acid เป็นสารมาตรฐาน (Baloch และคณะ; 1973)

2.7 วิเคราะห์น้ำตาลรีดิวซ์และปริมาณน้ำตาลทั้งหมด

ซังตัวอย่างแล้วย่อยด้วย Carez I & II ปรับปริมาตร 100 ml กรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 4 และนำสารละลายตัวอย่างใส่บิวเรตปลายงอ จากนั้นปิเปต Fehling I & II ไตเตรทกับสารละลายตัวอย่างจนสีน้ำเงินเริ่มจางลง หยด methylene

blue 1 หยด ไตเตรทจนกระทั่งสีน้ำเงินหายไปเหลือตะกอนสีส้มแดง จดปริมาตรสารละลายตัวอย่างที่ใช้ และคำนวณหาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ และวิธีวิเคราะห์น้ำตาลนอนรีดิวซ์ ทำการ Hydrolysed ด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นจำนวน 5 ml ตั้งบน hot plate อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นปรับพีเอชให้เป็นกลาง นำไปกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 4 นำสารละลายมาวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดตามวิธีของ Lane and Eynon's volumetric (AOAC, 2010)

2.8 การวิเคราะห์ทางสถิติ

ทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ ในแต่ละการทดลองอบแห้ง และรายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย (mean) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) โดยวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ใช้วิธีการแปรปรวนทางเดียว (One way analysis of variance) และทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

3 ผลและวิจารณ์

3.1 คุณลักษณะของซิงดองแช่ขี้มออบแห้ง

การวิเคราะห์ค่าความชื้นเริ่มต้นของซิงดองแช่ขี้มอ พบว่ามีค่าเท่ากับ 70.56 ± 0.58 g_{water}/g_{dry matter} จากการศึกษาสมบัติเชิงทัศนศาสตร์ในระบบสี CIE ด้วยค่าความสว่าง (L^*) ค่าความเป็นสีแดง (a^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) ของซิงดองเริ่มต้น มีค่าเท่ากับ 48.74 ± 1.82 , 1.16 ± 0.49 และ 13.19 ± 2.32 ตามลำดับและในระบบ munsell มีค่า chroma (C^*) เท่ากับ 13.21 ± 2.33 และค่า hue (h°) เท่ากับ 84.60 ± 1.63 โดยสีของซิงดองเริ่มต้นจะมีสีคล้ำอมชมพู เนื่องจากผ่านกระบวนการดองด้วยเกลือเป็นเวลานานจนกว่าจะนำมาแปรรูป และมีการเตรียมขั้นต้นโดยการลวกพร้อมกับการใส่กรดแอสคอร์บิก 1% (w/w) เพื่อช่วยในการปรับปรุงสีก่อนเข้าสู่กระบวนการแช่ขี้มอ และเมื่อผ่านกระบวนการแช่ขี้มอ พบว่า ค่าความสว่าง L^* มีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 53.15 ± 2.86 ค่า a^* มีค่าเท่ากับ 4.16 ± 1.83 ตัวอย่างมีค่าความเป็นสีแดงที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบตัวอย่างของดองเริ่มต้น และค่าความเป็นสีเหลือง b^* มีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 15.49 ± 3.34 เนื่องจากการออกซิเดชันด้วยการแช่ขี้มอจะสามารถช่วยลดการเปลี่ยนแปลงสีของอาหารได้เนื่องจากอาหารแช่ในสารละลายออกซิเดชันที่มีความเข้มข้นสูง และจมอยู่ในสารละลายตลอดเวลา จึงสามารถป้องกันการเกิดสีน้ำตาลได้และช่วยรักษาความคงตัวของสีในผลิตภัณฑ์ได้ (Ponting et al., 1996) และเมื่อพิจารณา ค่าสีในระบบ munsell มีค่า C^* เท่ากับ 16.11 ± 3.53 บ่งบอกถึงความเข้มของสี ค่า C^* เป็นตัวเลขบ่งบอกความสดใส ความเข้ม ถ้ามีค่าน้อยสีจะทึบ และถ้ามีค่ามากเนื้อสีจะสดใส และค่า h° มีเท่ากับ 75.30 ± 5.67 ซึ่งค่า h° เป็นตัวเลขที่ระบุตำแหน่งของสีมีหน่วยเป็นองศา โดย 45-90 องศา แสดงสีส้มแดงถึงสีเหลือง (McGuire, 1992)

จากนั้นศึกษาคุณลักษณะการอบแห้งของซิงดองแช่ขี้มออบแห้งที่อุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80°C จากความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ

$70.56 \pm 0.58 \text{ g}_{\text{water}}/\text{g}_{\text{dry matter}}$ จนเหลือความชื้นสุดท้ายเท่ากับ $0.17 \pm 0.03 \text{ g}_{\text{water}}/\text{g}_{\text{dry matter}}$ โดยนำมาคำนวณค่าความชื้นสมมูล พบว่าค่าความชื้นสมมูลของชิงตองแช่อิ่มมีค่าเท่ากับ 10.88, 10.46, 10.14 และ 10.03 ที่อุณหภูมิอบแห้ง 50, 60, 70 และ 80 °C ตามลำดับ จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของชิงตองแช่อิ่มในระหว่างการอบแห้ง แสดงใน Figure 3 โดยการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80 °C ความเร็วลมคงที่ 0.4 m s^{-1} ใช้เวลาในการอบแห้ง 13.00, 10.58, 9.08 และ 6.83 h ตามลำดับ โดยในช่วงแรกอัตราส่วนความชื้นในชิงตองแช่อิ่มจะลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากในชั้นชิงตองมีความชื้นสูง ทำให้การถ่ายเทมวลน้ำจากชั้นชิงตองออกไปยังผิวหน้าเกิดขึ้นได้ง่าย และรวดเร็ว และนอกจากนี้พบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจะมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำส่งผลให้ระยะเวลาในการอบแห้งน้อยลง จาก Figure 3 แสดงให้เห็นว่าการลดลงของความชื้นมีลักษณะเป็นแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลแบบลดลงกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ดังนั้นการเพิ่มอุณหภูมิการอบแห้งจะเป็นการเร่งอัตราการถ่ายเทความร้อนและมวล

ความชื้นในระหว่างกระบวนการอบแห้ง โดยมวลความชื้นในสถานะของเหลวในชั้นชิงตองจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะไอน้ำและถูกถ่ายเทมวลความชื้น และถูกพาออกไปกับอากาศร้อนที่ไหลผ่าน โดยพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นในช่วงนี้เรียกว่า latent heat of vaporization ส่งผลให้มวลความชื้นในชั้นเนื้อเยื่อเคลื่อนที่มายังผิวหน้าเพื่อทดแทนความชื้นที่สูญเสียไปในระหว่างการอบแห้ง และเกิดความแตกต่างของความดันไอน้ำในโครงสร้างเซลล์และมีการแพร่มวลความชื้นมาแทนที่ผิวหน้าเซลล์และมีค่าเท่ากับอัตราการระเหยของน้ำที่ผิวหน้าของตัวอย่าง เรียกว่าช่วงการทำแห้งคงที่ (Constant drying rate period) และเข้าสู่ช่วงของการเคลื่อนที่ของมวลความชื้นในโครงสร้างเซลล์ชั้นในแพร่มาแทนที่ผิวหน้าช้ากว่าช่วงการระเหยของน้ำที่ผิวหน้าตัวอย่าง เรียกว่า ช่วงการอบแห้งแบบลดลง (Falling drying rate period) ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงแสดงให้เห็นถึงความต้านทานการเปลี่ยนแปลงความชื้นที่เกิดขึ้นในการส่งผ่านความร้อนและการส่งผ่านมวล (รัชฎา และคณะ, 2557)

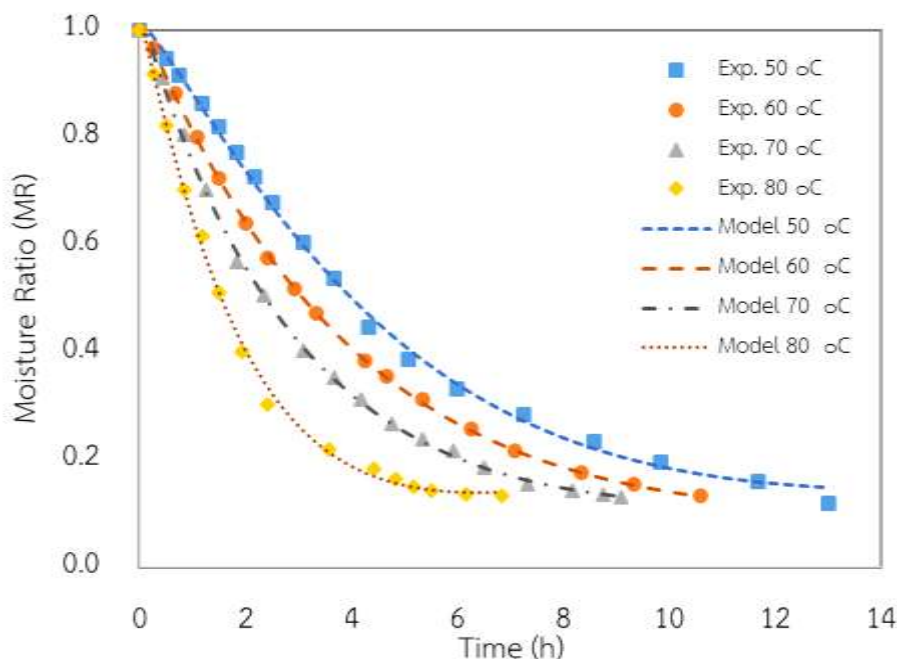


Figure 3 Moisture ratio (MR) versus drying time of soft dried pickled ginger for drying temperature 50-80 °C, comparing experimental curve with most predicted Midilli model.

3.2 การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งชิงตองแช่อิ่ม ซึ่งประกอบไปด้วยแบบจำลองของ Newton, Henderson and Pabis, Page, Modified Page และ Midilli et al. ซึ่งการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งจะใช้เทคนิคการวิเคราะห์แบบสมการถดถอยที่ไม่เชิงเส้น (Nonlinear Regression) เพื่อวิเคราะห์ความเหมาะสมของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของชิงตอง

แช่อิ่มอบแห้งได้เหมาะสมที่สุด โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) สูงที่สุด ในขณะที่ให้ค่าโคเกอแลงสอง (χ^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ที่ต่ำสุด (Unhapipatpong, et al., 2015; Doymaz and Ismail, 2011, Assawarachan, 2013 และ ฤทธิชัย, 2558) โดยที่ค่า R^2 สามารถบ่งบอกถึงความแม่นยำของการทำนาย ในขณะที่ค่า (χ^2) และ RMSE บ่งบอกถึงความผิดพลาดจากการทำนาย จากการศึกษาพบว่าแบบจำลองของ Midilli et al. สามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของชิง

ต้องใช้อิมอบแห้งได้เหมาะสมที่สุด ดังแสดงใน Table 2 เนื่องจากให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ($R^2=0.9967-0.9996$) สูงที่สุด ในขณะที่ให้ค่าไคกำลังสอง ($\chi^2=0.0000-0.0001$) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย ($RMSE=0.0033-0.0099$) มีค่าต่ำสุด และมีค่าน้อยกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อื่นๆ สอดคล้องกับรายงานวิจัยของการศึกษาผลกระทบของต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งแบบชั้นบางด้วยลม

ร้อน เช่น แครอท มะเขือเทศ มันฝรั่ง ขมิ้น เปลือกทับทิม และใบสะระแหน่ พบว่าแบบจำลองของ Midilli et al., เหมาะสมในการทำนายอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้น (Hosain et al., 2012; Taheri-Garavanda et al., 2011; Naderinezhad et al., 2016; Murthy and Manohar, 2014; วิกานดา และคณะ, 2556) และ เนาว์ นิตย และคณะ, 2556)

Table 2 Thin layer drying model constants and statistical parameter of soft dried pickled ginger.

Drying Model	Drying Condition (°C)	Drying Model Constants	R^2	$\chi^2 \times 10^{-3}$	RMSE
Newton	50	$k=0.1696$	0.9968	0.15	0.0123
	60	$k=0.2158$	0.9946	0.20	0.0140
	70	$k=0.2728$	0.9883	0.45	0.0212
	80	$k=0.4158$	0.9665	1.30	0.0358
Henderson and Pabis	50	$k=0.1762, a=1.0338$	0.9958	0.28	0.0166
	60	$k=0.2156, a=0.9993$	0.9946	0.20	0.0140
	70	$k=0.2676, a=0.9833$	0.9899	0.39	0.0196
	80	$k=0.4060, a=0.9790$	0.9712	1.23	0.0349
Page	50	$k=0.1609, n=1.0294$	0.9956	0.26	0.0160
	60	$k=0.2292, n=0.9619$	0.9964	0.11	0.0106
	70	$k=0.3072, n=0.9139$	0.9957	0.16	0.0106
	80	$k=0.4650, n=0.8863$	0.9869	0.69	0.0260
Modified Page	50	$k=0.1695, n=1.0294$	0.9956	0.26	0.0160
	60	$k=0.2162, n=0.9619$	0.9964	0.01	0.0106
	70	$k=0.2749, n=0.9139$	0.9956	0.18	0.0133
	80	$k=0.4215, n=0.8863$	0.9847	1.91	0.0434
Midilli et al.,	50	$k=0.1515, a=1.0158, n=1.1734, b=0.0079$	0.9967	0.10	0.0099
	60	$k=0.2385, a=1.0229, n=1.0143, b=0.0055$	0.9996	0.01	0.0033
	70	$k=0.3328, a=1.0388, n=0.9690, b=0.0077$	0.9995	0.02	0.0047
	80	$k=0.4820, a=1.0191, n=1.0785, b=0.0172$	0.9983	0.09	0.0095

3.3 การทวนสอบความแม่นยำของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การทวนสอบความแม่นยำของแบบสมการทั่วไปในการทำนายผลของค่าพารามิเตอร์การอบแห้งของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยการเปรียบเทียบกับข้อมูลการอบแห้งซึ่งต้องแช่อบที่อุณหภูมิที่ 55, 65 และ 75°C ตามลำดับ โดยนำค่าอุณหภูมิที่ 55, 65 และ 75°C แทนค่าในสมการ (11) - (14) ซึ่งเป็นสมการทั่วไปของค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Midilli et al., ดังสมการต่อไปนี้

$$k=0.0109T-0.4045 \quad (R^2=0.9820) \quad (11)$$

$$a=0.0003T+1.0076 \quad (R^2=0.1047) \quad (12)$$

$$n=-0.0033T+1.2732 \quad (R^2=0.2308) \quad (13)$$

$$b=0.003T-0.01 \quad (R^2=0.5577) \quad (14)$$

นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองจริง (จำนวน 3 ซ้ำ) ด้วยการคำนวณในรูปแบบของค่า Moisture ratio เปรียบเทียบกับค่า Moisture ratio จากการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Midilli et al. จากนั้นวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงสุด (R^2) ซึ่งบอกความแม่นยำในการทำนายของสมการ และการวิเคราะห์ความผิดพลาดในการทำนายด้วยค่าไคกำลังสอง (χ^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ตามที่แสดงในสมการที่ (8) และ (9) ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์พบว่าค่า R^2 มีค่าเท่ากับ 0.9072-0.9385 ในขณะที่ χ^2 และ RMSE มีค่าเท่ากับ $1.34 \times 10^{-3} - 1.82 \times 10^{-3}$ และ 0.0107-0.0158 ที่อุณหภูมิที่ระดับ 55, 65 และ 75°C ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่ารูปแบบสมการทั่วไปของค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Midilli et al. สามารถทำนายค่า Moisture ratio ได้อย่างเหมาะสม โดยมีค่า R^2 ที่สูง และค่า χ^2 และ RMSE มีค่าต่ำสอดคล้องกับการวิเคราะห์ด้วยวิธี Graphic Validation ตามภาพที่แสดงใน Figure 4 โดยมีความสัมพันธ์ใกล้เคียงกับเส้นทวนสอบความแม่นยำ (เส้นตรงที่มีความชัน 45°) ข้อมูลที่ได้จากการเปรียบเทียบชี้ให้เห็นว่าอัตราส่วนความชื้นได้จากการทำนายกระจายอยู่รอบๆ เส้นตรง แสดงว่าแบบจำลองสามารถทำนายได้ดี ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Midilli et al., สามารถทำนายอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงความชื้นในระหว่างการอบแห้งซึ่งต้องแช่อบที่อุณหภูมิ 50 ถึง 80 °C ได้เป็นอย่างดี สอดคล้องกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการทวนสอบความแม่นยำของแบบจำลองการอบแห้ง (ปองพล และฤทธิชัย, 2557; ฤทธิชัย และคณะ 2554; Pongtong et al., 2011; Agarry and Aworant, 2012; Singh and Pandey 2012; Assawarachan, 2013)

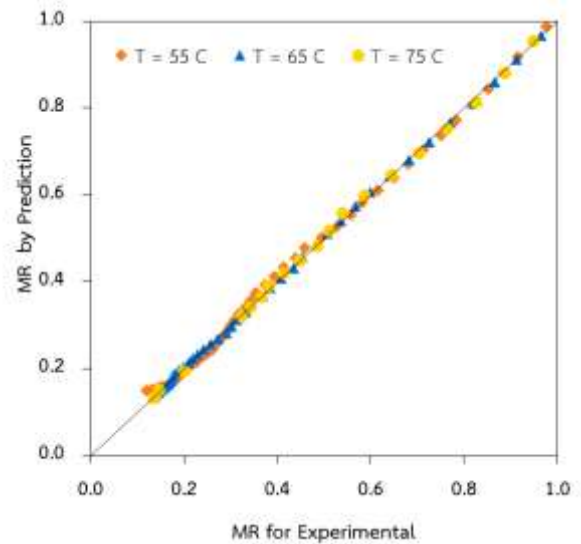


Figure 4. Comparison of the experimental moisture ratio (MR) and corresponding values by predicted Midilli model at different drying conditions

3.3 ผลของอุณหภูมิต่อคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของชิงตองแช่อบแห้ง

จากการศึกษาสมบัติเชิงทัศนศาสตร์ของชิงตองแช่อบแห้ง โดยการวัดสีของชิงตองแช่อบที่ผ่านกระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิต่าง ๆ แสดงผลการวัดค่าสีของชิงตองแช่อบแห้งแสดงใน Table 3 และภาพถ่ายของชิงตองแช่อบแห้งที่ 50, 60, 70 และ 80 °C แสดงใน Figure 5 พบว่า ค่าสีผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งที่สภาวะการทดลองต่างๆ มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) โดยปัจจัยหลักที่มีผลต่อสีของชิงตองแช่อบแห้งคือ อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งกล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งสูงขึ้น ส่งผลให้ค่าความสว่าง L^* ค่าความเป็นสีแดง a^* และค่าความเป็นสีเหลือง b^* มีแนวโน้มลดลง บ่งบอกถึงผลิตภัณฑ์ที่มีสีที่คล้ำขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับชิงตองที่ผ่านกระบวนการออสโมซิสมีค่าความสว่าง L^* (53.15 ± 2.86) และค่าความเป็นสีเหลือง b^* (15.49 ± 3.34) ซึ่งอาจเป็นผลมาจากกระบวนการออสโมซิสเป็นการแช่ขึ้นชิงในสารละลายซูโครสเข้มข้นทำให้ขึ้นชิงตองมีความเป็นสีเหลืองและความสว่างเพิ่มมากขึ้น และเมื่อผ่านกระบวนการอบแห้งทำให้ค่าความสว่าง L^* และค่าความเป็นสีเหลือง b^* ลดลง ค่าความเป็นสีแดง a^* เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งมีสีที่คล้ำขึ้น เนื่องจากการทำแห้งทำให้ลักษณะผิวหน้าอาหารเปลี่ยนแปลงไปส่งผลต่อค่าสีทำให้การวัดการสะท้อนของแสงมีค่าเปลี่ยนแปลงไปจากตัวอย่างชิงตองเริ่มต้น และเมื่อพิจารณาค่า Chroma (C^*) พบว่าเมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งสูงขึ้น จะส่งผลต่อค่า C^* มีค่าน้อยลงทำให้ค่าสีของชิงตองแช่อบแห้งมีแนวโน้มไปทางสีที่บาสอดคล้องกับค่า L^* ที่มีค่าลดลง เมื่อพิจารณาค่าสี Hue angle (h°) แสดงถึงค่ามุมของสี มีหน่วยเป็นองศา ค่า h° อยู่ในช่วง 45-90 องศา แสดงสีส้มแดงถึงสีเหลือง) โดยค่า h° ของชิงตองแช่อบมีค่าเท่ากับ 84.60 บ่งบอกถึงผลิตภัณฑ์มีสีไปทางสีเหลือง และ

เมื่อผ่านกระบวนการอบแห้งค่า h° มีแนวโน้มลดลงผลิตภัณฑ์จึงมีสีลักษณะไปทางส้มแดง โดยมีค่าอยู่ในช่วง 58.49-65.93 องศา และการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม (ΔE^*) แสดงใน Table 4 พบว่าค่า ΔE^* มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งเพิ่มสูงขึ้น โดยอุณหภูมิร้อนที่สูงขึ้นจะทำให้ค่า ΔE^* มากขึ้น เห็นได้ชัดว่าชিংตองแช่อิ่มอบแห้งที่ใช้อุณหภูมิอบแห้ง 80°C มีค่า ΔE^* เท่ากับ 15.33 ± 3.51 ซึ่งเป็นค่าปริมาณสูงที่สุด รวมถึงค่า L^* และ b^* ที่ต่ำที่สุด ซึ่งอาจเนื่องมาจากการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจะส่งผลทำให้รงควัตถุหรือสารให้สีถูกทำลายและเกิดการสลายตัวจากความร้อนที่สูงเกินไปจึงทำให้เกิดการสูญเสียสี รวมทั้งมีการสลายตัวและมีการรวมตัวกันของหมู่อะมิโนกับสารประกอบรีดิวซิง และพัฒนาการเป็นสารประกอบเชิงซ้อนมีสีเหลืองจนเป็นสีน้ำตาล ซึ่งในระหว่างการทำแห้งจะเกิดการเคลื่อนที่ของโมเลกุลความชื้นในเนื้อชিংตองที่ผ่านชั้นอนุภาคเกิดเป็นปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) รวมถึงปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล (browning reaction) ชนิดที่ไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ (non enzymatic browning reaction) เกิดขึ้นระหว่างน้ำตาลรีดิวซ์ (reducing sugar) กับกรดอะมิโน โปรตีน หรือสารประกอบไนโตรเจนอื่นๆ โดยมีความร้อนเร่งปฏิกิริยา ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีลักษณะสีที่คล้ำ (นิธิยา, 2551) โดยทั่วไปการปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ พีเอช ปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ และเวลาในการอบแห้ง โดยจะมีอัตราเร็วเพิ่มขึ้นเมื่อใช้อุณหภูมิสูงขึ้น และในผลิตภัณฑ์ที่มีน้ำตาลความเข้มข้นสูง (วารินทร์, 2551) นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาค่าดัชนีการเกิดสีน้ำตาล (browning index) ซึ่งมีค่าสอดคล้องกับค่าพารามิเตอร์ของสี

พบว่าผลิตภัณฑ์อบแห้งที่ใช้อุณหภูมิร้อนที่ 80°C จะให้ค่าดัชนีการเกิดสีน้ำตาลสูงกว่าการใช้อุณหภูมิต่ำกว่า โดยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) สอดคล้องกับลักษณะปรากฏที่มีสีน้ำตาลมากกว่าดังแสดงใน Figure 5 ลักษณะของชিংตองแช่อิ่มอบแห้งที่อุณหภูมิ 80°C จึงมีลักษณะเป็นสีเหลือง-แดง และคล้ำ เนื่องจากการอบแห้งที่อุณหภูมิที่ 80°C นั้นเป็นการให้พลังงานในการถ่ายโอน โมเมนตัมของมวล ความชื้นของของเหลวในชั้นชিংตองมากกว่าความต้องการของระบบในการแพร่ความชื้น ส่งผลให้มีพลังงานความร้อนส่วนเกินจากระบบไปเร่งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล และสามารถอธิบายด้วยหลักการทำแห้ง โดยน้ำในอาหารเคลื่อนที่ออกมาที่ผิวหน้าและระเหยออกไป และพาส่วนของแข็งที่ละลายได้ออกมาที่ผิวด้วย จึงมีโอกาสทำให้ผิวอาหารมีสีเข้มขึ้นหรือคล้ำขึ้นได้ทำให้อาหารมีสีเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม (ชมพู, 2550) จากการทดลองวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดตามวิธีของ Lane-Eynon ดังแสดงใน Table 4 แสดงผลรวมปริมาณน้ำตาลทั้งหมดในกลุ่ม non-reducing sugar โดยเฉพาะน้ำตาลซูโครส และกลุ่ม reducing sugar ซึ่งหมายถึงน้ำตาลกลูโคสหรือฟรุคโตสที่เป็นอิสระ พวคน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว เช่น น้ำตาลกลูโคส น้ำตาลกาแลกโตส และน้ำตาลฟรุคโตส เป็นต้น และน้ำตาลที่พบในน้ำผึ้งส่วนใหญ่เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว โดยฟรุคโตสและกลูโคสเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่เด่นที่สุดของน้ำผึ้งที่ร่างกายนำไปใช้ได้ง่าย (วีระพันธุ์, 2540) ในกระบวนการแช่อิ่มชিংตองใช้น้ำทราย ซึ่งน้ำตาลทรายจัดเป็นน้ำตาลซูโครสเป็น non-reducing sugar นอกจากนี้ซูโครสยังสามารถเกิดปฏิกิริยาอินเวอร์ชัน



Figure 5 Photography of soft dried pickled ginger at drying temperatures (50, 60, 70 and 80°C).

Table 3 Impacts of drying temperature of optical properties (CIE- $L^*a^*b^*$) and munsell systems of soft dried pickled ginger.

Drying condition	L^*	a^*	b^*	Chroma	Hue angle
Osmotic pickled ginger ^c	53.15±2.86 ^a	4.16±1.83 ^b	15.49±3.34 ^a	16.11±3.53 ^a	75.30±5.67 ^a
50 °C	49.30±1.42 ^b	7.56±2.60 ^a	11.96±0.92 ^b	14.14±2.18 ^{ab}	58.49±6.50 ^b
60 °C	47.63±1.17 ^b	5.60±1.74 ^{ab}	10.65±1.62 ^{bc}	12.18±1.42 ^{bc}	63.78±10.00 ^b
70 °C	44.39±1.05 ^c	4.08±1.40 ^b	9.05±1.38 ^{cd}	10.00±1.58 ^{cd}	65.93±6.33 ^b
80 °C	40.40±2.77 ^d	4.27±2.25 ^b	7.41±2.71 ^d	8.66±3.25 ^d	60.08±8.50 ^b

Superscripts in different rows of each column show significantly difference at $p < 0.05$.

Table 4 Impacts of drying temperatures on physicochemical properties of soft dried pickled ginger.

Drying condition	ΔE^*	BI	Reducing sugar	Non-Reducing sugar
Osmotic pickled ginger ^c	-	0.07±0.03 ^e	2.05±0.03 ^e	46.74±0.75 ^d
50 °C	6.70±1.63 ^c	0.34±0.02 ^d	23.57±0.27 ^d	55.95±0.98 ^c
60 °C	7.74±1.60 ^c	0.44±0.05 ^c	29.21±0.48 ^c	58.61±0.90 ^b
70 °C	11.05±0.78 ^b	0.57±0.06 ^b	44.82±0.41 ^b	60.29±1.50 ^b
80 °C	15.33±3.51 ^a	0.68±0.13 ^a	59.87±0.81 ^a	69.67±1.04 ^a

Superscripts in different rows of each column show significantly difference at $p < 0.05$.

(inversion) เกิดเป็นน้ำตาลกลูโคสและฟรุกโตสซึ่งมีคุณสมบัติเป็นน้ำตาลรีดิวซ์สามารถเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดได้ ซึ่งในระหว่างกระบวนการผลิตซึ่งต้องแช่อบมีการคลุกน้ำผึ้งหลังจากกระบวนการแช่อบ 1 คืน โดยน้ำผึ้งเป็น reducing sugar จากผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด พบว่า ปริมาณน้ำตาล reducing sugar มีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งสูงขึ้น เนื่องจากจากปฏิกิริยาการเกิดคาราเมล (caramelization) คือ ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ (non enzymatic browning reaction) ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของโมเลกุลน้ำตาลด้วยความร้อนสูง และมีการเกิดพอลิเมอร์ (polymerization) ของสารประกอบคาร์บอนได้เป็นสารที่มีกลิ่นและรสเฉพาะตัว เรียกว่า คาราเมล (caramel) เนื่องจากในขิงมีน้ำตาลรีดิวซ์และกรดอะมิโนซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากันในระหว่างการอบแห้งโดยใช้ความร้อนส่งผลให้เกิดเป็นสารสีน้ำตาล โดยอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น และปริมาณน้ำตาลที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นสภาวะที่สารมีความเข้มข้นสูง และอุณหภูมิสูงจะเกิดปฏิกิริยาเร็วที่สุด (บุญยวีร์ และคณะ, 2552) และเมื่อได้รับความร้อนจะทำให้มีทั้งสี กลิ่น และรสชาติ เกิดขึ้นแตกต่างกันและปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงและจะผันแปรตามระยะเวลาและที่อุณหภูมิที่ใช้ (นิธิยา, 2545)

4 สรุป

การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งซึ่งต้องแช่อบด้วยอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดคือ แบบของ Midilli et al ซึ่งสามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของขิงแช่อบแห้งได้เหมาะสมที่สุด เนื่องจากให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) สูงที่สุด ในขณะที่ให้ค่าไคกำลังสอง (χ^2) และค่า

รากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ที่ต่ำสุด และจากการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีกายภาพของขิงต้องแช่อบแห้ง จากผลการทดลองทั้งหมดพบว่าขิงต้องแช่อบแห้งที่ 80 องศาเซลเซียสส่งผลต่อสีของขิงต้องแช่อบแห้งมากที่สุด เนื่องจากอุณหภูมิในการอบแห้งสูงจะทำให้ผลิตภัณ์ที่มีที่ต่ำกว่า โดยพิจารณาจากค่าความสว่าง L^* และค่าความเป็นสีเหลือง b^* ที่มีค่าลดลง และค่าความเป็นสีแดง a^* เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับค่าดัชนีการเกิดสีน้ำตาล (BI) และค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม (ΔE^*) จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการได้รับความร้อนสูงจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมี ลักษณะของปรากฏการดังกล่าวเป็นไปตามทฤษฎีการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลที่ไม่อาศัยเอนไซม์ และอุณหภูมิในการอบแห้งที่สูงขึ้นส่งผลต่อดัชนีการเกิดสีน้ำตาลและปริมาณน้ำตาลทั้งหมดสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

5 กิตติกรรมประกาศ

บทความวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิจัยเรื่องการศึกษาการปรับปรุงสีของขิงต้องแช่อบแห้ง ได้รับเงินทุนสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) โครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) ระดับปริญญาโท และขอขอบคุณ บริษัท เชียงราย อะโกรอิตส์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์วัตถุดิบหลักและเงินทุนสนับสนุนร่วมในการทำวิจัย

6 เอกสารอ้างอิง

ชมพู ยุ่มโต. 2550. การถนอมอาหาร. กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์.

- นิธิยา รัตนานพนธ์. 2545. การเกิดสีน้ำตาลที่ไม่อาศัยเอนไซม์. หนังสือเคมีอาหาร. หน้า 321.
- นิธิยา รัตนานพนธ์. 2551. เคมีอาหาร. พิมพ์ครั้งที่ 3 โอเดียนสโตร์, กรุงเทพฯ. หน้า 324.
- เนาวนิตย์ โพธิ์ศรี, พิมลพรรณ คงบุตร, เกียรติศักดิ์ อุตตะมดิง, ฤทธิชัย อัครวราชันย์. 2556. อิทธิพลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นและสีของใบสะระแหน่ในวารสารวิชาการ มทร.สุวรรณภูมิ 1(2), 103-114.
- ปณณวีร์ รัตนศิริ, ศจี สุวรรณศรี, ปุณทริกา รัตนตรัยวงศ์, บริตา ธนสุกาญจน์. 2552. อิทธิพลของค่าพีเอชและอุณหภูมิในการเก็บรักษาต่อการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายน้ำตาล. การประชุมนำเสนอผลงานวิจัยบัณฑิตศึกษา ครั้งที่ 12, 371-375, มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 12-13 กุมภาพันธ์ 2552.
- ปองพล สุริยะกันธร, ฤทธิชัย อัครวราชันย์. 2557. อิทธิพลของอุณหภูมิและความหนาของชั้นวัสดุต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงทัศนศาสตร์ของดอกคาโมมาย์ลอบแห้งวารสารวิทยาศาสตร์เกษตร ปีที่ 45 ฉบับที่ 3/1 (พิเศษ) กันยายน – ธันวาคม 2557, 228-231.
- ฤทธิชัย อัครวราชันย์, ภาณุภ, เจริญรัตน์, สุนทรสืบคำ, เทียมณีนมิ่งมุล, ดวงมล จนใจ. 2554. จลนพลศาสตร์การอบแห้งด้วยลมร้อนของเปลือกทับทิม. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย 17, 27-34.
- ฤทธิชัย อัครวราชันย์. 2556. จลนพลศาสตร์การอบแห้งอาหารและวัสดุชีวภาพ. วารสารวิชาการ Rajabhat Journal of Sciences, Humanities & Social Sciences 14(2), 13-22.
- ฤทธิชัย อัครวราชันย์. 2558. ผลกระทบของอุณหภูมิและชั้นความหนาต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งกากเนื้อมะพร้าว. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย; 22(1), 28-38.
- รัชฎา แยมศรวล, รณชัย วังรัก, วิภาดา แก้วยอด, ดวงพร อมรเลิศพิศาล, ชนันท ราชภูริณิคม และฤทธิชัย อัครวราชันย์. 2557. การหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดสารประกอบฟีนอลิกรวมในเปลือกทับทิมอบแห้ง. การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยระดับชาติครั้งที่ 15 และระดับนานาชาติครั้งที่ 7, 506-511. โรงแรมกรุงศรีวิเวอร์ อโยธยา, 2-4 เมษายน 2556.
- วารินทร์ พิมพ์า. 2551. รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์โครงการวิจัยเรื่องการผลิตเทคโนโลยีการทำให้แห้งของกล้วยน้ำว้าต่อการคงคุณภาพและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ. พิษณุโลก : มหาวิทยาลัยนเรศวร. หน้า 31.
- วิภาดา แก้วยอด, รัชฎา แยมศรวล, ฤทธิชัย อัครวราชันย์. 2556. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายอัตราการถ่ายเทมวลในระหว่างกระบวนการอบแห้งเปลือกทับทิมแบบชั้นบางด้วยลมร้อน. การประชุมวิชาการอุตสาหกรรมเกษตร สจล. ครั้งที่ 2 ประจำปี 2556 กรุงเทพมหานคร: โรงแรมวินเซอร์สวิตส์. 30 สิงหาคม 2556, สุขุมวิท, กรุงเทพมหานคร.
- วิระพันธุ์ ตันติพงษ์. 2540. น้ำผึ้ง Honey. ในสมาคมผู้เลี้ยงน้ำผึ้งภาคเหนือแห่งประเทศไทย. (หน้า 9-13). เชียงใหม่: สมาคม.
- สักรมณ เทพหัสดิน ณ อยุธยา. 2555. การอบแห้งอาหารและวัสดุชีวภาพ. กรุงเทพมหานคร, ท็อป จำกัด. 211 น.
- อำไพศักดิ์ ทัพภูญา และ ศักชัย จงจำ. 2553. การอบแห้งด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา 15(2), 76-86.
- Agarry, S.E, Aworanit. O.A. 2012. Modelling the drying characteristics of osmosis coconut strips at constant air temperature. Journal of Food Process Technology 3, 1-6
- AOAC. 2010. Official Methods of Analysis. (18th ed.), Association of Official Analytical Chemists. Washington, D.C.: USA
- Assawarachan, R. 2013. Drying Kinetics of coconut residue in fluidized bed. International Journal of agriculture Innovations and Research 2(2), 263-266.
- Assawarachan, R., Upara, U., Tantikul, S. 2016. Drying kinetics of peeled longan fruit using single-stage drying and multi-stage drying. Thai Society of Agricultural Engineering Journal 22(2), 30-40.
- Baloch, A.K., Buckle, K.A., Edwards, R.A. 1973. Measurement of non-enzymatic browning of dehydrated carrot. Journal of the Science of Food and Agriculture 24, 389-398.
- Doymaz, İ., İsmail, O. 2011. Drying characteristics of sweet cherry. Food and Bioprocessing 89: 31-38.
- Henderson SM, Perry RL. 1976. Agricultural process engineering. AVI Publishing, Westport, INC
- Hosain Darvishi, Ahmad Banakar, Mohammad Zarein. 2012. Mathematical Modeling and Thin Layer Drying Kinetics of Carrot Slices. Global Journal of Science Frontier Research 12(1), 56-64.
- McGuire, R.G. 1992. Report of Objective Color Measurements. HortScience 27(12), 1254-1255.
- Murthy, T.P.K., Manohar, B. 2014. Hot air drying characteristics of mango ginger: Prediction of drying kinetics by mathematical modeling and artificial neural network. Food Sci Technol 51(12), 3712-3721.
- Naderinezhad S., Etesami N., Poormalek Najafabady A, Ghasemi Falavarjani M. 2016. Mathematical modeling of drying of potato slices in a forced convective dryer based on important parameters. Food Science & Nutrition 4(1), 110-118.

- Ponting, J.D., Walters, G.G., Forer, R.R., Jackson, R., Stanley, W.L. 1996. Osmotic dehydration of fruits. Food Technology 20, 125-128.
- Pongtong, K., Assawarachan, R and Noomhorm, A. 2011. Mathematical Models for Vacuum Drying Characteristics of Pomegranate Aril. Journal of Food Science and Engineering 1, 11-19.
- Singh. N.J and Pandey R.K. 2012. Convective air drying characteristics of sweet potato cube (*Ipomoea batatas* L.). Food and Bioproducts processing 90, 317-322.
- Taheri-Garavanda A., Shahin Rafieea & Alireza Keyhanian. 2011. Mathematical Modeling of Thin Layer Drying Kinetics of Tomato Influence of Air Dryer Conditions. International Journal of Engineering and Applied Sciences (IJEAS) 2(2), 147-160.
- Unhapitappong, P. Arkanit, K. Upara, U., Tantikul, S., Assavarachan, R. 2015. Mathematical Models of Dried Peeled Longan Fruit using Single-Stage Drying and Multi-Stage Drying. In 2nd International Conference on Interdisciplinary Research and Development; 29-31 October, 2015. Maejo University, Chiang Mai, Thailand; 33-443.