

ผลของกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนต่อสมบัติของกล้วยหอมสุกและฟักทองอบแห้ง

Effect of Hot-Air Drying Process on Properties of Dried Ripe Bananas and Pumpkins

วิฑู ชูศรี^{1*}, พรทิพย์ วิริยะวัฒนา¹ พันธุ์เลิศ พรหมสาขา ณ สกลนคร¹ และ ธัชพงษ์ ชูศรี²

Withu Choosri^{1*}, Porntip Wiriyawattana¹, Phanlert Promsakha na Sakon Nakhon¹ and Touchpong Choosri²

Received: July 10, 2019

Revised: September 18, 2019

Accepted: October 1, 2019

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิและความเร็วลมต่ออัตราการทำแห้ง สมบัติทางเคมีกายภาพและประสาทสัมผัสของกล้วยหอมสุกและฟักทองอบแห้ง โดยศึกษาสภาวะการทำแห้งที่อุณหภูมิ 50, 60 และ 70°C และความเร็วลม 1.0, 1.5 และ 2.0 เมตรต่อวินาที พบว่า เมื่ออุณหภูมิและความเร็วลมในการทำแห้งเพิ่มขึ้นอัตราเร็วในการทำแห้งของทั้งสองตัวอย่างจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่ออุณหภูมิในการทำแห้งมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าแรงกดสูงสุดของตัวอย่างกล้วยหอมสุกมีแนวโน้มลดต่ำลงอย่างไรก็ตามในตัวอย่างฟักทองกลับพบว่า สภาวะการทำแห้งจะไม่ส่งผลให้ค่าแรงกดสูงสุดของฟักทองมีค่าแตกต่างกัน และสำหรับลักษณะโครงสร้างภายในของตัวอย่างกล้วยหอมสุกและฟักทองภายหลังการทำแห้งพบว่า ทั้งสองตัวอย่างเมื่อทำแห้งที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะมีความเป็นรูพรุนเพิ่มมากขึ้น สำหรับการเปลี่ยนแปลงสีของทั้งตัวอย่างกล้วยหอมสุกและฟักทองอบแห้งพบว่า การทำแห้งที่อุณหภูมิ 70°C และความเร็วลม 2.0 เมตรต่อวินาที จะมีค่า ΔE^* ต่ำที่สุด สำหรับการทดสอบความชอบของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์กล้วยหอมสุกและฟักทองอบแห้งพบว่า ตัวอย่างกล้วยหอมสุกและฟักทองอบแห้งที่อุณหภูมิ 70°C และความเร็วลม 2.0 เมตรต่อวินาที จะได้รับคะแนนความชอบโดยรวมมากที่สุด

คำสำคัญ: กระบวนการทำแห้งแบบลมร้อน, อัตราการทำแห้ง, สมบัติทางเคมีกายภาพ, สมบัติทางประสาทสัมผัส, กล้วยหอมสุก, ฟักทอง

ABSTRACT

The aims of this work were to study the effect of air temperature and velocity on the drying rate, physicochemical properties and sensory properties of dried ripe bananas and dried pumpkins. The drying process was performed at air temperature of 50, 60 and 70°C and air velocity of 1.0, 1.5 and 2.0 m/s. The results revealed that the drying rate was increased with increasing air temperature and air velocity for both ripe bananas and pumpkins. Moreover, the maximum force of dried ripe bananas had a decreasing trend when the air temperature was increased. Nevertheless, the maximum force of pumpkins was not different between drying conditions. The porosity of dried ripe bananas and pumpkin was increased with increasing air temperature. For total color difference (ΔE^*) of dried ripe bananas and pumpkins, it was found that the lowest ΔE^* was obtained from the drying conditions at 70°C air temperature and 2.0 m/s air velocity. In addition, the highest overall liking score of dried bananas and pumpkins was achieved from the drying conditions at 70°C air temperature and 2.0 m/s air velocity.

Keywords: Hot air drying process, Drying rate, Physicochemical properties, Sensory properties, Ripe bananas, Pumpkins

*Corresponding author e-mail :c_withu@hotmail.com

¹ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง กรุงเทพมหานคร

²ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม

บทนำ

กระบวนการทำแห้งเป็นหนึ่งในหน่วยปฏิบัติการที่มีความสำคัญในการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตร และผลิตภัณฑ์อาหารในระดับอุตสาหกรรม โดยมีวัตถุประสงค์ในการยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์สำหรับการบริโภคและขนส่งสินค้าได้นานมากยิ่งขึ้น ซึ่งกระบวนการทำแห้งแบบลมร้อน (hot air drying) เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุด เนื่องจากมีต้นทุนในการดำเนินการต่ำและมีประสิทธิภาพในการแปรรูปที่สูง แต่สิ้นเปลืองพลังงานและใช้เวลานาน อีกทั้งยังส่งผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงในระหว่างกระบวนการทำแห้ง โดยวัตถุประสงค์ที่มีความน่าสนใจในการนำมาแปรรูปเป็นผักและผลไม้อบแห้ง ได้แก่ กัวยหอมสุกและฟักทอง ทั้งนี้เนื่องจากกัวยหอมสุกอุดมไปด้วยคุณค่าทางโภชนาการ เช่น คาร์โบไฮเดรต แร่ธาตุ และวิตามินเอ เป็นต้น [1] ในขณะที่ฟักทองเป็นแหล่งของเบต้า-แคโรทีน (β -carotene) รวมถึงวิตามินอื่นๆ ที่มีความสำคัญ [2-4] จึงมีงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่ได้ศึกษาผลของกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนต่อกัวยหอมและฟักทองในด้านต่างๆ ได้แก่ การศึกษาผลของสภาวะการทำแห้งด้วยลมร้อนต่อระยะเวลาการทำแห้ง จลนพลศาสตร์ของการทำแห้ง (drying kinetic) และสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น ประสิทธิภาพของกัวยหอม (Effective moisture diffusivity, D_{eff}) [5-8] และการศึกษาผลของสภาวะการทำแห้งด้วยลมร้อนต่อสี เนื้อสัมผัส และลักษณะคุณภาพในด้านต่างๆ ของกัวยหอม [7, 9] การศึกษาผลของสภาวะการทำแห้งด้วยลมร้อนต่อระยะเวลาการทำแห้ง จลนพลศาสตร์ของการทำแห้ง และสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น ประสิทธิภาพของฟักทอง [6, 10-14] และการศึกษาผลของสภาวะการทำแห้งด้วยลมร้อนต่อสี เนื้อสัมผัส และลักษณะคุณภาพในด้านต่างๆ ของฟักทอง [12, 15] ดังนั้นการยืดอายุการเก็บรักษากัวยหอมสุกและฟักทองด้วยการทำแห้งให้ยังคงมีรสชาติ สี และคุณค่าทางสารอาหารครบถ้วนเป็นหนึ่งในปัญหาที่ท้าทายสำหรับผู้วิจัย วัตถุประสงค์ของงานวิจัยครั้งนี้จึงต้องการศึกษาและเปรียบเทียบอัตราการทำแห้งของตัวอย่างกัวยหอมสุกและฟักทองด้วยกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิและความเร็วลมที่แตกต่างกัน เพื่อศึกษาผลต่อ

สมบัติทางเคมีกายภาพและประสาทสัมผัสของกัวยหอมสุกและฟักทองอบแห้ง ซึ่งตัวอย่างทั้งกัวยหอมสุกและฟักทองที่ใช้เป็นสายพันธุ์ที่ปลูกอย่างแพร่หลายในประเทศไทย งานวิจัยนี้จะทำให้ได้ข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญสำหรับพัฒนากระบวนการทำแห้งอาหารเพื่อนำไปสู่การพัฒนาในเชิงพาณิชย์สำหรับผลิตผลทางการเกษตรในประเทศไทยต่อไป

วัตถุประสงค์และวิธีการทดลอง

1. การเตรียมตัวอย่าง

กัวยหอมสุก (*Musa acuminata*, AAA Group “Gros Michel”) และฟักทอง (*Cucurbita moschata* L.) ซื้อจากท้องตลาด โดยคัดเลือกจากขนาดและสีของตัวอย่างให้มีความสม่ำเสมอ จากนั้นนำตัวอย่างกัวยหอมสุกมาวัดค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (soluble solid) ด้วย hand refractometer (Atago, Master-M, Japan) ในขณะที่ฟักทองจะทำการวัดค่าความแน่นเนื้อด้วย penetrometer (FT 327, Italy) เพื่อควบคุมตัวอย่างให้มีความสม่ำเสมอมากที่สุด โดยให้ค่า soluble solid เฉลี่ยของตัวอย่างกัวยหอมสุกมีค่าเท่ากับ 25.28 ± 0.71 °Brix และค่าความแน่นเนื้อเฉลี่ยของตัวอย่างฟักทองเท่ากับ 52.38 ± 3.96 N จากนั้นนำตัวอย่างมาทำความสะอาด ปอกเปลือก และตัดแต่ง โดยนำกัวยหอมสุกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3.5 ± 0.5 ซม. มาตัดเป็นชิ้นตามขวางให้มีความหนาเท่าๆ กัน ชิ้นละ 0.5 ซม. และตัวอย่างฟักทองจะทำการตัดเป็นชิ้นตามยาวให้มีความหนาเท่าๆ กัน คือ กว้างยาวสูง เท่ากับ $2 \times 2 \times 0.5$ ซม. สำหรับปริมาณร้อยละความชื้นฐานแห้ง (%dry basis moisture content) เริ่มต้นของตัวอย่างกัวยหอมสุกและฟักทอง มีค่าเท่ากับ 315 ± 0.20 และ 626 ± 0.27 ตามลำดับ โดยอาศัยการวิเคราะห์ความชื้นตามวิธีของ AOAC (2000) [16]

2. ขั้นตอนการทำแห้ง

การทำแห้งด้วยลมร้อนจะเริ่มต้นจากการผ่านอากาศร้อนที่อุณหภูมิและความเร็วลมที่ต้องการทำแห้งเข้าสู่ห้องทำแห้งในเครื่องมือที่ใช้ศึกษาการทำแห้งด้วยลมร้อน (Figure 1) จนอุณหภูมิในห้องทำแห้งเข้าสู่

*Corresponding author e-mail: c_witth@hotmail.com

¹Department of Food Technology, Faculty of Science, Ramkhamhaeng University, Bangkok, 10240

²Department of Food Technology, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Nakhon Pathom, 73000

สมดุล จากนั้นจึงนำตัวอย่างเข้าสู่ห้องทำแห้ง โดยจะมีการบันทึกข้อมูลน้ำหนักของตัวอย่าง อุณหภูมิอากาศร้อน อุณหภูมิของอากาศเข้า-ออก และความชื้นของอากาศเข้า-ออก ทุกๆ 5 นาที ตลอดช่วงระยะเวลาของการทำแห้ง โดยตัวอย่างมีน้ำหนักประมาณ 1.0 ± 0.5 กรัม และมีระยะห่างระหว่างชั้นตัวอย่าง 5 มม. และ

กระบวนการทำแห้งจะดำเนินไปจนถึงจุดสิ้นสุดเมื่อปริมาณความชื้นฐานแห้งสุดท้ายของตัวอย่างกล้วยหอมสุกและฟักทองมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ $0.2 \text{ kg water/kg dry matter}$ และ $0.08 \text{ kg water/kg dry matter}$ ตามลำดับ เพื่อให้ตัวอย่างทั้งสองมีค่า a_w ต่ำกว่า 0.6

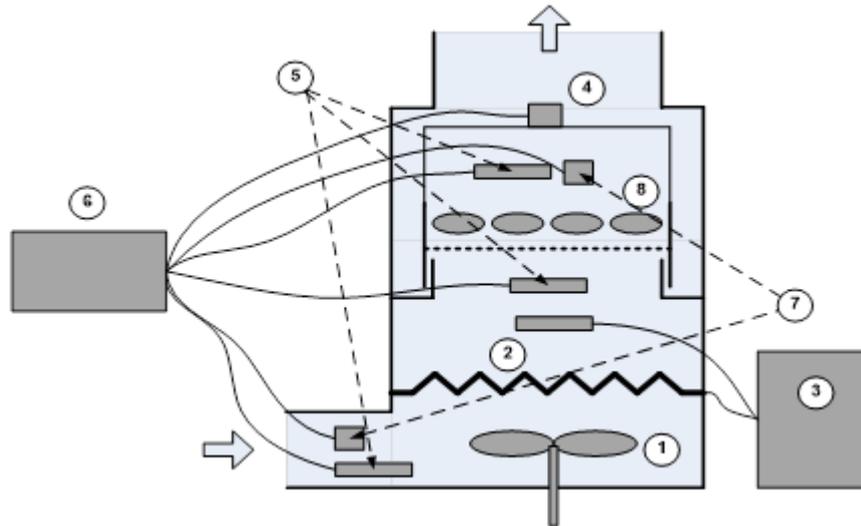


Figure 1. The experimental setup of (1) fan; (2) heater; (3) temperature controller; (4) load cell; (5) PT 100; (6) data logger; (7) humidity sensors and (8) samples

3. การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลการทำแห้งในงานวิจัยนี้ แสดงปริมาณความชื้นของตัวอย่างในรูปของอัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio) ดังแสดงในสมการที่ (1)

$$MR = \frac{X_t - X_{eq}}{X_i - X_{eq}} \quad (1)$$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น (-), X_t คือ ปริมาณความชื้นฐานแห้งที่เวลาใดๆ (kg water/kg dry matter), X_i คือ ปริมาณความชื้นฐานแห้งเริ่มต้นของตัวอย่าง (kg water/kg dry matter) และ X_{eq} คือ ปริมาณความชื้นฐานแห้งสมดุลของตัวอย่างที่สภาวะนั้นๆ (kg water/kg dry matter)

การวิเคราะห์กราฟของการอบแห้ง (Drying curve) ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นและเวลาในการทำแห้ง จะใช้แบบจำลองเลวิส (Lewis model) ในสมการที่ (2) เพื่ออธิบายลักษณะของ drying

curve สำหรับการทำแห้งด้วยลมร้อนในตัวอย่างกล้วยหอมสุกและฟักทองและการวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เป็นเส้นตรง (Non-linear regression) ทำได้โดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel 2010

$$MR = \exp(-kt) \quad (2)$$

เมื่อ k คือ ค่าคงที่ (ต่อวินาที, s^{-1}) และ t คือ เวลาในการทำแห้ง (วินาที, s)

สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (Effective moisture diffusivity, D_{eff}) เป็นพารามิเตอร์ที่นำมาใช้ในการอธิบายความสามารถในการถ่ายโอนความชื้นในชั้นตัวอย่างและประสิทธิภาพของเครื่องทำแห้ง โดย D_{eff} คำนวณได้จากแบบจำลองการแพร่กระจาย (diffusion model) ตามกฎข้อที่ 2 ของฟิค (Fick's second law of diffusion) ที่สมมติว่า ปริมาณความชื้นเริ่มต้นของตัวอย่างมีค่าเท่ากัน และ D_{eff} มีค่าคงที่และรัศมีของตัวอย่างกล้วยหอมสุกและความหนาของตัวอย่างฟักทองมี

*Corresponding author e-mail : c_withu@hotmail.com

¹ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง กรุงเทพมหานคร

²ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม

ค่าคงที่ตลอดกระบวนการทำแห้ง [17] ซึ่งการวิเคราะห์ D_{eff} สำหรับตัวอย่างกล้วยหอมสุกที่เป็นรูปทรงกระบอก (cylindrical shape) และตัวอย่างฟักทองที่เป็นรูปทรงแผ่น (slab shape) ทำได้โดยอาศัยความสัมพันธ์ในสมการที่ (3) [18] และ (4) [11] ตามลำดับ

$$MR = \frac{4}{\beta^2} \exp\left(-\frac{\beta^2 D_{eff}}{r^2} t\right) \quad (3)$$

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} t\right) \quad (4)$$

เมื่อ D_{eff} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (ตร.ม.ต่อวินาที, m^2/s), r คือ รัศมีของกล้วยหอมสุก (เมตร, m), L คือ ความหนาครึ่งหนึ่งของฟักทอง (m) และ β คือ Bessel function มีค่า 1.121 (-)

การวิเคราะห์อัตราการทำแห้ง (Drying rate) แสดงถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของตัวอย่างต่อหนึ่งหน่วยเวลา ซึ่งสามารถวิเคราะห์อัตราการทำแห้งของทั้งสองตัวอย่างได้ดังสมการที่ (5)

$$DR = -\frac{X_{t+\Delta t} - X_t}{\Delta t} \quad (5)$$

เมื่อ DR คือ อัตราการทำแห้ง ($kg\ water/kg\ dry\ matter \cdot s$), Δt คือ ช่วงเวลาการบันทึกข้อมูลตัวอย่าง (s), X_t คือ ปริมาณความชื้นฐานแห้งที่เวลาใดๆ ($kg\ water/kg\ dry\ matter$) และ $X_{t+\Delta t}$ คือ ปริมาณความชื้นฐานแห้งที่เวลาใดๆ บวกกับช่วงเวลาการบันทึกข้อมูลตัวอย่าง ($kg\ water/kg\ dry\ matter$)

4. การวิเคราะห์ค่าวอเตอร์แอกทิวิตี (a_w)

การวิเคราะห์ค่าวอเตอร์แอกทิวิตีในตัวอย่างกล้วยหอมสุกและฟักทองอบแห้งจะทำการวิเคราะห์จำนวน 3 ซ้ำ

$$\Delta E^* = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2} \quad (6)$$

หรือ
$$\Delta E^* = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}} \quad (7)$$

ด้วยเครื่องวัด Water activity meter (Aqua Lab, 4TE, USA) ที่อุณหภูมิ 25°C

5. การวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Texture analysis)

การวิเคราะห์เนื้อสัมผัสของตัวอย่างด้วยวิธี Puncture test ซึ่งจะดำเนินการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Texture analyzer (Stable Micro System, TA.XT.Plus, UK) โดยใช้หัววัด (probe) ชนิดทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มม. โดยกำหนดอัตราการกดทะลุในขณะทดสอบ ก่อนทดสอบ และหลังทดสอบเป็น 1, 1 และ 5 มม./วินาที ตามลำดับ ระยะการกดทะลุเท่ากับ 10 มม. และจำนวนแรงกดที่ใช้ (trigger force) เท่ากับ 5 กรัม โดยจะทำการวิเคราะห์เนื้อสัมผัสและค่าเฉลี่ยแรงกดสูงสุด (maximum force) ของตัวอย่างจำนวน 15 ตัวอย่างในแต่ละสภาวะการทดลอง

6. การวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาค

การวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคจะดำเนินการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) (JEOL, JSM-IT300, Japan) โดยวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคของตัวอย่างกล้วยหอมสุกและฟักทองที่ผ่านการทำแห้งแล้ว [19-20]

7. การวิเคราะห์ค่าสี

การวิเคราะห์ค่าสีของตัวอย่างจะดำเนินการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Hunter Lab (Colorflex-45-2, USA) ในระบบ CIE $L^* a^* b^*$ โดยวิเคราะห์ค่าสีของตัวอย่างกล้วยหอมสุกและฟักทองก่อนและหลังการทำแห้ง ครั้งละ 5 ชิ้น นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์ค่าสีในรูปแบบของค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม (ΔE^*) ของตัวอย่างดังสมการต่อไปนี้

*Corresponding author e-mail: c_witth@hotmail.com

¹Department of Food Technology, Faculty of Science, Ramkhamhaeng University, Bangkok, 10240

²Department of Food Technology, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Nakhon Pathom, 73000

เมื่อ ΔE^* คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม, L_0^* คือ ค่า L^* ของตัวอย่างก่อนการทำแห้ง, L^* คือ ค่า L^* ของตัวอย่างหลังการทำแห้ง, a_0^* คือ ค่า a^* ของตัวอย่างก่อนการทำแห้ง, a^* คือ ค่า a^* ของตัวอย่างหลังการทำแห้ง, b_0^* คือ ค่า b^* ของตัวอย่างก่อนการทำแห้ง และ b^* คือ ค่า b^* ของตัวอย่างหลังการทำแห้ง

8. การทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัส

การทดสอบความชอบของผู้บริโภคที่มีต่อตัวอย่างกล้วยหอมและฟักทองที่ผ่านการทำแห้งแล้วทั้ง 9 สภาวะ โดยใช้ผู้ทดสอบที่ไม่ผ่านการฝึกฝน และวางแผนการทดลองแบบสุ่มในบล็อกไม่สมบูรณ์สมดุล (Balanced Incompletely Block Design; BIB) โดยมีสิ่งทดลอง (t) จำนวน 9 สิ่งทดลอง, จำนวนบล็อก (block, b) เท่ากับ 12, จำนวนหน่วยต่อบล็อก (k) เท่ากับ 3, จำนวนซ้ำ (r) เท่ากับ 4 และจำนวนครั้งที่แต่ละคู่สิ่งทดลองปรากฏในบล็อกเดียวกัน (λ) เท่ากับ 3 [21] โดยทำการทดลองทั้งหมด 5 รอบ เพื่อให้มีจำนวนซ้ำในแต่ละสิ่งทดลองเป็น 15 ซ้ำ ใช้ผู้ทดสอบทั้งหมด 60 คน ด้วยวิธีการให้คะแนนความชอบแบบ 9-point hedonic scale โดยทำการทดสอบในคุณลักษณะด้านสี ลักษณะปรากฏ กลิ่นรสโดยรวม เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม

9. การวิเคราะห์ทางสถิติ

การทดลองนี้วางแผนการทดลองแบบแฟกทอเรียล (3^2 Factorial design) โดยปัจจัยที่ทำการศึกษามี 2 ปัจจัย ได้แก่ ความเร็วลม 3 ระดับ (1.0, 1.5 และ 2.0 m/s) และอุณหภูมิ 3 ระดับ (50, 60 และ 70°C) ซึ่งจะทำให้การทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ โดยวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง (Analysis of variance: two way ANOVA) และทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's multiple range tests (DMRT) ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ SPSS® (version 12) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p=0.05$)

ผลการทดลองและวิจารณ์

1. การวิเคราะห์ข้อมูลการทำแห้ง

จาก Drying curve ของตัวอย่างกล้วยหอมสุก (Figure 2(a)-2(c)) และฟักทอง (Figure 2(d)-2(f)) แสดงด้วยแบบจำลองเลวิส (Lewis's model) ซึ่งสามารถอธิบายข้อมูลการทดลองได้ดีด้วยค่า R^2 สูงกว่า 0.99 ค่า RMSE ต่ำกว่า 2.3179×10^{-2} และ ค่า χ^2 ต่ำกว่า 2.3139×10^{-4} (Table 1) พบว่า ระยะเวลาในการทำแห้งของตัวอย่างทั้งสองจะลดลงเมื่ออุณหภูมิและความเร็วลมในกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยก่อนหน้านี้ในผลิตภัณฑ์ทำแห้งชนิดต่างๆ [11, 22-25] พบว่าที่อุณหภูมิสูงจะเร่งการเคลื่อนที่ของโมเลกุลน้ำในชิ้นตัวอย่างไปยังอากาศ [26-27] เพราะความแตกต่างของความดันไอ (vapor pressure) ระหว่างชิ้นตัวอย่างและอากาศเพิ่มสูงขึ้น โดยสภาวะการทดลองที่อุณหภูมิ 70°C และความเร็วลม 2.0 m/s จะมีระยะเวลาการทำแห้งที่สั้นที่สุดในขณะที่สภาวะการทดลองที่อุณหภูมิ 50°C และความเร็วลม 1.0 m/s จะมีระยะเวลาการทำแห้งนานที่สุด ทั้งในตัวอย่างกล้วยหอมสุกและฟักทอง โดยการทำแห้งตัวอย่างกล้วยหอมสุกที่สภาวะการทดลองที่อุณหภูมิ 70°C และความเร็วลม 2.0 m/s จะใช้ระยะเวลาในการทำแห้งประมาณ 4 ชั่วโมง 55 นาที และในสภาวะการทดลองที่อุณหภูมิ 50°C และความเร็วลม 1.0 m/s จะใช้ระยะเวลาในการทำแห้งประมาณ 15 ชั่วโมง 55 นาที และสำหรับการทำแห้งตัวอย่างฟักทองที่สภาวะการทดลองที่อุณหภูมิ 70°C และความเร็วลม 2.0 m/s จะใช้ระยะเวลาในการทำแห้งประมาณ 2 ชั่วโมง 55 นาที และในสภาวะการทดลองที่อุณหภูมิ 50°C และความเร็วลม 1.0 m/s จะใช้ระยะเวลาในการทำแห้งประมาณ 7 ชั่วโมง 55 นาที ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าการทำแห้งตัวอย่างกล้วยหอมสุกและฟักทองที่สภาวะการทดลองที่อุณหภูมิ 70°C และความเร็วลม 2.0 m/s จะมีระยะเวลาการทำแห้งที่สั้นกว่าที่สภาวะการทดลองที่อุณหภูมิ 50°C และความเร็วลม 1.0 m/s ถึงร้อยละ 69 และ 63% ตามลำดับ

*Corresponding author e-mail :c_witthu@hotmail.com

¹ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง กรุงเทพมหานคร

²ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม

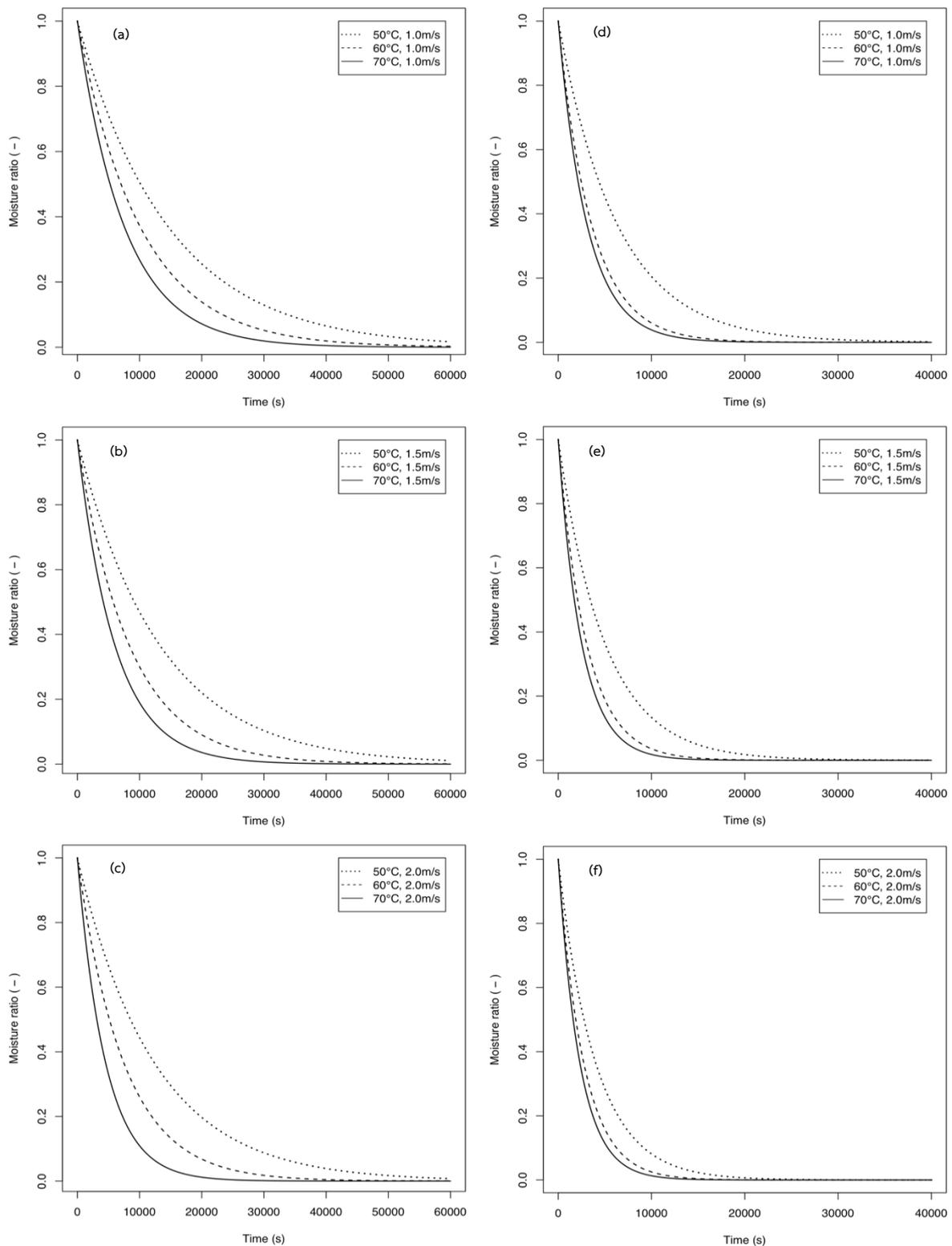


Figure 2. The drying curve of ripe bananas (a-c) and pumpkins (d-f) in hot air drying process at various conditions.

*Corresponding author e-mail: c_witth@hotmail.com

¹Department of Food Technology, Faculty of Science, Ramkhamhaeng University, Bangkok, 10240

²Department of Food Technology, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Nakhon Pathom, 73000

Table 1. The values of k and D_{eff} of ripe bananas and pumpkins in hot air drying process at various conditions.

Drying conditions		k (s^{-1}) $\times 10^5$	D_{eff} (m^2/s) $\times 10^8$	R^2	RMSE	χ^2
Ripe bananas						
50°C	1.0 m/s	6.82±0.01 ^d	1.66±0.00 ^d	0.9948	1.4986×10 ⁻²	2.2504×10 ⁻⁴
	1.5 m/s	7.57±0.06 ^d	1.85±0.01 ^d	0.9974	1.0217×10 ⁻²	1.0458×10 ⁻⁴
	2.0 m/s	8.12±0.35 ^d	1.98±0.08 ^d	0.9970	1.3906×10 ⁻²	1.9376×10 ⁻⁴
60°C	1.0 m/s	9.87±0.88 ^{cd}	2.41±0.22 ^{cd}	0.9981	9.7093×10 ⁻³	9.4459×10 ⁻⁴
	1.5 m/s	12.02±0.05 ^c	2.93±0.01 ^c	0.9915	2.3179×10 ⁻²	5.3837×10 ⁻⁴
	2.0 m/s	13.45±0.42 ^{bc}	3.28±0.10 ^{bc}	0.9965	1.1903×10 ⁻²	1.4198×10 ⁻⁴
70°C	1.0 m/s	13.17±0.82 ^{bc}	3.22±0.20 ^{bc}	0.9972	1.3588×10 ⁻²	1.8502×10 ⁻⁴
	1.5 m/s	16.63±1.01 ^b	4.06±0.24 ^b	0.9972	1.1576×10 ⁻²	1.3427×10 ⁻⁴
	2.0 m/s	22.13±1.27 ^a	5.40±0.31 ^a	0.9951	1.7024×10 ⁻²	2.9053×10 ⁻⁴
Pumpkins						
50°C	1.0 m/s	1.59±0.14 ^f	4.02±0.35 ^f	0.9989	7.5264×10 ⁻³	5.6777×10 ⁻⁵
	1.5 m/s	2.01±0.08 ^f	5.11±0.20 ^f	0.9996	4.6648×10 ⁻³	2.1807×10 ⁻⁵
	2.0 m/s	2.51±0.06 ^e	6.36±0.14 ^e	0.9984	7.9569×10 ⁻³	6.3486×10 ⁻⁵
60°C	1.0 m/s	2.81±0.12 ^{de}	7.12±0.31 ^{de}	0.9988	7.7417×10 ⁻³	6.0114×10 ⁻⁵
	1.5 m/s	3.33±0.14 ^c	8.43±0.35 ^c	0.9980	1.1460×10 ⁻²	1.3199×10 ⁻⁴
	2.0 m/s	3.68±0.05 ^{bc}	9.34±0.14 ^{bc}	0.9998	3.9189×10 ⁻³	1.5430×10 ⁻⁵
70°C	1.0 m/s	3.25±0.16 ^{cd}	8.25±0.41 ^{cd}	0.9963	1.5183×10 ⁻²	2.3139×10 ⁻⁴
	1.5 m/s	4.01±0.07 ^{ab}	10.17±0.17 ^{ab}	0.9975	1.0673×10 ⁻²	1.1440×10 ⁻⁴
	2.0 m/s	4.34±0.06 ^a	11.00±0.15 ^a	0.9992	5.9850×10 ⁻³	3.5977×10 ⁻⁵

^{abcdef} Values in the same column followed by different letters are significantly different ($p \leq 0.05$).

Table 1 แสดงค่า k และ D_{eff} ในกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนที่สภาวะต่างๆ โดยพบว่า ค่า k และ D_{eff} ในตัวอย่างกล้วยหอมสุกจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและความเร็วลมของกระบวนการทำแห้งมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยก่อนหน้า [5-8, 28] เมื่อ

พิจารณาที่ความเร็วลม 1.5 และ 2.0 m/s ถ้าอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้ค่า k และ D_{eff} มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบที่อุณหภูมิเดียวกัน กลับพบว่าไม่ส่งผลให้ค่า k และ D_{eff} เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ยกเว้นที่อุณหภูมิ

*Corresponding author e-mail :c_withu@hotmail.com

¹ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง กรุงเทพมหานคร

²ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม

70°C และความเร็วลม 2 m/s นอกจากนี้สภาวะการทำแห้งที่อุณหภูมิ 70°C และความเร็วลม 2 m/s ยังส่งผลให้มีค่า D_{eff} มากที่สุด ในขณะที่สภาวะการทำแห้งที่อุณหภูมิ 50°C และความเร็วลม 1 m/s จะมีค่า D_{eff} น้อยที่สุด สำหรับตัวอย่างฟักทอง พบว่า ค่า k และ D_{eff} ในตัวอย่างฟักทองมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและความเร็วลมของกระบวนการทำแห้งมีค่าเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับผลงานวิจัยก่อนหน้านี้ [13, 24] พบว่า ที่ความเร็วลม 1.5 และ 2.0 m/s ถ้าอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น จะส่งผลให้ค่า k และ D_{eff} มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) นอกจากนี้สภาวะการทำแห้งที่อุณหภูมิ 70°C และความเร็วลม 2 m/s ยังส่งผลให้มีค่า D_{eff} มากที่สุดในขณะที่สภาวะการทำแห้งที่อุณหภูมิ 50°C และความเร็วลม 1 m/s จะมีค่า D_{eff} น้อยที่สุด เช่นเดียวกับที่พบในตัวอย่างกล้วยหอมสุก

อัตราการแห้ง (drying rate) ในกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนของตัวอย่างกล้วยหอมสุกและฟักทอง แสดงใน Figure 3(a)-3(c) และ Figure 3(d)-3(f) ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่า อัตราการแห้งจะมีค่าลดลงเป็นเส้นตรงเมื่ออัตราส่วนความชื้นมีค่าลดลงทั้งในตัวอย่างกล้วยหอมสุกและฟักทอง ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากระบวนการทำแห้งในกล้วยหอมสุกและฟักทองจะพบแต่เฉพาะช่วงอัตราการแห้งลดลง (falling rate period) เท่านั้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ในกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนในกล้วย [5, 26] และกระบวนการทำแห้ง

ด้วยลมร้อนในฟักทอง [11, 13-14, 29] นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราการแห้งด้วยลมร้อนทั้งในตัวอย่างกล้วยหอมสุกและฟักทองจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิและความเร็วลมในกระบวนการทำแห้งมีค่าเพิ่มสูงขึ้น

ค่าร้อยละความชื้นฐานแห้ง (dry basis) และ a_w ของตัวอย่างกล้วยหอมสุกและฟักทองที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนที่สภาวะต่างๆ แสดงใน Table 2 ซึ่งในการศึกษานี้ได้ทำแห้งตัวอย่างทั้งสองจนกระทั่งมีค่า a_w ต่ำกว่า 0.6 เนื่องจากที่ a_w 0.6 เป็นจุดวิกฤติที่ทำให้จุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญได้ จากผลการทดลองพบว่า ตัวอย่างกล้วยหอมสุกมีค่า a_w ในช่วง 0.56-0.58 ที่ระดับความชื้นฐานแห้งในช่วง 19.50-20.62% ในขณะที่ตัวอย่างฟักทองมี a_w ในช่วง 0.55-0.57 ที่ระดับความชื้นฐานแห้งในช่วงร้อยละ 7.89-8.28 นอกจากนี้ยังพบว่า การทำแห้งด้วยลมร้อนที่สภาวะต่างๆ ต่อค่า a_w ของทั้งตัวอย่างกล้วยหอมสุกและฟักทองมีค่าไม่แตกต่างกัน ($p > 0.05$) อย่างไรก็ตามพบว่า ปริมาณความชื้นของทั้งสองตัวอย่างมีค่าแตกต่างกัน ($p < 0.05$) ในขณะที่ค่า a_w นั้นมีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เนื่องจากลักษณะโครงสร้างและองค์ประกอบที่แตกต่างกันของทั้งสองตัวอย่าง โดยกล้วยเป็นผลไม้สุกที่มีน้ำตาลและเพคตินเป็นองค์ประกอบสำคัญที่มีผลต่อค่า a_w ขณะที่ฟักทองจะมีแป้งเป็นองค์ประกอบหลัก จึงทำให้ความชื้นต่างกันแต่ค่า a_w ใกล้เคียงกัน ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Kaymak-Ertekin and Gedik (2004) [30]

*Corresponding author e-mail: c_withu@hotmail.com

¹Department of Food Technology, Faculty of Science, Ramkhamhaeng University, Bangkok, 10240

²Department of Food Technology, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Nakhon Pathom, 73000

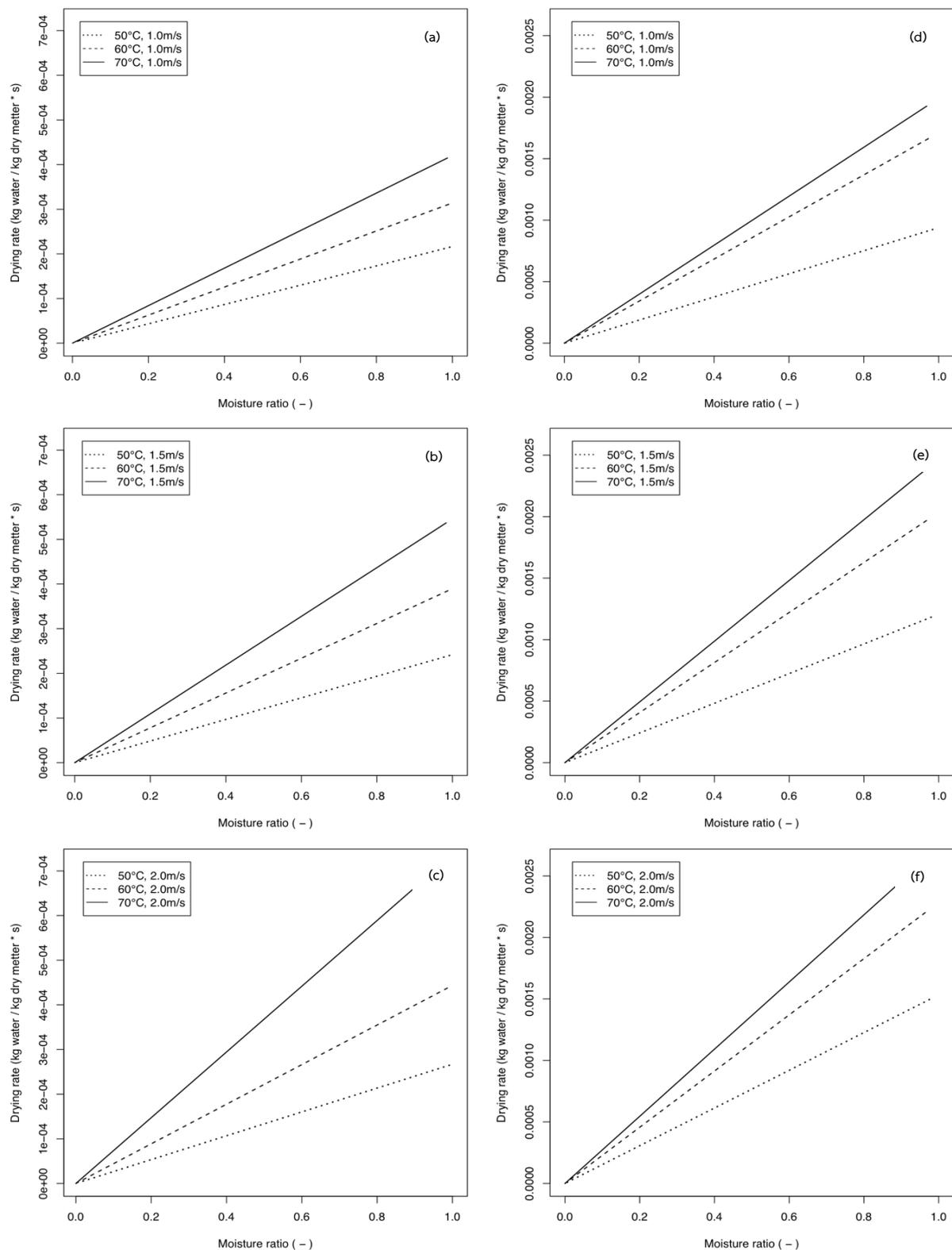


Figure 3. The drying rate of ripe bananas (a-c) and pumpkins (d-f) in hot air drying process at various conditions.

*Corresponding author e-mail :c_withu@hotmail.com

¹ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง กรุงเทพมหานคร

²ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม

Table 2. Percentages of dry basis and water activity (a_w) of ripe bananas and pumpkins in hot air drying process at various conditions.

Drying conditions	Ripe bananas		Pumpkins		
	Dry basis (%) ^{ns}	Water activity (a_w) ^{ns}	Dry basis (%) ^{ns}	Water activity (a_w) ^{ns}	
50°C	1.0 m/s	20.62±0.29	0.57±0.00	8.28±0.30	0.55±0.02
	1.5 m/s	20.57±0.64	0.57±0.02	7.97±0.01	0.56±0.02
	2.0 m/s	19.53±0.38	0.58±0.00	8.18±0.03	0.57±0.01
60°C	1.0 m/s	20.35±0.75	0.56±0.02	8.16±0.08	0.55±0.01
	1.5 m/s	19.76±0.68	0.57±0.02	7.98±0.05	0.55±0.01
	2.0 m/s	19.50±0.74	0.56±0.02	7.89±0.21	0.57±0.03
70°C	1.0 m/s	20.24±0.04	0.57±0.02	8.02±0.10	0.56±0.00
	1.5 m/s	19.71±0.35	0.57±0.01	8.14±0.37	0.56±0.01
	2.0 m/s	19.89±0.52	0.58±0.00	7.97±0.08	0.55±0.01

^{ns} means that %dry basis and water activity (a_w) of ripe bananas and pumpkins are not significantly different ($p>0.05$).

2. การวิเคราะห์เนื้อสัมผัส และโครงสร้างระดับจุลภาค

จากการวิเคราะห์เนื้อสัมผัสในรูปของค่าเฉลี่ยแรงกดสูงสุดของตัวอย่างกล้วยหอมสุกและฟักทองที่ผ่านการทำให้แห้งด้วยลมร้อนที่สภาวะต่างๆ (Figure 4(a) และ (b)) พบว่า ค่าเฉลี่ยแรงกดสูงสุดของตัวอย่างกล้วยหอมสุกและฟักทอง มีค่าอยู่ในช่วง 9.19-24.21 N และ 13.8-19.81 N ตามลำดับ โดยเมื่ออุณหภูมิในการทำให้แห้งเพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ค่าแรงกดสูงสุดของตัวอย่างมีแนวโน้มลดลง ดังจะเห็นได้จากตัวอย่างกล้วยหอมสุกที่ผ่านการทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 50°C และความเร็วลม 1.5 m/s มีค่าแรงกดมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ผ่านการทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 70°C และความเร็วลม 1.5 m/s ซึ่งสอดคล้องเช่นเดียวกับกับค่าแรงกดสูงสุดในตัวอย่างฟักทอง (ที่อุณหภูมิ 50°C และความเร็วลม 1.0 m/s และอุณหภูมิ 70°C และความเร็วลม 1.0 m/s) ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิในการอบแห้งที่เพิ่มขึ้น ส่งผลต่ออัตราการระเหยของน้ำที่มากขึ้น และเกิด case hardening ที่มีลักษณะเป็นเปลือกแข็ง ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงสถานะภายในโครงสร้างของตัวอย่าง จากของแข็งคล้ายยาง (rubbery state) เป็นแข็งคล้ายแก้ว (glassy state) ในระหว่างการอบแห้ง ซึ่งส่งผลทำให้เซลล์ภายในตัวอย่างเกิดการหดตัวได้น้อยลง โครงสร้างภายในของตัวอย่างจึง

ยังคงมีความเป็นรูพรุนมาก [31] ค่าเฉลี่ยแรงกดสูงสุดจึงมีแนวโน้มที่ลดลง ในขณะที่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิถึงระดับหนึ่ง (60°C และ 70°C) ค่าแรงกดสูงสุดของทั้งสองตัวอย่างมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) เนื่องจากขนาดและจำนวนของรูพรุนที่อยู่ภายในโครงสร้างของทั้งสองตัวอย่างที่เหมือนกัน (Figure 5 และ Figure 6) คือ มีรูพรุนขนาดใหญ่และจำนวนมาก เมื่อเทียบกับการแห้งที่อุณหภูมิต่ำ (50°C) ซึ่งมีสาเหตุมาจากความเค้นภายในเซลล์ (internal stress) ทำให้เกิดแรงดันไอที่สูงในโครงสร้าง ร่วมกับการเกิด case hardening ในระหว่างการอบแห้ง [32] ซึ่งในทางกลับกันตัวอย่างที่แห้งที่อุณหภูมิต่ำ (50°C) จะเกิดการยุบตัว (collapse) เนื่องจากแรงดันไอต่ำ [32] ส่งผลต่อความแข็งของตัวอย่างที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าความเร็วลมที่เพิ่มขึ้น (ที่อุณหภูมิเดียวกัน) ในการทำให้แห้งไม่มีผลต่อค่าแรงกดสูงสุดของตัวอย่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) อาจเนื่องมาจากความเร็วลมไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่อค่า k และ D_{eff} (Table 1) ซึ่งแสดงว่าการเพิ่มความเร็วลมไม่ส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะที่ผิวหน้าและโครงสร้างระดับจุลภาคของตัวอย่าง จึงทำให้ค่าแรงกดสูงสุดของตัวอย่างมีค่าไม่แตกต่างกัน [33]

*Corresponding author e-mail: c_witth@hotmail.com

¹Department of Food Technology, Faculty of Science, Ramkhamhaeng University, Bangkok, 10240

²Department of Food Technology, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Nakhon Pathom, 73000

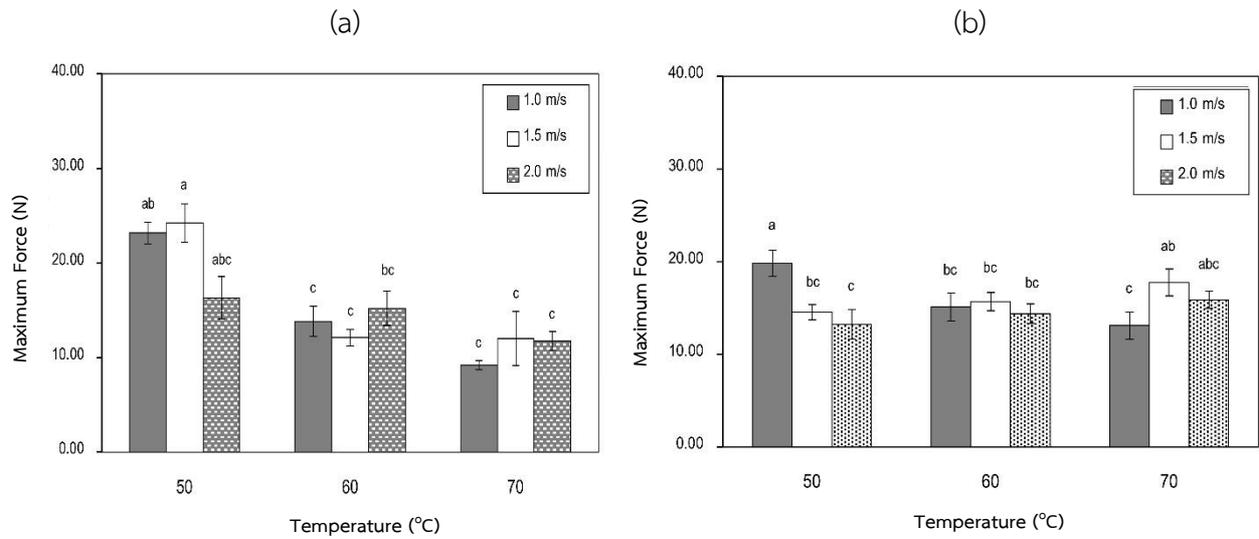


Figure 4. Effect of hot air drying process at various conditions on texture of ripe bananas (a) and pumpkins (b)

^{abc}Means followed by different letters are significantly different ($P < 0.05$).

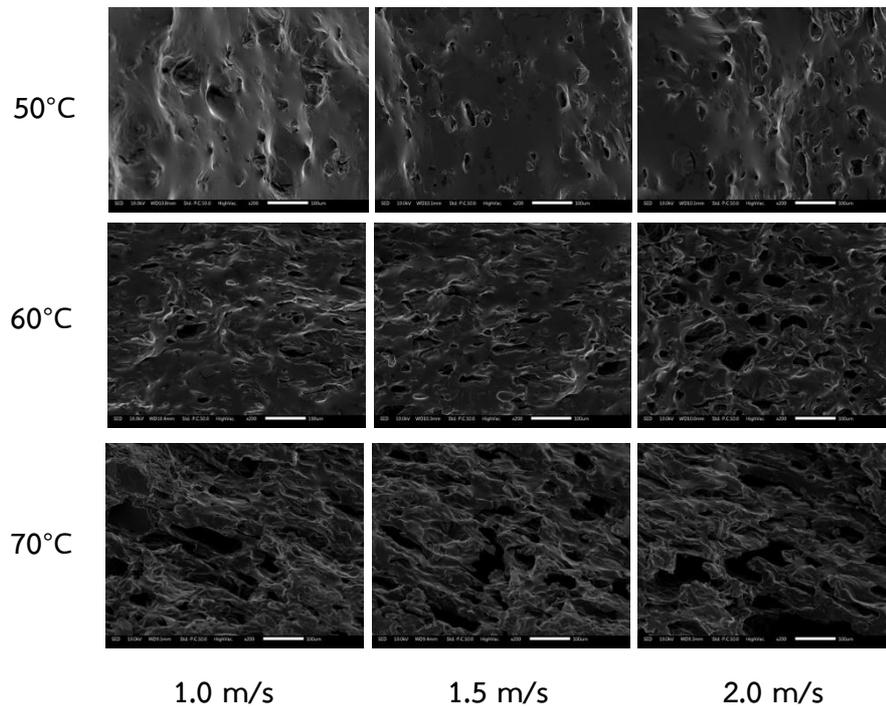


Figure 5. Scanning electron microscope (SEM) of ripe bananas from hot air drying process at various conditions (200x; a scale bar = 100 µm)

*Corresponding author e-mail :c_witth@hotmail.com

¹ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง กรุงเทพมหานคร

²ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม

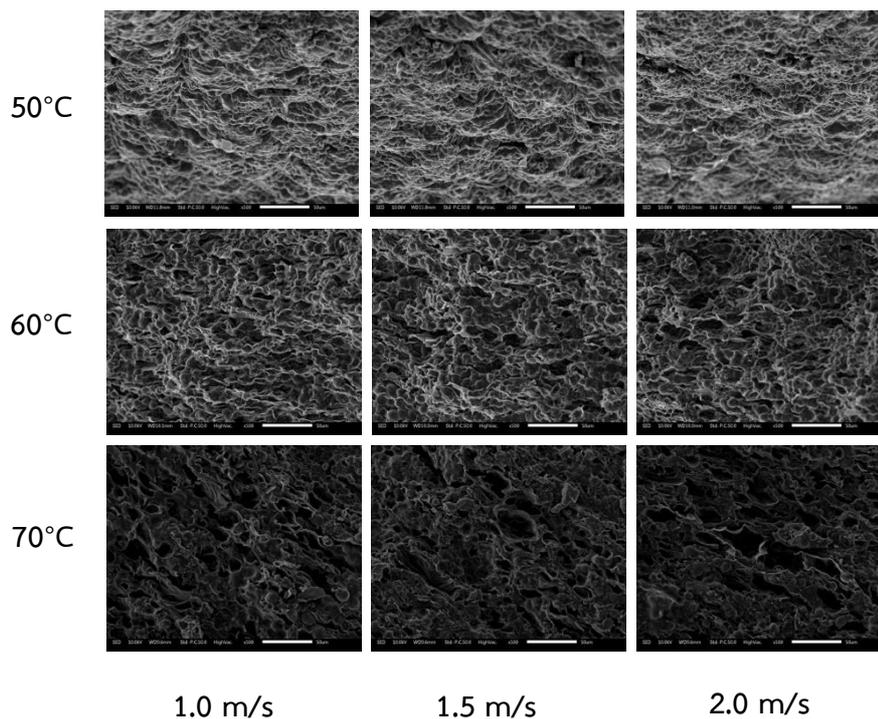


Figure 6. Scanning electron microscope (SEM) of pumpkins from hot air drying process at various conditions (200x; a scale bar = 100 μm)

3. การวิเคราะห์ค่าสี

จากการศึกษาพบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทำแห้งจาก 50°C เป็น 70°C ค่า ΔL^* (ความสว่าง) และ Δa^* (ค่าความเป็นสีแดง) ของตัวอย่างกล้วยหอมสุกและฟักทองมีแนวโน้มลดลง การใช้อุณหภูมิและความเร็วลมต่ำในการทำแห้งส่งผลทำให้ตัวอย่างทั้งสองมีสีคล้ำเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล (browning reaction) ทั้งที่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ (enzymatic browning reaction) และไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ (non-enzymatic bronwing reacton) โดยปฏิกิริยาสีน้ำตาลที่เกิดขึ้นทำให้ค่าสีของตัวอย่างเกิดการเปลี่ยนแปลงในระหว่างกระบวนการทำแห้ง [34-35] รวมถึงค่า ΔE^* ที่แสดงการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของตัวอย่าง ซึ่งจากการทดลองพบว่ากระบวนการทำแห้งที่อุณหภูมิ และความเร็วลมที่สูงสามารถช่วยลดการเปลี่ยนแปลงสีของตัวอย่างทั้งสองได้ (Table 3)

4. การวิเคราะห์คุณภาพทางประสาทสัมผัส

จากการทดสอบทางประสาทสัมผัสด้วยการประเมินความชอบของผู้ทดสอบพบว่า ตัวอย่างกล้วยหอมสุกและฟักทองที่ผ่านกระบวนการทำแห้งที่อุณหภูมิและความเร็วลมสูงได้รับคะแนนความชอบทางด้านสี ลักษณะปรากฏ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม สูงกว่าตัวอย่างที่ทำแห้งในอุณหภูมิและความเร็วลมต่ำ ซึ่งการทำแห้งที่สภาวะดังกล่าว ทำให้คุณภาพของตัวอย่างกล้วยหอมสุกและฟักทองเปลี่ยนแปลงไป เช่น สีที่คล้ำ ค่าแรงกดสูงสุดของตัวอย่างที่ลดลง และส่งผลต่อการให้คะแนนความชอบของผู้ทดสอบในด้านต่างๆ สภาวะในการทำแห้งที่ผู้ทดสอบให้คะแนนความชอบโดยรวมสูงสุดของทั้งสองตัวอย่างคือ ที่อุณหภูมิ 70°C ความเร็วลม 1.0-2.0 m/s ซึ่งทำให้ตัวอย่างกล้วยหอมสุกอบแห้งได้รับคะแนนความชอบอยู่ในช่วงชอบเล็กน้อยถึงชอบปานกลาง (6.6) และตัวอย่างฟักทองอบแห้งอยู่ในช่วงบอกไม่ได้ว่าชอบถึงชอบเล็กน้อย (5.7) (Table 4)

*Corresponding author e-mail: c_witth@hotmail.com

¹Department of Food Technology, Faculty of Science, Ramkhamhaeng University, Bangkok, 10240

²Department of Food Technology, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn Univesity, NakhonPathom, 73000

Table 3. Color parameters (ΔL^* , Δa^* , Δb^* and ΔE^*) of ripe bananas and pumpkins in hot air drying process at various conditions.

Drying conditions	Ripe bananas				Pumpkins				
	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE^*	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE^*	
50°C	1.0 m/s	-10.99±0.98 ^e	3.62±1.59 ^a	-2.42±3.02 ^b	12.17±0.20 ^a	-11.70±0.61 ^b	5.61±0.01 ^{ab}	-7.24±0.26 ^{bc}	14.86 ±0.61 ^a
	15 m/s	-9.33±0.47 ^{cde}	2.67±2.41 ^{abc}	0.16±2.61 ^{ab}	10.00±1.03 ^{bc}	-4.35±1.35 ^a	2.97±0.78 ^{abc}	-5.36±1.71 ^{abc}	7.63±1.65 ^c
	20 m/s	-9.77±1.56 ^{de}	3.25±0.97 ^{ab}	-0.38±3.28 ^{ab}	10.56±1.86 ^{ab}	-5.90±0.80 ^a	2.80±0.80 ^{bcd}	-6.10±1.12 ^{abc}	9.00±1.13 ^{bc}
60°C	1.0 m/s	-10.29±0.19 ^e	1.79±0.27 ^{abc}	2.20±0.09 ^{ab}	10.67±0.12 ^{ab}	-6.70±1.19 ^a	3.20±0.23 ^{abc}	-4.83±1.87 ^{abc}	9.00±0.04 ^{bc}
	15 m/s	-8.45±0.03 ^{cd}	1.44±0.30 ^{abc}	1.93±0.21 ^{ab}	8.79±0.12 ^{cd}	-5.76±3.76 ^a	6.02±1.56 ^a	-8.94±4.29 ^c	12.91±0.57 ^{ab}
	20 m/s	-7.74±0.01 ^{bc}	1.05±0.13 ^{bc}	2.29±0.71 ^{ab}	8.16±0.23 ^{de}	-7.33±1.22 ^{ab}	1.99±1.23 ^{cd}	-3.28±1.73 ^{ab}	8.50±0.65 ^c
70°C	1.0 m/s	-6.04±0.64 ^{ab}	0.42±0.07 ^c	4.63±0.23 ^a	7.64±0.37 ^{de}	-4.76±2.21 ^a	1.71±2.47 ^{cd}	-2.67±1.64 ^{ab}	6.28±0.30 ^c
	15 m/s	-6.32±0.85 ^{ab}	1.89±0.01 ^{abc}	1.35±0.04 ^{ab}	6.74±0.81 ^{ef}	-5.28±0.04 ^a	1.83±0.54 ^{cd}	-5.76±1.26 ^{abc}	8.06±0.75 ^c
	20 m/s	-5.48±0.30 ^a	1.22±0.85 ^{abc}	-0.21±1.14 ^{ab}	5.70±0.52 ^f	-5.11±0.43 ^a	-0.50±0.54 ^d	-2.02±3.39 ^a	6.01±0.73 ^c

^{abcdef} Values in the same column followed by different letters are significantly different ($p \leq 0.05$).

Table 4. Sensory evaluation of ripe bananas and pumpkins in hot air drying process at various conditions.

Drying conditions	Ripe bananas					Pumpkins				
	Color	Appearance	Odor ^{ns}	Texture	Overall liking	Color	Appearance ^{ns}	Odor	Texture	Overall liking
1.0 m/s	4.4±1.8 ^d	4.6±2.1 ^c	5.4±1.6	4.4±2.3 ^b	4.8±1.9 ^b	4.0±2.0 ^d	4.5±1.7	5.8±1.7 ^a	4.1±1.6 ^c	3.8±1.5 ^c
50°C	1.5 m/s	3.9±1.5 ^d	5.4±1.9 ^{abc}	4.5±1.8	5.9±1.7 ^a	5.0±1.8 ^b	4.8±1.8 ^{bcd}	5.4±2.1	5.3±1.9 ^{ab}	4.8±1.7 ^{abc}
	2.0 m/s	4.7±1.7 ^{cd}	5.5±1.7 ^{abc}	5.1±1.7	5.5±1.5 ^{ab}	4.5±1.8 ^b	5.4±1.6 ^{abc}	4.6±1.9	6.1±1.8 ^a	4.7±1.4 ^{bc}
60°C	1.0 m/s	4.8±1.8 ^{bcd}	5.3±2.0 ^{abc}	5.2±1.7	5.9±1.4 ^a	5.0±1.7 ^b	5.5±1.8 ^{abc}	5.2±1.8	4.3±2.1 ^b	5.1±1.3 ^{abc}
	1.5 m/s	6.0±1.7 ^{ab}	5.6±1.6 ^{abc}	5.9±1.5	4.2±1.8 ^b	5.5±2.2 ^{ab}	4.4±2.0 ^{cd}	5.6±2.0	5.5±1.8 ^{ab}	5.5±2.0 ^{ab}
	2.0 m/s	5.1±1.5 ^{bcd}	4.8±1.6 ^{bc}	5.5±1.8	5.4±1.5 ^{ab}	4.6±2.0 ^b	4.7±2.0 ^{bcd}	5.6±1.5	4.8±2.1 ^{ab}	6.0±1.5 ^a
70°C	1.0 m/s	5.9±1.6 ^{abc}	5.9±1.2 ^{abc}	5.7±1.9	5.1±2.2 ^{ab}	5.05±1.5 ^b	6.4±1.5 ^a	4.6±2.0	5.9±1.5 ^a	4.9±1.7 ^{abc}
	1.5 m/s	6.5±1.8 ^a	6.6±2.0 ^a	5.8±1.7	4.5±1.9 ^b	5.9±2.0 ^{ab}	5.9±1.8 ^{ab}	5.6±1.7	5.2±1.4 ^{ab}	5.7±1.9 ^{ab}
	2.0 m/s	6.4±1.7 ^a	6.0±1.9 ^{ab}	5.4±1.4	5.8±1.2 ^a	6.6±2.4 ^a	6.1±2.1 ^a	5.3±1.9	5.5±1.9 ^{ab}	5.4±1.8 ^{abc}

^{abcd} Values in the same column followed by different letters are significantly different ($p \leq 0.05$).

^{ns} means that odor of ripe bananas and appearance of pumpkins are not significantly different ($p > 0.05$).

สรุปผล

สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทำแห้งกล้วยหอมและฟักทองคือ สภาวะที่อุณหภูมิ 70°C และความเร็วลม 2.0 m/s ทำให้อัตราเร็วในการทำแห้งของกล้วยหอมสุกและฟักทองมีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (D_{eff}) ของตัวอย่างกล้วยหอมสุกมีค่าอยู่ในช่วง $(1.66-5.40) \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ และตัวอย่างฟักทองมีค่าอยู่ในช่วง $(4.02-11.00) \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ สำหรับค่า a_w ของตัวอย่างกล้วย

หอมสุกอบแห้งจะมีค่าอยู่ในช่วง 0.56- 0.58 (MR: 19.50-20.62% (dry basis)) ในขณะที่ตัวอย่างฟักทองจะมีค่า a_w ในช่วง 0.55-0.57 (MR: 7.89- 8.28% (dry basis)) ขณะที่ค่า a_w นั้นมีค่าใกล้เคียงกัน สำหรับการใช้อุณหภูมิและความเร็วลมที่ต่ำ (50°C, ความเร็วลม 1 m/s) ส่งผลทำให้ตัวอย่างกล้วยหอมสุกและฟักทองอบแห้งมีความแข็งมากขึ้น เนื่องจากโครงสร้างมีขนาดและจำนวนของรูพรุนน้อย รวมไปถึงสีคล้ำกว่าตัวอย่างที่ทำแห้งในอุณหภูมิและความเร็วลมที่สูง ซึ่งจากการ

*Corresponding author e-mail : c_witth@hotmail.com

¹ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง กรุงเทพมหานคร

²ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม

ประเมินความชอบของผู้ทดสอบพบว่า ตัวอย่างทั้งสองที่ผ่านการทำแห้งในสภาวะการอบที่อุณหภูมิและความเร็วลมที่สูงได้รับคะแนนความชอบสูงสุด ดังนั้นงานวิจัยนี้จะมีประโยชน์ในการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมการอบแห้ง ผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรหรือการนำไปใช้อบแห้งพืชผักเพื่อนำไปใช้เป็นส่วนประกอบในอุตสาหกรรมอาหารชนิดอื่น เช่น การอบแห้งชิ้นฟักทองหรือกล้วยหอมสุกเพื่อใช้เป็นองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์อาหารเข้า ใจักหรือบะหมี่กึ่งสำเร็จรูปได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยรามคำแหง ที่ให้ทุนอุดหนุนปีงบประมาณ 2560 ในการดำเนินการโครงการวิจัยนี้ ขอขอบคุณภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ ที่ให้การสนับสนุนมาโดยตลอด และขอขอบคุณผู้ที่มีส่วนช่วยในงานวิจัยนี้ทุกท่าน

เอกสารอ้างอิง

- [1] Gouveia, J.P.G., Nascimento, J., Almeida, F.A.C., Silva, M.M., Farias, E.S. and Silva, F.L.H. (2004). Mathematical models for adjustment of desorption isotherms of banana variety silver (In Portuguese). *Engenharia Agrícola*. 24(3): 799–806.
- [2] Arévalo-Pinedo, A. and Murr, F.E.X. (2006). Kinetics of vacuum drying of pumpkin (*Cucurbita maxima*): modelling with shrinkage. *Journal of Food Engineering*. 76: 562–567.
- [3] Alibas, I. (2007). Microwave, air and combined microwave-air-drying parameters of pumpkin slices. *LWT-Food Science and Technology*. 40(8): 1445–1451.
- [4] Promsakha na Sakon Nakhon, P., K. Jangchud, A. Jangchud and W. Prinyawiwatkul. (2017). Comparisons of physicochemical properties and antioxidant activities among pumpkin (*Cucurbita moschata* L.) flour and isolated starches from fresh pumpkin or flour. *International Journal of Food Science and Technology*. 52: 2436-2444.
- [5] Nguyen, M.H. and Price, W.E. (2007). Air-drying of banana: Influence of experimental parameters, slab thickness, banana maturity and harvesting season. *Journal of Food Engineering*. 79: 200–207.
- [6] Fernando, W.J.N., Low, H.C. and Ahmad, A.L. (2011). Dependence of the effective diffusion coefficient of moisture with thickness and temperature in convective drying of sliced materials. A study on slices of banana, cassava and pumpkin. *Journal of Food Engineering*. 102: 310–316.
- [7] Thuwapanichayanan, R., Prachayawarakorn, S., Kunwisawa, J. and Soponronnarit, S. (2011). Determination of effective moisture diffusivity and assessment of quality attributes of banana slices during drying. *LWT-Food Science and Technology*. 44: 1502–1510.
- [8] Silva, W.P., Silva, C.M.D.P.S. and Gomes, J.P. (2013). Drying description of cylindrical pieces of bananas in different temperatures using diffusion models. *Journal of Food Engineering*. 117: 417–424.
- [9] Leite, J.B., Mancini, M.C. and Borges, S.V. (2007). Effect of drying temperature on the quality of dried bananas cv. prata and d'água. *LWT-Food Science and Technology*. 40: 319–323.

*Corresponding author e-mail: c_withu@hotmail.com

¹Department of Food Technology, Faculty of Science, Ramkhamhaeng University, Bangkok, 10240

²Department of Food Technology, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, NakhonPathom, 73000

- [10] Akpınar, E.K., Midilli, A. and Bicer, Y. (2006). The first and second law analyses of thermodynamic of pumpkin drying process. *Journal of Food Engineering*. 72: 320–331.
- [11] Doymaz, I. (2007). The kinetics of forced convective air-drying of pumpkin slices. *Journal of Food Engineering*. 79: 243–248.
- [12] Nawirska, A., Figiel, A., Kucharska, A.Z., Sokół-Łętowska, A. and Biesiada, A. (2009). Drying kinetics and quality parameters of pumpkin slices dehydrated using different methods. *Journal of Food Engineering*. 94: 14–20.
- [13] Guiné, R.P.F., Pinho, S. and Barroca, M.J. (2011). Study of the convective drying of pumpkin (*Cucurbita maxima*). *Food and Bioproducts Processing*. 89: 422–428.
- [14] Hashim, N., Daniel, O. and Rahaman, E. (2014). A Preliminary Study: Kinetic Model of Drying Process of Pumpkins (*Cucurbita Moschata*) in a Convective Hot Air Dryer. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*. 2: 345-352.
- [15] Guiné, R.P.F. and Barroca, M.J. (2012). Effect of drying treatments on texture and color of vegetables (pumpkin and green pepper). *Food and Bioproducts Processing*. 90: 58–63.
- [16] AOAC. (2000). Official methods of analysis. AOAC Official Method 935.29. Association of Official Analytical Chemists, Gaithersburg, MD.
- [17] Crank, J. (1975). *The Mathematics of diffusion*. Oxford: Clarendon Press.
- [18] Bains, R. and Langrish, T.A.G. (2008). An assessment of the mechanisms for diffusion in the drying of bananas. *Journal of Food Engineering*. 85: 201–214.
- [19] Seremet, L., Botez, E., Nistor, O.V., Andronoiu, D.G. and Mocanu, G.D. (2016). Effect of different drying methods on moisture ratio and rehydration of pumpkin slices. *Food Chemistry*. 195: 104–109.
- [20] Prachayawarakorn, S., Tia, W. and Soponronnarit, S. Drying kinetics and quality attributes of low-fat banana slices dried at high temperature. *Journal of Food Engineering*. 85: 509–517.
- [21] Meilgaard, M.C., Civille, G.V. and Carr, B.T. (2007). *Sensory Evaluation Techniques*. (4th ed.). Boca Raton: CRC Press.
- [22] Dissa, A.O., Desmorieux, H., Bathiebo, J. and Koulidiati, J. (2008). Convective drying characteristics of Amelie mango (*Mangifera indica* L. cv. ‘Amelie’) with correction for shrinkage. *Journal of Food Engineering*. 88: 429-437.
- [23] Hii, C.L., Law, C.L. and Cloke, M. (2009). Modeling using a new thin layer drying model and product quality of cocoa. *Journal of Food Engineering*. 90: 191–198.
- [24] Tunde-Akintunde, T.Y. and Ogunlakin, G.O. (2011). Influence of drying conditions on the effective moisture diffusivity and energy requirements during the drying of pretreated and untreated pumpkin. *Energy Conversion and Management*. 52: 1107–1113.

*Corresponding author e-mail :c_withu@hotmail.com

¹ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง กรุงเทพมหานคร

²ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม

- [25] Dutta, P.P. and Baruah, D.C. (2014). Drying modelling and experimentation of Assam black tea (*Camellia sinensis*) with producer gas as a fuel. *Applied Thermal Engineering*. 63: 495–502.
- [26] Prachayawarakorn, S., Tia, W., Plyto, N. and Soponronnarit, S. (2008). Drying kinetics and quality attributes of low-fat banana slices dried at high temperature. *Journal of Food Engineering*. 85: 509–517.
- [27] Nimmol, C., Devahastin, S., Swasdisevi, T. and Soponronnarit, S. (2007). Drying and heat transfer behavior of banana undergoing combined low-pressure superheated steam and far-infrared radiation drying. *Applied Thermal Engineering*. 27: 2483–2494.
- [28] Karim, M.A. and Hawlader, M.N.A. (2005). Drying characteristics of banana: theoretical modelling and experimental validation. *Journal of Food Engineering*. 70: 35–45.
- [29] Agrawal, S.G. and Methekar, R.N. (2017). Mathematical model for heat and mass transfer during convective drying of pumpkin. *Food and Bioprocess Technology*. 10: 68–73.
- [30] Kaymak-Ertekin, F. and Gedik, A. (2004). Sorption isotherms and isosteric heat of sorption for grapes, apricots, apples and potatoes. *Lebensmittel-Wissenschaft & Technologie*. 37: 429–438.
- [31] Mayor, L., and Sereno, A.M. (2004). Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review. *Journal of Food Engineering*. 61: 373–386.
- [32] Aral, S. and Beşe, A.V. (2016). Convective drying of hawthorn fruit (*Crataegus* spp.): Effect of experimental parameters on drying kinetics, color, shrinkage, and rehydration capacity. *Food Chemistry*. 210: 577–584.
- [33] Malaikritsanachalee, P., Choosri, W. and Choosri, T. (2018). Study on kinetics of flow characteristics in hot air drying of pineapple. *Food Science and Biotechnology*. 27(4): 1047–1055.
- [34] Lopez, A., Pique, M.T., Boatella, J., Romero, A., Ferran, A. and Garcia, J. (1997). Influence of drying conditions on the hazelnut quality: III. Browning. *Drying Technology*. 15: 989–1002.
- [35] Maskan, M. (2000). Microwave/air and microwave finish drying of banana. *Journal of Food Engineering*. 44: 71–78.

*Corresponding author e-mail: c_withu@hotmail.com

¹Department of Food Technology, Faculty of Science, Ramkhamhaeng University, Bangkok, 10240

²Department of Food Technology, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Nakhon Pathom, 73000