



จลนพลศาสตร์การอบแห้งเนื้อลำไยสีทองด้วยการใช้อุณหภูมิแบบขั้นเดียวและอุณหภูมิแบบหลายขั้น Drying Kinetics of Peeled Longan using Single-Stage and Multi-Stage Temperature

ฤทธิชัย อัสวาราชันย์^{1,2,*}, อุมพร อุประ^{1,2}, เสมอขวัญ ตันติกุล^{1,2}, พัชรmani อุณหพิพัฒพงศ์^{1,2}

Rittichai Assavarachan^{1,2,*}, Umaporn Upara^{1,2}, Samerkhwan Tantikul^{1,2}, Patcharamanee Unhapipatpong^{1,2}

¹ คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้, เชียงใหม่, 50290

¹ Faculty of Engineering and Agro-Industry; Maejo University, Sansai, Chiang Mai 50290, Thailand

² ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา กทม. 10400

² Postharvest Technology Innovation Center, Commission on Higher Education, Bangkok 10400, Thailand

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

บทคัดย่อ

การศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิแบบขั้นเดียวของการอบแห้งเนื้อลำไยที่ 60, 70 และ 80°C และการใช้อุณหภูมิแบบหลายขั้น โดยการใช้อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 1 h ตามด้วยอุณหภูมิ 70°C และการใช้อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 2 h ตามด้วยอุณหภูมิ 70°C จนเนื้อลำไยอบแห้งมีความชื้นสุดท้ายเท่ากับ $0.11 \pm 0.03 \text{ g}_{\text{water}} \text{ g}_{\text{dry matter}}^{-1}$ ด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดขนาดห้องปฏิบัติการ เพื่อหาสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมของเนื้อลำไย และผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงของสมบัติเชิงทัศนศาสตร์ของเนื้อลำไยอบแห้งด้วยค่าพารามิเตอร์ ค่าความสว่าง (L^* -value) ค่าความเป็นสีแดง-เขียว (a^* -value), ค่าความเป็นสีเหลือง-น้ำเงิน (b^* -value), ค่าความแตกต่างสีรวม (TCD) และดัชนีการเป็นสีน้ำตาล (BI) การวิเคราะห์แบบถดถอยเป็นวิธีที่ใช้หาความเหมาะสมของแบบจำลองเอมพิริคัลจำนวน 3 แบบจำลอง คือ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของของ Newton, Henderson and Pabis และ Page ผลการศึกษาพบว่าแบบของ Page สามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของเนื้อลำไยอบแห้งได้เหมาะสมที่สุด เนื่องจากให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) สูงที่สุด ในขณะที่ให้ค่าไคกำลังสอง (χ^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ที่ต่ำสุด ผลการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิแบบขั้นเดียว และการใช้อุณหภูมิแบบหลายขั้นของการอบแห้งเนื้อลำไยพบว่า การอบที่แห้งโดยใช้อุณหภูมิแบบหลายขั้นที่ใช้ความร้อน 80°C เป็นเวลา 2 h ตามด้วยอุณหภูมิ 70°C เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการรักษาสีของเนื้อลำไยอบแห้ง (L^* -value) และค่าความเป็นสีเหลือง-แดง (b^* -value) มากกว่าสภาวะอื่น แต่มีค่าสีแดง-เขียว (a^* -value) และมีค่า Browning Index ต่ำ ทำให้มีลักษณะปรากฏเป็นเนื้อลำไยสีทอง

คำสำคัญ: ลำไยอบแห้ง การอบแห้งด้วยลมร้อน การใช้อุณหภูมิแบบขั้นเดียว การใช้อุณหภูมิแบบหลายขั้น

Abstract

In this study, drying characteristics of peeled longan fruit underwent the laboratory-scaled-tray drying system. The drying conditions of single-stage drying temperature were 60, 70 and 80°C and multi-stage drying temperature for 80°C (60 min) followed by 70°C and 80°C (120 min) followed by 70°C. The drying rate of single-stage drying temperature required to reduce moisture content of peeled longan fruit from 8.64 ± 0.34 to $0.11 \pm 0.03 \text{ g}_{\text{water}} \text{ g}_{\text{dry matter}}^{-1}$ was $0.0078\text{-}0.0203 \text{ g}_{\text{water}} \text{ g}_{\text{dry matter}}^{-1} \cdot \text{min}$. Whereas the drying rate of multi-stage drying temperature were 0.0138 and $0.0189 \text{ g}_{\text{water}} \text{ g}_{\text{dry matter}}^{-1} \cdot \text{min}$. To evaluate the drying kinetics of peeled longan fruit, the obtained experimental data was applied to three mathematical models (Newton, Page and Henderson & Pabis) and the model with the best fit was determined. The results showed that the Page model could describe the drying characteristics at the most satisfactory level because it gave the highest coefficient of determination ($0.9361\text{-}0.9980$), the least chi-square ($0.0585\text{-}0.0005$), and the lowest root mean square error ($0.0193\text{-}0.2379$). The drying conditions multi-stage drying temperature for 80°C (120 min) followed by 70°C was suitable for color retention of dried peeled longan fruit. The results of the color changes in CIE- $L^*a^*b^*$ of dried peeled longan fruit, L^* -value and b^* -value was highest however a^* -value and Browning Index was low. This trend shows dried peeled longan fruit in gold color after drying.

1 บทนำ

ลำไย (*Dimocarpus longan* Lour.) เป็นไม้ผลที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจอันดับหนึ่งของภาคเหนือโดยเฉพาะอย่างยิ่งจังหวัดเชียงใหม่และลำพูน ผลผลิตของลำไยสามารถส่งออกไปจำหน่ายยังต่างประเทศทั้งในรูปของผลสด อบแห้ง แช่แข็ง และลำไยกระป๋อง ซึ่งสร้างรายได้ปีละหลายพันล้านบาท และมีแนวโน้มการส่งออกเพิ่มขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งลำไยอบแห้ง สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตรจึงได้ดำเนินการศึกษา (2558) ได้ดำเนินการศึกษาปริมาณการแปรรูปลำไยอบแห้ง และมูลค่าทางเศรษฐกิจในระหว่างปี 2555-2557 พบว่าการแปรรูปลำไยอบแห้งเท่ากับ 466,175 ton/year คิดเป็นมูลค่าทางเศรษฐกิจเท่ากับ 13,319 ล้านบาท การแปรรูปลำไยอบแห้งจึงเป็นแนวทางที่สำคัญอย่างยิ่งในการแก้ไขปัญหาหาราคาลำไยตกต่ำ หรือปริมาณลำไยล้นตลาด ดังนั้นจำเป็นต้องอาศัยองค์ความรู้อย่างมากในการศึกษาและหาแนวทางในการพัฒนากระบวนการอบแห้งเพื่อเป็นแนวทางปรับปรุงคุณภาพผล หรือสมบัติเชิงทัศนศาสตร์ของเนื้อลำไยสีทองอบแห้ง (Optical properties) ดังนั้นการศึกษาในส่วนที่เกี่ยวกับคุณลักษณะการอบแห้งเนื้อลำไยด้วยเทคนิคการใช้ใช้อุณหภูมิแบบหลายชั้นจึงเป็นแนวทางหนึ่งที่สำคัญในการพัฒนากระบวนการอบแห้งเพื่อเป็นแนวทางปรับปรุงคุณภาพผลเนื้อลำไยอบแห้งสีทอง

การทำนายจลนพลศาสตร์การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio, MR) ของเนื้อลำไยในระหว่างการอบแห้งด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical modeling) เป็นวิธีการที่ประหยัดได้ทั้งเวลาและค่าใช้จ่ายในการทดลอง สามารถวิเคราะห์หาข้อมูลจำนวนมากอย่างละเอียดซึ่งอาจจะเป็นข้อมูลที่วัดได้ยากหรือวัดไม่ได้เลยในห้องปฏิบัติการ (สีกมม, 2555) ปัจจุบันการจำลองจลนพลศาสตร์การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของผลิตภัณฑ์สามารถทำได้ด้วยวิธีการปรับเส้นโค้ง (Curve fitting) ให้ผลการจำลองข้อมูลสอดคล้องกับผลการทดลอง โดยสามารถจำแนกได้เป็นแบบจำลองเชิงเส้น (Linear model) แบบจำลองไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear model) และแบบจำลองพหุนาม (Polynomial model) เพื่อใช้การจำลองการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในระหว่างการอบแห้ง (ฤทธิชัย, 2556) การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสม ด้วยค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) สูงที่สุด และค่าไคกำลังสอง (χ^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ที่น้อยสุด (ฤทธิชัย, 2558) ดังนั้นวัตถุประสงค์ของโครงการวิจัยนี้ในการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิแบบชั้นเดียว และการใช้อุณหภูมิแบบหลายชั้นเพื่อเปรียบเทียบคุณลักษณะการอบแห้งของทั้ง 2 เทคนิคในรูปแบบของอัตราการอบแห้ง (Drying rate) ค่าพลังงานรวมจำเพาะในการอบแห้ง (SECs) และการเปลี่ยนแปลงของสมบัติเชิงทัศนศาสตร์ของเนื้อลำไยอบแห้งในระบบสี CIE ประกอบด้วย ค่า

ความสว่าง (L^* -value) ค่าความเป็นสีเหลือง-แดง (b^* -value) รวมถึงการวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมของจลนพลศาสตร์การอบแห้งเนื้อลำไยสีทองด้วยการใช้อุณหภูมิแบบชั้นเดียวและอุณหภูมิแบบหลายชั้น องค์ความรู้จากงานวิจัยนี้จะเป็นแนวทางให้ผู้ประกอบการหรือผู้ที่สนใจการนำบูรณาการในการทำแผนธุรกิจในการขยายการแปรรูปเนื้อลำไยอบแห้งสีทองต่อไป

2 อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 วัตถุดิบ

นำผลลำไยพันธุ์อีดอ ขนาดเกรดจัมโบ้ (รหัสเกรด AA) จำนวน 500 kg นำมาปอกเปลือก คว้านเมล็ด และเนื้อลำไยล้างน้ำสะอาด จากนั้นแช่ในสารละลาย KMS ความเข้มข้นที่ 1,000 ppm เป็นเวลา 10 min (พุทธินันท์ และคณะ, 2551) จากนั้นนำมาแบ่งบรรจุลงในถุงพลาสติกโพลีเอทิลีนที่มีซิปล็อคเก็บไว้ในตู้แช่เย็นที่อุณหภูมิประมาณ 10°C เพื่อรอการนำไปวิเคราะห์ข้อมูลในขั้นต่อไป

2.2 การวิเคราะห์ค่าความชื้นเริ่มต้นของเนื้อลำไย

การวิเคราะห์ค่าความชื้นเริ่มต้นของเนื้อลำไยโดยใช้เนื้อลำไยจำนวน 5.0 g ใส่ในถ้วยอะลูมิเนียมขนาด 3 oz ที่ผ่านการอบเพื่อไล่ความชื้น จำนวน 25 ตัวอย่าง และทำการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ จากนั้นนำไปอบแห้งด้วยตู้อบแห้งด้วยลมร้อน (500/108I, Memmert, Germany) ที่อุณหภูมิ $105 \pm 2^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 24 h (AOAC, 2010) จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งระบบดิจิทัล (CP2245, Sartorius Analytical, Switzerland) ความชื้นของเนื้อลำไย ($MC, \frac{g_{\text{water}}}{g_{\text{dry matter}}}$) ถูกคำนวณโดยใช้สมการต่อไปนี้

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

เมื่อ W_i และ W_f คือน้ำหนักเริ่มต้นของเนื้อลำไย (g) และน้ำหนักสุดท้ายของกากเนื้อลำไย (g) ตามลำดับ

2.3 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของเนื้อลำไย

การศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิแบบชั้นเดียวของการอบแห้งเนื้อลำไย และการใช้อุณหภูมิแบบหลายชั้น การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้น (MR) ของเนื้อลำไยอบแห้ง ด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบภาคถูกออกแบบและสร้างโดย สาขาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ซึ่งมีส่วนประกอบที่สำคัญ ได้แก่ ระบบสร้างลมร้อนซึ่งประกอบด้วยขดลวดไฟฟ้าขนาด 1.1 kW จำนวน 3 ขด และพัดลมซึ่งถูกควบคุมด้วยอุปกรณ์ปรับความเร็ว (DVUS-940W1, Panasonic Corp., Japan) ควบคุมอุณหภูมิของ

อากาศร้อนด้วยเครื่องควบคุมอุณหภูมิระบบ PID (TTM J4/J5, Toho, Japan) ถาดสำหรับวางตัวอย่างติดตั้งตาข่าย (CDR-3, CST, China) สำหรับวัดและบันทึกค่าน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงของตัวอย่างเนื้อลำไย และบันทึกค่าผ่านจากช่องสัญญาณ RS-485 ซึ่งเชื่อมต่อกับอุปกรณ์แปลงสัญญาณและเครื่องคอมพิวเตอร์ สำหรับบันทึกข้อมูล โดยข้อมูลที่ถูกบันทึกค่าประกอบด้วย น้ำหนักของตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงไปในระหว่างการอบแห้ง ซึ่งถูกบันทึกทุกๆ 5 min นำข้อมูลที่ได้ไปคำนวณในรูปแบบของค่าความชื้น และอัตราส่วนความชื้นในตามสมการที่ (2) ตามลำดับ จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาแบบจำลองที่เหมาะสมด้วยเทคนิคการวิเคราะห์แบบถดถอย (ฤทธิ์ชัย และคณะ 2556)

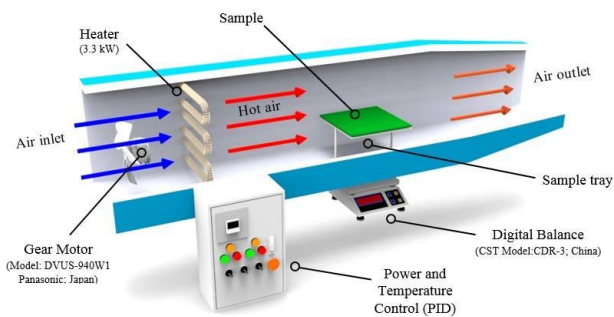


Figure 1. Diagram of the tray drying system.

อัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งของเนื้อลำไย 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 นำเนื้อลำไยสดมีน้ำหนักเริ่มต้น 300 ± 15 g อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาด (Figure 1) จากความชื้นเริ่มต้นจนถึงความชื้นสุดท้ายที่ $0.11 \pm 0.03 \frac{\text{g}_{\text{water}}}{\text{g}_{\text{dry matter}}}$

2.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้ง

แบบจำลองการอบแห้งที่นิยมใช้ในการศึกษาอาหารหรือวัสดุทางการเกษตร ได้แก่ แบบจำลองในรูปของสมการเอมพิริคัล (empirical equation) เช่น แบบจำลอง Newton, Page และ Henderson and Pabis ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ดัง Table 1 การวิเคราะห์หาค่าคงที่ต่างๆ ของแบบจำลองการอบแห้งใช้เทคนิคการวิเคราะห์แบบสมการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear regression) ด้วยวิธีปรับเส้นโค้ง (Doymaz and İsmail, 2011; Assawarachan, 2013; Unhapitpong, et al., 2015; ฤทธิ์ชัย และคณะ, 2558)

Table 1 Mathematical models given by various authors.

Model name	Model equation
Newton	$MR = \exp(-k t)$ (3)
Page	$MR = \exp(-k t^n)$ (4)
Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-k t)$ (5)

การวิเคราะห์รูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมใช้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงสุด (R^2), ค่าโคกำลังสอง (χ^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) เป็นดัชนีบ่งบอกความแม่นยำในการทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไป ดังแสดงใน Eq. (6)-(7)

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{\text{exp}, i} - MR_{\text{pre}, i})^2}{N - n_p} \quad (6)$$

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

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

2.5 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงทัศนศาสตร์ของเนื้อลำไยอบแห้ง

วัดค่าสมบัติเชิงทัศนศาสตร์ของเนื้อลำไยสดด้วยเครื่อง CR-400 chroma meter (Model: Konica Minolta; Japan) แสดงตาม Figure 2. วัดค่าความสว่าง (L^* -value) ค่าความเป็นสีแดง-เขียว (a^* -value), ค่าความเป็นสีเหลือง-น้ำเงิน (b^* -value) จากนั้นนำค่าวิเคราะห์ค่าความแตกต่างสีโดยรวม (TCD) เมื่อเปรียบเทียบการสีเนื้อลำไยสด ตามสมการที่ (8)

$$TCD = \sqrt{(L^* - L_0)^2 + (a^* - a_0)^2 + (b^* - b_0)^2} \quad (8)$$

เมื่อค่า L_0 , a_0 และ b_0 คือค่าความสว่าง, ค่าความเป็นสีแดง-เขียว ค่าความเป็นสีเหลือง-น้ำเงินของเนื้อลำไยสด และ L^* , a^* และ b^* คือค่าความสว่าง, ค่าความเป็นสีแดง-เขียว ค่าความเป็นสีเหลือง-น้ำเงินของเนื้อลำไยอบแห้ง



Figure 2. Photography of CR-400 chroma meter (Konica Minolta; Japan).

2.6 การวิเคราะห์หาค่า Browning index (BI)

นำตัวอย่างลำไยแห้งบดละเอียด (ลำไยสดจำนวน 10 g และลำไยแห้ง 3-5 g ใส่ในขวดรูปชมพู่เติม 2% acetic acid ปริมาตร 30 ml ทิ้งไว้ 10 min นำมาปั่นละเอียด นาน 30 sec นำไปกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 4 จากนั้นนำสารละลายที่กรองได้ไปวัดค่าการดูดซึมแสงที่ความยาวคลื่นของแสงที่ 420 nm โดยเทียบกับสารละลาย 2% acetic acid เป็นสารมาตรฐาน (Baloch และคณะ; 1973)

2.7 การวิเคราะห์พลังงานจำเพาะในการอบแห้ง (SECs)

การวิเคราะห์ค่าพลังงานจำเพาะในการอบแห้ง หรือ Specific energy consumption (SECs) ของการอบแห้งเนื้อลำไยด้วยเครื่องวัดค่าพลังงานไฟฟ้า รุ่น KM-07 บริษัท Primus ประเทศไทย

3 ผลและวิจารณ์

3.1 คุณลักษณะเนื้อลำไยอบแห้ง

การวิเคราะห์ค่าความชื้นเริ่มต้นของเนื้อลำไยมีค่าเท่ากับ $1.72 \pm 0.03 \text{ g}_{\text{water}} \text{ g}_{\text{dry matter}}^{-1}$ และสมบัติเชิงทัศนศาสตร์ในระบบสี CIE ด้วยค่าความสว่าง (L^* -value) ค่าความเป็นสีแดง (a^* -value) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^* -value) ของเนื้อลำไยสดเท่ากับ 36.4 ± 0.3 , -1.8 ± 0.2 และ 6.5 ± 0.4 ตามลำดับ จากนั้นดำเนินศึกษาคุณลักษณะการอบแห้งของเนื้อลำไยอบแห้งในสภาวะต่างๆ ผลการศึกษาพบว่าเส้นโค้งของการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเนื้อลำไยในระหว่างการอบแห้งในระหว่างการใช้อุณหภูมิแบบขั้นเดียว (Single-stage drying) และอุณหภูมิแบบหลายขั้น (Multi-stage drying) ตามที่แสดงใน Figure 3 และ Figure 4 ตามลำดับ ผลการศึกษาเส้นโค้งของการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเนื้อลำไยในระหว่างการอบแห้งด้วยการใช้ Single-stage drying จากความชื้นเริ่มต้นจนเหลือความชื้นสุดท้ายเท่ากับ $0.0554 \pm 0.003 \text{ g}_{\text{water}} \text{ g}_{\text{dry matter}}^{-1}$ มีอัตราการอบแห้งเท่ากับ 0.0078, 0.0152 และ $0.0230 \text{ g}_{\text{water}} \text{ g}_{\text{DM}}^{-1} \cdot \text{min}$ และมีพลังงานเฉพาะในการอบแห้ง (SECs) เท่ากับ 25.36, 23.17 และ $22.90 \text{ kJ kg}_{\text{water}}^{-1}$ ที่อุณหภูมิ 60, 70 และ 80°C ตามลำดับ

Table 2 Drying rate and SECs of of dried peeled longan fruit.

Drying condition	Drying rate ($\text{g}_{\text{water}} \text{ g}_{\text{DM}}^{-1} \cdot \text{min}$)	SECs ($\text{kJ/kg}_{\text{water}}$)
60°C	0.0078	25.36
70°C	0.0152	23.17
80°C	0.0230	22.90
80°C (1 h) 70°C (9.0h)	0.0138	17.64
80°C (2 h) 70°C (6.5 h)	0.0189	15.01

จากการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น แต่ค่า SECs ก็มีค่าลดลง เนื่องจากการอบแห้งเนื้อลำไยที่อุณหภูมิต่ำนั้นใช้เวลาในการอบแห้งที่นานจนส่งผลให้มีค่า SECs มากกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงที่ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่า และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น 10°C พบว่าอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น 46.10% และ 76.27% เมื่ออุณหภูมิของระบบเพิ่มขึ้น 60 เป็น 70°C และเพิ่มขึ้น 70 เป็น 80°C ตามลำดับ ในขณะที่อัตราการอบแห้งของการอบแห้งเนื้อลำไยด้วยใช้อุณหภูมิแบบ Multi-stage drying เท่ากับ 0.0138 และ $0.0189 \text{ g}_{\text{water}} \text{ g}_{\text{DM}}^{-1} \cdot \text{min}$ ที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 1 h ตามด้วยอุณหภูมิ 70°C และการใช้อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 2 h ตามด้วยอุณหภูมิ 70°C จนเนื้อลำไยอบแห้งตามลำดับ (Table 2) จากผลการศึกษาพบว่าค่า SECs ของการอบแห้งด้วยการใช้ Single-stage drying มีค่ามากกว่าการใช้อุณหภูมิแบบ Multi-stage drying ทั้งสองสภาวะเนื่องจากเนื้อลำไยมีค่าความชื้นเริ่มต้นที่สูง การเคลื่อนที่ของของเหลวอันเนื่องจากการแพร่ของของเหลวบนผิวรูปทรงภายในโครงสร้างเซลล์ของเนื้อลำไย (Surface diffusion) การเคลื่อนที่ของไอน้ำในรูปแบบของการแพร่เนื่องจากความแตกต่างของความดันไอ (vapor diffusion) ดังนั้นเมื่อเนื้อลำไยได้รับอุณหภูมิความร้อนที่อุณหภูมิสูงในช่วงเริ่มต้นทำให้เกิดความแตกต่างของความดันภายในโครงสร้างเซลล์และที่บริเวณผิวนอกเกิดความดันมากกว่าปกติส่งผลต่อมวลความชื้นที่เคลื่อนที่ผ่านออกไปอย่างรวดเร็วรวมทั้งบริเวณผิวของเนื้อลำไย เนื่องจากสารละลายในเนื้อลำไยมีลักษณะที่เป็นของเหลวความหนืดสูงจึงเกิดเป็นลักษณะที่เคลือบที่ผิวนอกของเนื้อลำไยเรียกปรากฏการณ์นี้ว่าปรากฏการณ์การปัมของเหลว (ผดุงศักดิ์, 2550)

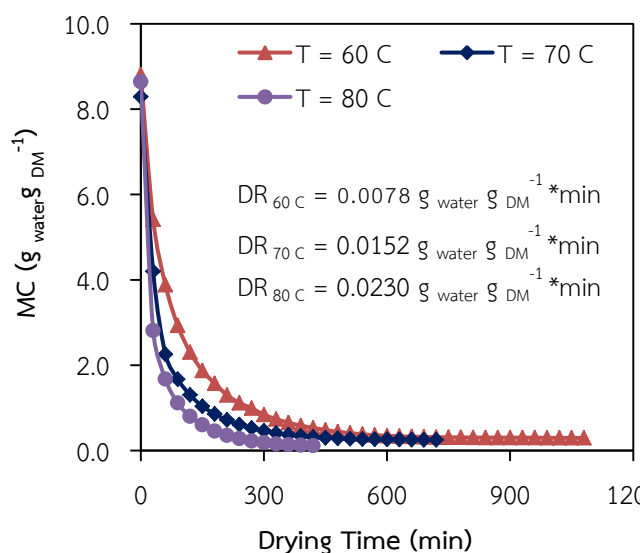


Figure 3 Effects of single-stage drying temperature on the moisture content of peeled longan fruit change at any time.

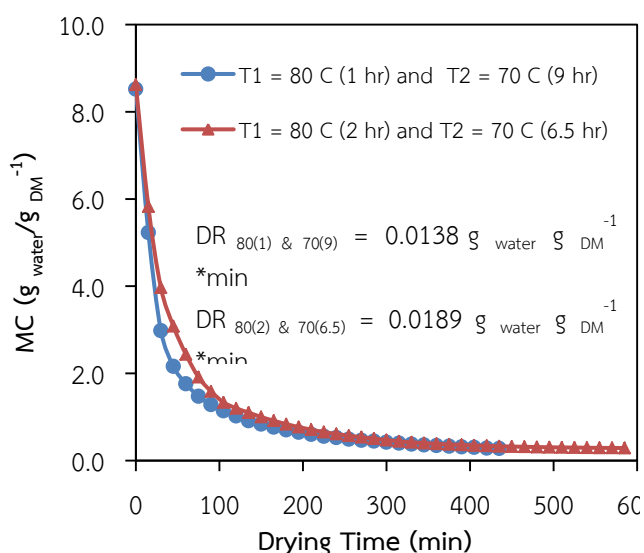


Figure 4. Effects of multi-stage drying temperature on the moisture content of peeled longan fruit change at any time.

ปรากฏการณ์ดังกล่าวมีลักษณะเดียวกับการแพร่ของมวล ความชื้นจากพลังงานความร้อน จากนั้นมวลความชื้นของน้ำจะ ถูกถ่ายเทออกมาที่ผิวของเนื้อลำใยและเปลี่ยนเป็นไอน้ำและถูก เทถ่ายไปกับตัวกลางอากาศร้อน ดังนั้นเมื่อลดอุณหภูมิลงก็จะ ส่งผลให้มวลความชื้นในโครงสร้างภายในเซลล์ค่อยๆ แพร่จากที่ผิว ของเนื้อลำใย และการใช้อุณหภูมิต่ำในช่วงที่สองสามารถลดการ เกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลโดยไม่ใช้เอนไซม์ได้

3.2 การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ผลการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ หรือแบบจำลอง เอมพิริคัลของการอบแห้งเนื้อลำใยโดยใช้อุณหภูมิแบบขั้น เดียวและอุณหภูมิแบบหลายขั้นจนเนื้อลำใยอบแห้งมีความชื้น สูดท้ายเท่ากับ $0.11 \pm 0.03 \text{ g water/g dry matter}$ ซึ่งประกอบไปด้วย แบบจำลองของ Newton, Page และ Henderson and Pabis ซึ่งเป็นแบบจำลองไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear model)

การวิเคราะห์ความเหมาะสมของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ เหมาะสมในการทำนายการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของ เนื้อลำใยอบแห้งได้เหมาะสมที่สุด เนื่องจากให้ค่าสัมประสิทธิ์การ ตัดสินใจ (R^2) สูงที่สุด ในขณะที่ให้ค่าโคค่ากำลังสอง (χ^2) และค่า รากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ที่ต่ำสุด (Unhapipatpong, *et al.*, 2015; Doymaz and İsmail, 2011, Assawarachan, 2013 และฤทธิชัย, 2558)

Table 3 Regression coefficients of thin layer drying models for single-stage drying temperature and multi-stage temperature peeled longan.

Drying Model	Drying Condition (°C)	Drying Model Constants		R^2	$\chi^2 \times 10^{-3}$	RMSE
Newton	60	$k = 0.0023$		0.9748	1.97	0.0438
	70	$k = 0.0035$		0.9842	1.54	0.0386
	80	$k = 0.0068$		0.9955	0.58	0.0233
	80 ¹ and 70 ⁹	$k = 0.0203$		0.9361	58.5	0.2379
	80 ² and 70 ^{6.5}	$k = 0.0273$		0.9761	3.01	0.0630
Page	60	$k = 0.0049$	$n = 0.8777$	0.9927	1.55	0.0384
	70	$k = 0.0071$	$n = 0.8740$	0.9841	1.11	0.0321
	80	$k = 0.0073$	$n = 0.9997$	0.9976	0.43	0.0193
	80 ¹ and 70 ⁹	$k = 0.0926$	$n = 0.6324$	0.9408	15.34	0.1195
	80 ² and 70 ^{6.5}	$k = 0.1392$	$n = 0.5743$	0.9863	1.32	0.0412
Henderson and Pabis	60	$k = 0.0023$	$a = 0.9782$	0.9905	2.01	0.0437
	70	$k = 0.0034$	$a = 0.9747$	0.9923	1.53	0.0377
	80	$k = 0.0070$	$a = 0.9989$	0.9980	0.67	0.0251
	80 ¹ and 70 ⁹	$k = 0.9192$	$a = 0.9194$	0.9573	30.24	0.1681
	80 ² and 70 ^{6.5}	$k = 0.0250$	$a = 0.9394$	0.9792	2.76	0.0602

แบบจำลองของ Page มีความเหมาะสมในการทำนายมากที่สุด เนื่องจากมีค่า R^2 ในช่วง 0.9408 - 0.9976 ซึ่งมีค่ามากกว่าแบบจำลอง และค่า χ^2 และ RMSE มีค่าเท่ากับ 0.000043-0.0015 และ 0.0193-0.1195 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าแบบจำลองเอมพิริคัลของ Newton และ Henderson and Pabis สอดคล้องกับรายงานวิจัยของการศึกษาผลกระทบของต่ออุณหภูมิศาสตร์การอบแห้งจากเนื้อมะพร้าว, ดอกเก็กฮวย ใบโหระพา และ มะเขือเทศแผ่น พบว่าแบบจำลองเอมพิริคัล Page ที่เหมาะสมในการทำนายอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้น (ฤทธิ์ชัย; 2558, ปองพลและคณะ, 2556 และ Abano, et al.2011) ปัจจุบันมีงานวิจัยที่ศึกษาแบบจำลองเอมพิริคัลที่ใช้ในการทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของวัตถุดิบเกษตรเป็นจำนวนมาก และแบบจำลองเอมพิริคัลด้วยการปรับโค้ง (Curve fitting) แบบจำลองเอมพิริคัลแบบลูกผสม (Hybrid model) ซึ่งเป็นการรวมเอาตัวแปรของแบบจำลองอื่นเข้าในใช้ร่วมการทำนาย เช่น Midilli et al. และ Logarithmic อย่างไรก็ตามแบบจำลองเอมพิริคัลแบบลูกผสมนั้นมีข้อจำกัดที่สำคัญในด้านของการพัฒนาสู่เป็นแบบจำลองทั่วไป เนื่องจากมีการปรับโค้งของตัวแปรจำนวนมาก ส่งผลให้ไม่สามารถหาค่าความสัมพันธ์ของตัวแปรกับสถานะต่างๆ ได้ ดังนั้นผลการศึกษาของการวิจัยนี้จึงเลือกแบบจำลองแบบเดียว

(Single model) และสามารถหาค่าความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ต่อสถานะการอบแห้งได้ สามารถนำไปใช้ในการประยุกต์กับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการทำนายอัตราการอบแห้ง และเวลาในการอบแห้งได้อย่างเหมาะสม ซึ่งเป็นข้อมูลพื้นฐานทางวิศวกรรมที่สามารถนำไปใช้ในการพัฒนาระบบการควบคุมการอบแห้งได้อย่างเหมาะสม

3.1. ผลของอุณหภูมิแบบขั้นเดียวและอุณหภูมิแบบหลายขั้นในการต่อสมบัติเชิงทัศนศาสตร์ของเนื้อลำไยอบแห้ง

กลไกการเปลี่ยนแปลงสีของเนื้อลำไยในระหว่างกระบวนการให้อบแห้ง และพฤติกรรมเคลื่อนที่ของมวลความชื้นเนื่องจากในเนื้อลำไยมีน้ำเป็นองค์ประกอบประมาณ 81.5-85.2% w w⁻¹ ซึ่งเป็นของเหลวในเนื้อลำไยเป็นสารละลายที่มีองค์ประกอบทางเคมีหลายชนิด มีค่าความหนืดปรากฏที่สูงและมีสมบัติทางกระแสวิทยา (Rheological properties) ในลักษณะของเหลวประเภทนอนนิวโทเนียน (Non-newtonian) มีลักษณะเป็นของเหลวที่ขึ้นหนืดจัดเป็นของเหลวในกลุ่มเดียวกับ Psedopastic มีค่าความหนืดปรากฏที่สูงมาก และต้องใช้แรงจากภายนอกในปริมาณมากในกระตุ้นให้เกิดการเคลื่อนที่ของมวลความชื้นในโครงสร้างเซลล์ชั้นในแพร่ออกสู่ผิวนอก รายงาน

วิจัยของ Yunchalad *et al.* (2008) พบว่าส่วนประกอบของน้ำลำไยสกัดด้วยเทคนิคกรองแบบ microfiltration และ reverse osmosis เป็นสารละลายคาร์โบไฮเดรต ซึ่งประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคส (Glucose) ปริมาณ 2.77% น้ำตาลฟรุคโตส (Fructose) ปริมาณ 3.91% ซูโครส (Sucrose) ปริมาณ 14.21% และปริมาณเกลือแร่ ซึ่งเป็นสารประกอบตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงสีน้ำตาล (Browning reaction) กลไกการเปลี่ยนแปลงสีของเนื้อลำไยอบแห้งจึงเกิดจากผลกระทบของสมบัติทางกระแสวิทย์ที่ใช้ในการเคลื่อนย้ายของเหลวในกลุ่ม Psedoplastic ซึ่งเกิดแรงเสียดทานระหว่างเนื้อเยื่อเซลล์ในระหว่างการเคลื่อนที่ของเหลวจากโครงสร้างเนื้อเยื่อภายในออกมาที่ผิวเนื้อลำไยสูง ดังนั้นในสภาวะแวดล้อมที่มีอุณหภูมิต่ำ ระบบมีการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลความชื้นระหว่างของเหลวในโครงสร้างเนื้อเยื่อชั้นในของเนื้อลำไยด้วยอัตราการแพร่ที่ต่ำมาก สารละลายที่ถูกแพร่ออกมาก่อนในช่วงแรกเกิดการถ่ายเทมวลความชื้นไปกับอากาศร้อนในระหว่างการอบแห้งนั้น และสารละลายมีความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้นเกิดการตกผลึกและเปลี่ยนแปลงเป็นของแข็งเคลือบที่ผิวเนื้อลำไย สารที่เคลือบดังกล่าวมีความเข้มข้นของสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลในปริมาณมากส่งผลให้อัตราการเกิดเปลี่ยนแปลงสีในลักษณะที่เป็นสีดำคล้ำ (Dark color) และมีเนื้อสัมผัสที่แข็ง (Hardness)

แผนผังการเปลี่ยนแปลงสีของเนื้อลำไย (Figure 5) แสดงกลไกการเปลี่ยนแปลงสีของลำไยที่อุณหภูมิต่ำจะเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาของการเคลื่อนที่ของโมเลกุลความชื้นของสารละลายในเนื้อลำไยที่เคลื่อนที่ผ่านชั้นอนุภาคของกากเนื้อลำไยเกิดเป็นปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) รวมถึงปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล (Browning reaction) ชนิดที่ไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ (Non enzymatic browning reaction) เกิดขึ้นระหว่างน้ำตาลรีดิวซ์ (Reducing sugar) กับกรดแอมิโน โปรตีน หรือสารประกอบไนโตรเจนอื่นๆ โดยมีความร้อนเร่งปฏิกิริยา ในขณะที่การกระตุ้นภายใต้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ (การใช้อุณหภูมิแบบขั้นเดียวที่ 60 และ 70°C) เนื้อลำไยตัวอย่างได้รับความร้อนเป็นเวลานาน และเกิดการเคลื่อนที่หรือการแพร่ของมวลสารละลาย (Diffusion mass flow) ที่มีค่าความหนืดสูงอย่างช้าๆ ส่งผลให้เกิดแรงเสียดทานระหว่างเซลล์ในปริมาณมากจนเกิดความเสียหายที่ Lenticel หรือเนื้อเยื่อ Epidermis และผนังเซลล์เกิดการฉีกขาดที่ผิวและปลายผลที่เป็นทางออกของน้ำส่งผลให้ผนังเซลล์เกิดการเสียหายที่ผนังเซลล์ และโครงสร้างเนื้อเยื่อที่ถูกทำลายจะส่งผลให้เซลล์เกิดการอ่อนตัว เสียสภาพของโครงสร้างเซลล์ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงสีของเนื้อลำไยของการอบแห้งแบบขั้นเดียวของการอบแห้งเนื้อลำไยที่ 60 และ 70°C จึงเป็นผลของการเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล (Browning reaction) ชนิดที่เกี่ยวข้องและไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ หรือปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) จนมีลักษณะสีดำคล้ำ

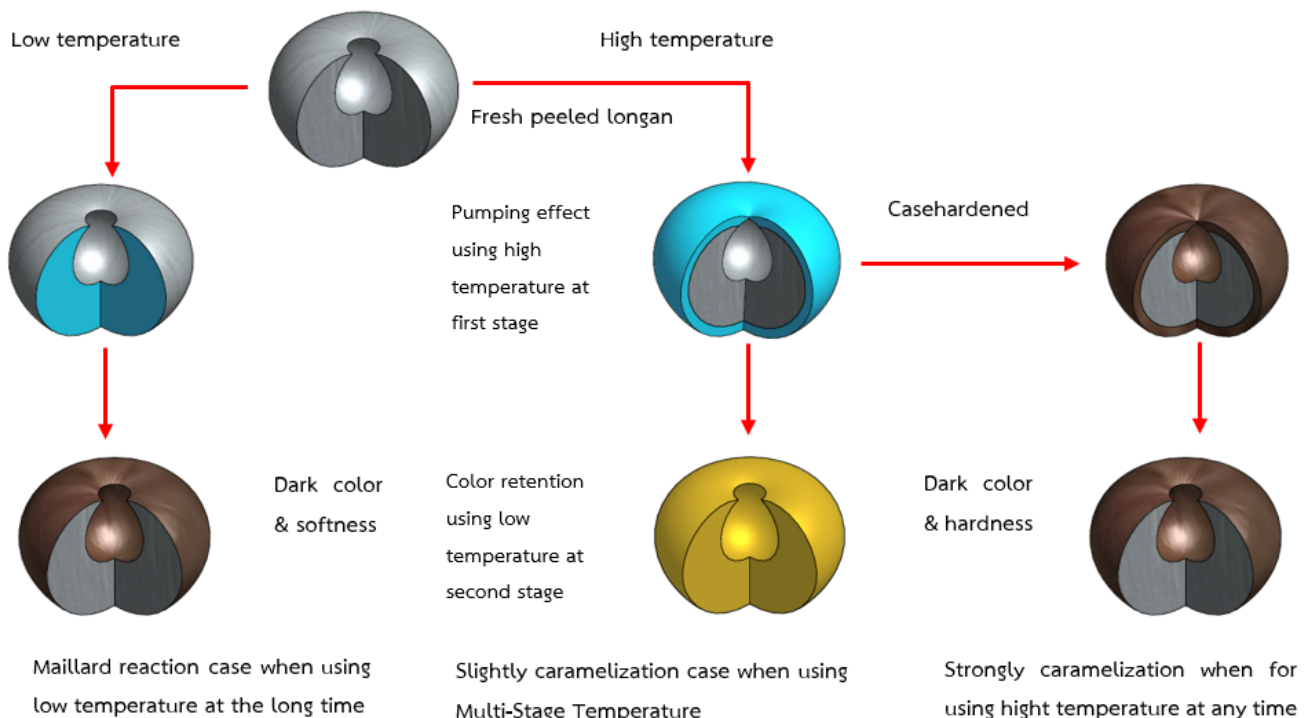


Figure 5. Comparative of mechanism of optical properties change of peeled longan using single-stage drying temperature and multi-stage drying temperature.



60°C



70°C



80°C

Figure 6 Photography of dried peeled longan fruit using single-stage drying temperature (60, 70 and 80°C).



80°C (1 h) 70°C



80°C (2 h) 70°C

Figure 7 Photography of dried peeled longan fruit using multi-stage drying temperature at 80°C (1 h.) follows by 70°C and 80°C (2 h.) follows by 70°C.

ผลของการเคลื่อนที่ของมวลสารละลายที่มีความหนืดสูงด้วยการแพร่อย่างช้าๆ จะส่งผลให้เกิดการทำลายโครงสร้างเซลล์จนเสียหาย เกิดเป็นเนื้อสัมผัสที่อ่อน (Dark color and softness) ในขณะที่การอบแห้งใช้อุณหภูมิสูงในช่วงเริ่มต้นกับเนื้อลำใยที่มีค่าความชื้นเริ่มต้นสูงทำให้เกิดความแตกต่างของความดันภายในโครงสร้างเซลล์และที่บริเวณผิวนอกเกิดความดันมากกว่าปกติส่งผลต่อมวลความชื้นที่เคลื่อนที่ผ่านออกไปอย่างรวดเร็วรวมทั้งบริเวณผิวของเนื้อลำใย เนื่องจากสารละลายในเนื้อลำใยมีลักษณะที่เป็นของเหลวความหนืดสูงจึงเกิดเป็นลักษณะที่เคลือบที่ผิวของเนื้อลำใยเรียกปรากฏการณ์นี้ว่าปรากฏการณ์การบีบของเหลว (Pump effect) การเกิดปรากฏการณ์ดังกล่าวจะเกิดขึ้นอยู่กับการสร้างความร้อนและแรงกลในระหว่างการอบแห้ง เช่นการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟที่มีกลไกการกระตุ้นความร้อนจากภายในโครงสร้างเซลล์ (ผดุงศักดิ์, 2551) การอบแห้งระบบสุญญากาศ (Orikasa et al., 2014) ซึ่งใช้แรงกลจากความดันเร่งการแพร่ของมวลน้ำเกิดปรากฏการณ์การบีบของเหลว การอบแห้งระบบไมโครเวฟสุญญากาศซึ่งร่วมการเกิดความร้อนจากภายในและแรงดันเชิงกลจน

เกิดปรากฏการณ์การบีบของเหลวของเหลวอย่างฉับพลันจนผลิตภัณฑ์เกิดการฟองตัว ดังนั้นการที่อบแห้งเนื้อลำใยที่อุณหภูมิสูงจะส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์การบีบของเหลวออกที่ผิวของเนื้อลำใยซึ่งของเหลวที่ออกจามีลักษณะเป็นของเหลวที่ขึ้นเหนียวเคลือบที่ผิวของเนื้อลำใย ในกรณีที่ให้ความร้อนสูงตลอดการอบแห้งของเหลวที่แพร่ออกมาเคลือบเกิดการเปลี่ยนแปลงทางชีวภาพเคมีอย่างรุนแรง เร่งการเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ (Non enzymatic browning reaction) ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของโมเลกุลน้ำตาลด้วยความร้อนสูง และมีการเกิดพอลิเมอร์ (Polymerization) ของสารประกอบคาร์บอนได้เป็นสารที่มีกลิ่นและรสชาติเฉพาะตัว เรียกปฏิกิริยาว่าคาราเมลไรเซชัน (Caramelization) ส่งผลให้สีที่ผิวเนื้อลำใยเป็นสีดำคล้ำและเมื่อการเกิดปรากฏการณ์การบีบภายใต้อุณหภูมิสูงเป็นเวลานานๆ ความเข้มข้นของสารละลายในเนื้อลำใยที่มีน้ำตาลจะเพิ่มขึ้นสูงขึ้น เนื่องจากการสูญเสียน้ำในการระเหยเกิดขึ้นของแข็งบนผิววัสดุ เมื่อเกิดเป็นชั้นของแข็งที่ผิวของวัสดุ (Casehardened) น้ำจะไม่สามารถเคลื่อนที่ออกจากภายในวัสดุได้ อัตราการอบแห้งจึงลดลงอย่างรวดเร็ว ความดัน

ภายในวัสดุจะเพิ่มสูงขึ้นจนกระทั่งผิววัสดุไม่สามารถรองรับแรงดันที่เกิดขึ้นเกิดการแข็งตัวและเกิดเป็นรอยแตก (สั๊กมน, 2555) การใช้อุณหภูมิแบบขั้นเดียวที่อุณหภูมิต่ำก็อาจจะส่งผลให้

ของเนื้อลำไยเป็นสีดำนอกจากนี้เนื่องจากปฏิกิริยาเมลลาร์ดแต่มีเนื้อสัมผัสที่อ่อนนุ่มเหมาะกับการรับประทาน

Table 4 Impacts of single-stage drying and multi-stage drying of optical properties (CIE-L*a*b*) and browning Index (BI) of dried peeled longan fruit.

Drying condition	L*-value	a*-value	b*-value	TCD	Browning Index
60°C	39.4±2.6 ^c	16.1±1.9 ^b	20.5±3.4 ^b	22.92±1.22 ^{ab}	22.92±1.22 ^{ab}
70°C	31.6±1.8 ^b	22.3±1.4 ^c	17.6±1.9 ^{ab}	26.96±2.74 ^b	26.96±2.74 ^b
80°C	17.5±3.1 ^a	36.4±2.6 ^d	14.6±2.7 ^a	43.38±4.51 ^c	43.38±4.51 ^c
80°C (1 h) 70°C (9.0 h)	41.2±2.1 ^d	13.2±1.7 ^b	22.3±2.6 ^b	22.31±1.45 ^a	22.31±1.45 ^a
80°C (2 h) 70°C (6.5 h)	45.3±1.9 ^d	4.3±1.7 ^a	34.1±3.1 ^c	20.64±0.85 ^a	20.64±0.85 ^a

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

ในขณะที่การใช้อุณหภูมิสูงก็จะทำให้เกิดสีดำนอกจากปฏิกิริยาเมลลาร์ดและเกิดการเกิดเป็นชั้นของแข็งที่ผิวของวัสดุ แต่มีอัตราการอบแห้งที่เร็วกว่าการใช้อุณหภูมิต่ำ ดังนั้นจึงเกิดการพัฒนาคณิตการอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิแบบหลายขั้นโดยการใช้อุณหภูมิขั้นตอนแรกใช้อุณหภูมิสูงเพื่อเร่งการแพร่ของมวลความชื้นหรือสารละลายในเนื้อลำไยออกมาที่ผิวเนื้อลำไยโดยไม่ส่งผลต่อการเร่งให้เกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดและสีดำนอกจากนั้นลดอุณหภูมิลงในระดับที่สามารถรักษาสมดุลการถ่ายเทมวลความชื้นของสารละลายที่ผิวเนื้อลำไยและระเหยออกจากเนื้อลำไย โดยไม่ให้เกิดเป็นชั้นของแข็งที่ผิวของวัสดุ

ภาพถ่ายของเนื้อลำไยอบแห้งด้วยวิธีการใช้อุณหภูมิแบบขั้นเดียวของการอบแห้งเนื้อลำไยที่ 60, 70 และ 80°C และการใช้อุณหภูมิแบบหลายขั้น โดยการใช้อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 1 h ตามด้วยอุณหภูมิ 70°C และการใช้อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 2 h ตามด้วยอุณหภูมิ 70°C ตามลำดับ (Figure 6 และ Figure 7) Table 4 แสดงสมบัติเชิงทัศนศาสตร์ของเนื้อลำไยอบแห้งของการอบแห้งแบบต่างๆ ของระบบสี CIE-L*a*b* จากผลการวัดค่าสีพบว่าค่าความแตกต่างสีโดยรวม (TCD) ของการอบแห้งเนื้อลำไยด้วยวิธีการใช้อุณหภูมิแบบขั้นเดียวของการอบแห้งเนื้อลำไยที่ 60, 70 และ 80°C มีค่าเท่ากับ 22.92±1.22, 26.96±2.74 และ 43.38±4.51 ตามลำดับ พบว่าเนื้อลำไยอบแห้งที่อุณหภูมิที่ 60°C มีค่า TCD ที่น้อยที่สุด ลักษณะสีปรากฏที่เหมาะสมของเนื้อลำไยสีทอง ควรซึ่งมีค่าความสว่าง (L*-value) และ ค่าความเป็นสีเหลือง (b*-value) สูงแต่มีค่าความเป็นสีแดง (a*-value) ที่ต่ำ สอดคล้องกับการสมบัติทางสมบัติเชิงทัศนศาสตร์ของเนื้อลำไยอบแห้งที่อุณหภูมิที่ 60°C มีค่า L*-value และค่า b*-value เท่ากับ 39.4±2.6 และ 20.5±3.4 มีค่ามากกว่าสภาวะวิธีการใช้อุณหภูมิแบบขั้นเดียวของการอบแห้งเนื้อลำไยที่ 70 และ 80°C แต่มีค่าความเป็นสีแดง (a*-value) น้อยที่สุดเท่ากับ 16.1±1.9 ตามลำดับ ในขณะที่สมบัติเชิงทัศนศาสตร์ของเนื้อลำไยของเนื้อลำไยอบแห้งของการใช้อุณหภูมิแบบหลายขั้น

สามารถลดการเปลี่ยนแปลงสีได้ดีกว่าการใช้วิธีการใช้อุณหภูมิแบบขั้นเดียว (Jino and Assawarachan; 2015). โดยการใช้อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 1 h ตามด้วยอุณหภูมิ 70°C และการใช้อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 2 h ตามด้วยอุณหภูมิ 70°C มีค่า L*-value และ b*-value ที่สูง แต่มีค่า a*-value ต่ำ เมื่อเปรียบเทียบปริมาณค่า Browning Index มีความสอดคล้องกับคุณภาพสีของเนื้อลำไยอบแห้งสีทอง พบว่าเนื้อลำไยอบแห้งที่อุณหภูมิที่ 60°C และเนื้อลำไยอบแห้งของการใช้อุณหภูมิแบบหลายขั้น มีค่า Browning Index ในช่วง 20.64±0.85 ถึง 22.92±1.22 และไม่มี ความแตกต่างทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ในขณะที่เนื้อลำไยอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 °C มีค่า Browning Index เท่ากับ 43.38±4.51 ซึ่งเป็นค่าปริมาณสูงสุด รวมถึงมีค่า L*-value และ b*-value ที่ต่ำที่สุดและมีค่า a*-value สูงสุด ดังนั้นลักษณะของสีเนื้อลำไยที่อุณหภูมิ 80°C จึงมีลักษณะเป็นสีเหลือง-แดง และคล้ำ เนื่องจากการอบแห้งที่อุณหภูมิที่ 80°C นั้นเป็นการให้พลังงานในการถ่ายโอนโมเมนตัมของมวลความชื้นของของเหลวในเนื้อลำไยมากกว่าความต้องการของระบบในการแพร่ความชื้น ส่งผลให้มีพลังงานความร้อนส่วนเกินจากระบบไปเร่งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลจากเอนไซม์ และปฏิกิริยาเกี่ยวข้องกับเอนไซม์ (non enzymatic browning reaction) เช่น คาราเมลไรเซชัน (caramelization) ส่งผลให้เนื้อลำไยมีสีคล้ำและแดง ปรากฏการณ์ดังกล่าวเป็นไปตามกฎของเทอร์โมไดนามิก หรือกฎการอนุรักษ์พลังงานสามารถอธิบายได้ตามนี้ การให้พลังงานเข้าสู่ระบบมากกว่าปริมาณพลังงานที่ต้องการใช้ในกระบวนการถ่ายเทมวลความชื้นจากโครงสร้างเซลล์ชั้นในของเนื้อลำไยออกสู่ชั้นผิวของเซลล์ พลังงานส่วนเกินดังกล่าวจะถูกเปลี่ยนแปลงเป็นพลังงานความร้อนที่เร่งการเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับ การอบแห้งของการใช้อุณหภูมิแบบหลายขั้น โดยการใช้อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 2 h ตามด้วยอุณหภูมิ 70°C จนเนื้อลำไยแห้งนั้น พบว่าจะมีการใช้เนื้อลำไยเป็นปริมาณมากใน

ช่วงแรกเพื่อเร่งมวลความชื้นจากภายในโครงสร้างเซลล์ออกที่ผิวของเนื้อลำไย และการลดอุณหภูมิลงเหลือ 70°C จึงเปรียบเหมือนการลดพลังงานของระบบส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลลดลงอย่างเหมาะสม การใช้อุณหภูมิแบบหลายชั้นเป็นเทคโนโลยีที่ช่วยสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้ง และสามารถรักษาสีของเนื้อลำไยได้ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Jino and Assawarachan (2015) และ Cerniřev (2010) ในการใช้อุณหภูมิแบบหลายชั้นในการอบแห้งเพื่อรักษาสีของเห็ดเหวียนและมันฝรั่ง ตามลำดับ

4 สรุป

การใช้อุณหภูมิแบบหลายชั้นเป็นเทคโนโลยีการอบแห้งที่ถูกพัฒนาให้มีประสิทธิภาพในการอบแห้งสูง และพลังงานเฉพาะในการอบแห้ง (SECs) ในการอบแห้งที่น้อยกว่าสถานะอื่นๆ แต่มีอัตราการอบแห้งที่สูง รวมถึงสามารถรักษาคูณภาพของการอบแห้งเนื้อลำไยเทียบเคียงการอบแห้งด้วยเทคโนโลยีสมัยใหม่ เช่นการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ การใช้อุณหภูมิสูงในช่วงแรกของการอบแห้งนั้นสามารถช่วยเร่งการเคลื่อนไหวของมวลความชื้นในโครงสร้างชั้นในของเซลล์พืชให้เกิดการแพร่ของมวลความชื้นเคลื่อนที่ออกมาที่ผิวได้มีประสิทธิภาพ เรียกปรากฏการณ์ดังกล่าวว่า ปรากฏการณ์การปั๊มของเหลว (Pump effect) และเมื่อลดอุณหภูมิลงหลักการการเกิดปรากฏการณ์การปั๊มของเหลวแบบเต็มรูปแบบนั้นจะช่วยลดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพเนื่องจากผลกระทบของความร้อน เนื่องจากไม่มีพลังงานส่วนเกินที่ไปกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลในลำไย ผลการศึกษาของโครงการวิจัยนี้พบว่า สถานะที่เหมาะสมในการอบแห้งเนื้อลำไยสีทองคือ การใช้อุณหภูมิแบบหลายชั้นด้วยการใช้อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 2 h ตามด้วยอุณหภูมิ 70°C สามารถรักษาสีของเนื้อลำไยให้มีลักษณะเป็นสีทอง โดยมีค่า L^* -value และ b^* -value ที่สูง แต่มีค่า a^* -value ต่ำ และมีค่า Browning Index ที่น้อยที่สุด และผลการวิเคราะห์พบว่าแบบของ Page สามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของเนื้อลำไยอบแห้งได้เหมาะสมที่สุด เนื่องจากให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) สูงที่สุด ในขณะที่ให้ค่าโคก้างสอง (χ^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ที่ต่ำสุด

5 กิตติกรรมประกาศ

บทความวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิจัยเรื่องการศึกษาสถานะที่เหมาะสมในกระบวนการแปรรูปผลิตภัณฑ์เนื้อลำไยอบแห้งด้วยการใช้อุณหภูมิแบบหลายชั้นของเครื่องอบแห้งระบบถาดหมุนได้รับเงินทุนสนับสนุนจากศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา กทม. 10400

6 เอกสารอ้างอิง

- ปองพล สุริยะกันธร, ประพันธ์ จิโน, ฤทธิชัย อัครราชันย์. 2556. ผลกระทบของการเตรียมขั้นต้นด้วยการลวกและแบบจำลองการอบแห้งแก๊สฮวย. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย 20(2), 43-51.
- ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช. 2550. พื้นฐานการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ. กรุงเทพฯ, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- พุทธิพันธ์ จารุวัฒน์, พิมล วุฒิสหิทธิ์, ชุศักดิ์ ขวประดิษฐ์, ยงยุทธ คงชาน. 2551. ศึกษาวิจัยเครื่องอบแห้งลำไยแบบต่อเนื่อง. รายงานวิจัยกลุ่มวิศวกรรมหลังการเก็บเกี่ยว กรมวิชาการเกษตร ประจำปี 2551, 29-45.
- ฤทธิชัย อัครราชันย์, 2558. ผลกระทบของอุณหภูมิและชั้นความหนาต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งกากเนื้อมะพร้าว. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย 22(1), 37-47.
- ฤทธิชัย อัครราชันย์, 2556. จลนพลศาสตร์การอบแห้งอาหารและวัสดุชีวภาพ. วารสารวิชาการ Rajabhat Journal of Sciences, Humanities & Social Sciences; 14(2), 13-22.
- สั๊กมน เทพัสติน ณ อยู่ยยา. 2555. การอบแห้งอาหารและวัสดุชีวภาพ. กรุงเทพมหานคร: ท็อป.
- Abano, E.E., Ma, H., Qu, W. 2011. Influence of Air Temperature on the Drying Kinetics and Quality of Tomato Slices, Journal of Food Process Technol 2(5), 1-9.
- AOAC. 2010. Official Methods of Analysis. (18thed). Association of Official Analytical Chemists, Washington, D.C., USA.
- Assawarachan, R., Kalayanamitra, K. 2015. Mathematical Models of Sweet Basil (*Ocimum basilicum* Linn.) during Microwave Drying. Acta Horticulure 1088, 611-614.
- Assawarachan, R., Kalayanamitra, K. 2015. Effect of Drying Methods on Color Quality of Sweet Basil (*Ocimum basilicum* Linn.). Acta Horticulure 1088, 615-618.
- Assawarachan, R. 2013. Drying Kinetics of coconut residue in fluidized bed. International Journal of Agriculture Innovations and Research 2(2), 263-266
- 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.
- Cerniřev, S. 2010. Effects of conventional and multistage drying processing on non-enzymatic browning in tomato. Journal of Food Engineering 96, 114-118.

- Doymaz, İ., İsmail, O. 2011. Drying characteristics of sweet cherry. *Food and Bioprocessing* 89, 31-38.
- Jino, P., Assawarachan R. 2015. Comparative study of color retention of dried stevia leaves (*stevia rebaudiana* Bertoni) by single-stage drying and multi-stage drying. *Journal of food science and agricultural technology* 1(1), 83-88.
- Orikasa, T., Koide, S., Okamoto, S., Imaizumi, T., Muramatsu, Y., Takeda, J., Shiina, T., Tagawa, A. 2014. Impacts of hot air and vacuum drying on the quality attributes of kiwifruit slices. *Journal of Food Engineering* 125, 51-58.
- Pongtong, K., Assawarachan, R., Noomhorm, A. 2011. Mathematical Models for Vacuum Drying Characteristics of Pomegranate Aril. *Journal of Food Science and Engineering* 1(1), 11-19.
- Singh, N.J., Pandey, R.K. 2012. Convective air drying characteristics of sweet potato cube (*Ipomoea batatas* L.). *Food and bioproducts processing* 90, 317-322.
- Unhapipatpong, 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, pp 433-443.
- Yunchalad, M., Supasri, R., Boonbamrung, S., Wongkrajank, K., Hiraga, C., Watanasook, A. 2008. Pre-concentration of longan juice extract with micro filtration and reverse osmosis. *Asian Journal of Food and Agro-Industry* 1, 17-23.