

จลนพลศาสตร์การอบแห้งมะม่วงเบาด้วยวิธีอบแห้งแบบสุญญากาศ

Vacuum Drying Kinetics of Mango (*Mangifera indica* L. Var.) Slices

วรรณพิชญ์ จุลกัลป์*

Wannapit Junlakan*

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานีจังหวัดสุราษฎร์ธานี

Program in Food Science and Technology, Faculty of Science and Technology, Suratthani Rajabhat University

Received : 8 June 2017

Accepted : 5 September 2017

Published online : 3 October 2017

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสภาวะในการอบแห้งที่มีผลต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้ง และคุณภาพทางกายภาพของมะม่วงเบาอบแห้งแบบสุญญากาศ การทดลองอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 70 และ 80°C ที่ความดัน 30 mmHg โดยใช้มะม่วงเบาปรุงแต่งที่แตกต่างกัน (ส่วนขอบด้านหน้าของผล (ส่วนที่ 1 และ 3) ส่วนกลางของผล (ส่วนที่ 2 และ 4) และส่วนขอบด้านข้างของผล (ส่วนที่ 5 และ 6)) อบแห้งด้วยวิธีการอบแห้งแบบสุญญากาศ (VD) เปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งด้วยการพาความร้อนจากลมร้อน (CD) ผลการทดลองพบว่าวิธีการอบแห้งด้วยวิธี VD ที่อุณหภูมิสูง จะใช้ระยะเวลาการอบแห้งสั้นกว่าและค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นสูง มะม่วงอบแห้งหตุตัวต่ำ ค่าความเป็นสีเหลืองสูง ความแข็งน้อย และสัดส่วนโครงสร้างที่มีลักษณะโปร่ง มีรูพรุนจำนวนมากเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งวิธี CD ที่อุณหภูมิต่ำ ดังนั้นการอบแห้งด้วยวิธี VD ที่ 80°C ถูกพิจารณาเป็นสภาวะที่ดีที่สุดในการอบแห้ง การอบแห้งมะม่วงส่วน 2,4 1,3 และ 5,6 ใช้ระยะเวลาในการอบแห้ง 300 300 และ 240 นาทีตามลำดับ แบบจำลองที่เหมาะสมเพื่อทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งสุญญากาศมะม่วงที่อุณหภูมิ 60°C ของมะม่วงส่วน 2,4 5,6 และ 1,3 คือ สมการ diffusion approach Page และ diffusion approach ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 70°C คือ diffusion approach diffusion approach และ Page ตามลำดับ และสมการ Page สำหรับอุณหภูมิการอบแห้ง 80°C ของทุกส่วนของมะม่วง

คำสำคัญ : จลนพลศาสตร์การอบแห้ง ลมร้อน มะม่วง โครงสร้าง อบแห้งสุญญากาศ

*Corresponding author. E-mail : wannapit.jun@sru.ac.th

Abstract

The purpose of this research was to study the effect of drying conditions on drying kinetics and physical qualities of vacuum-dried Bao Mango. Drying experiments were carried out at the different drying temperatures (60°C, 70°C, and 80°C at 30 mmHg) by using different shapes of fruit with vacuum drying (VD) (front of near skin (part 1,3), middle (part 2,4) and side of near skin (part 5,6)) compared with conventional convective drying method (CD). The experimental results showed that the VD method at high temperature for all three shapes of fruits showed the fastest drying time, the higher values of the effective moisture diffusivity, lower shrinkage, higher yellowness, lower hardness and higher number of pores, when compared with CD method at low-temperature drying. Consequently, the VD at drying air temperature of 80°C was suggested as the best drying condition. At this conditions, the drying time of part 2,4 5,6 and 1,3 were 300, 300 and 240 min, respectively. The suitable thin layer model for VD of mango slice with different part of 2,4 5,6 and 1,3 at 60°C were diffusion approach, Page and diffusion approach and at 70°C were diffusion approach, diffusion approach and Page, respectively. And the Page of the model showed an excellent fit with the experiment of all shapes of vacuum-dried mango for the drying temperature of 80°C.

Keywords : drying kinetic, hot air, mango, structure, vacuum drying

บทนำ

มะม่วงเบา (*Mangifera indica L. Var.*) เป็นผลไม้ที่ปลูกมากทางภาคใต้ของไทย ราคาถูก และอุดมด้วยแคลเซียม วิตามินซี และวิตามินบี 2 ช่วยป้องกันไขมันอุดตันในเส้นเลือด (Kin Dee U Dee, 2015) จึงเป็นผลไม้ที่เหมาะสมสำหรับผู้บริโภคที่ห่วงใยสุขภาพ รับประทานแล้วไม่อ้วนเมื่อเทียบกับมะม่วงสายพันธุ์อื่น ส่วนใหญ่ใช้มะม่วงเบาในการประกอบอาหารที่มีรสเปรี้ยว เช่น ยำ น้ำพริก หรือใช้เป็นสารให้รสเปรี้ยวแทนมะนาว แต่ปัจจุบันมีการนำมะม่วงเบามาใช้ประโยชน์ค่อนข้างน้อย เมื่อเทียบกับมะม่วงสายพันธุ์อื่น เนื่องจากผลมีขนาดเล็กและรสชาติเปรี้ยวจัด ส่งผลให้มีผลผลิตทางการเกษตรเหลือทิ้งมากมาย การอบแห้งเป็นทางเลือกที่ช่วยยืดอายุการเก็บรักษาผลไม้โดยการลดความชื้นในผลไม้ อีกทั้งผลิตภัณฑ์ไม่มีส่วนผสมของน้ำมันหรือน้ำตาลซึ่งเป็นสาเหตุของโรคอ้วน จึงได้รับความนิยมในปัจจุบันโดยเฉพาะกลุ่มผู้บริโภคที่ใส่ใจสุขภาพ การอบแห้งโดยทั่วไปใช้ลมร้อนพัดผ่านอาหารเพื่อดึงน้ำออกจากอาหาร มีอัตราการอบแห้งต่ำ ใช้เวลาอบแห้งนาน ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์สูญเสียคุณค่าทางโภชนาการเนื่องจากการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงเป็นระยะเวลาเวลานาน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีลักษณะเหนียวและ การคืนรูปไม่ดี (Therdthai & Krajangmathekul, 2013)

การอบแห้งสุญญากาศเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับผู้ประกอบการที่ต้องการผลไม้อบแห้งที่คงไว้ซึ่งคุณค่าทางโภชนาการ สี กลิ่นและรสชาติใกล้เคียงผลไม้สดเนื่องจากการอบแห้งที่ใช้หลักการลดความดันเพื่อลดอุณหภูมิในการอบ ช่วยลดระยะเวลาในการอบแห้ง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความกรอบและคงไว้ซึ่งสี กลิ่น รสชาติและคุณค่าทางอาหารใกล้เคียงกับผลไม้สดเมื่อเทียบกับวิธีการอบแห้งแบบดั้งเดิมที่ใช้ลมร้อน (Qiao *et al.*, 2013; Jaya & Das, 2003) อีกทั้งการอบแห้งแบบสุญญากาศยังเป็นการนำความชื้นของอาหารขณะที่ช่วยป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเนื่องจากการสัมผัสออกซิเจน

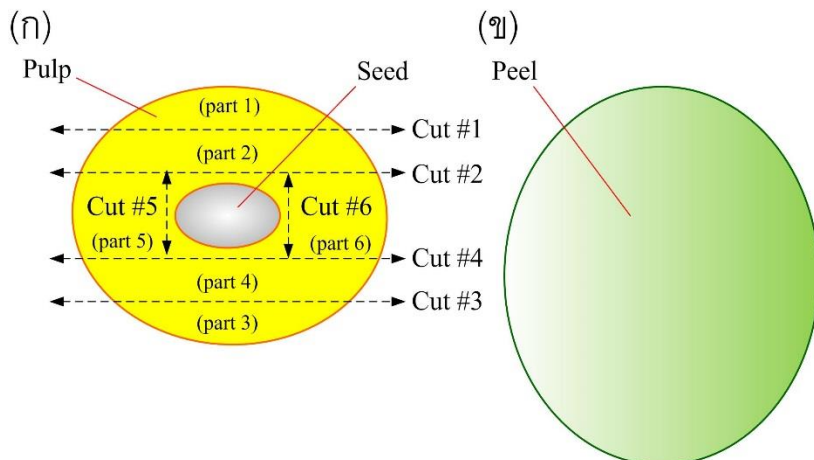
ในอากาศ (Ashraf *et al.*, 2012) ในขณะที่เครื่องอบแห้งสุญญากาศอาจมีราคาแพงกว่าเครื่องอบแห้งแบบดั้งเดิมที่ใช้ลมร้อนถึง 2 เท่า (ราคาเครื่องอบแห้งสุญญากาศโดยทั่วไป 2,500 – 100,000 USD ในขณะที่ราคาเครื่องอบแห้งลมร้อนทั่วไป 5,000-20,000 USD สำหรับเครื่องที่กำลังการผลิต 50-400 kg ข้อมูลจาก <http://www.alibaba.com>) แต่อย่างไรก็ตามจากข้อได้เปรียบดังกล่าวข้างต้นทำให้วิธีการอบแห้งสุญญากาศยังคงเป็นตัวเลือกที่เป็นไปได้สำหรับอุตสาหกรรมผลิตอาหารจำนวนมาก (Junlakan *et al.*, 2017)

ปัจจัยที่สำคัญปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการอบแห้ง คือ ขนาด รูปร่าง โครงสร้างและลักษณะต่อลำเลียงน้ำและอาหารของผลไม้ โดยปัจจัยเหล่านี้มีผลต่อพื้นที่ผิวต่อน้ำหนักของผลไม้และการถ่ายโอนความร้อนออกจากผลไม้ซึ่งส่งผลให้ใช้ระยะเวลาการอบแห้งที่แตกต่างกัน โดยอาหารที่มีขนาดเล็กหรือรูปร่างเป็นแผ่นบางจะมีพื้นที่ผิวต่อน้ำหนักมาก การถ่ายโอนความร้อนออกจากอาหารเกิดขึ้นได้เร็วและใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่าอาหารที่มีขนาดใหญ่และหนา ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อนำมะม่วงเบามาแปรรูปด้วยวิธีอบแห้งสุญญากาศ เพื่อพัฒนาเป็นอาหารเพื่อสุขภาพ ใช้ปรุงอาหาร หรือเป็นสารให้ความเปรี้ยวทดแทนมะนาว โดยศึกษารูปร่างและโครงสร้างของเนื้อมะม่วงเบาสวนต่างๆที่ผลที่มีผลต่อระยะเวลาการอบแห้งที่แตกต่างกัน เนื่องจากในกระบวนการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรในปัจจุบัน การเตรียมผลไม้ถูกหั่นเพื่อตัดแยกส่วนเมล็ดออก ส่งผลให้ได้ส่วนของเนื้อผลไม้ในแต่ละชั้นที่มีขนาดและรูปแบบที่แตกต่างกัน เหล่านี้ล้วนมีผลต่ออัตราการอบแห้งที่แตกต่างกันนำไปสู่ระยะเวลาในการอบแห้งที่แตกต่างกัน ดังนั้นการทราบสถานะและระยะเวลาที่เหมาะสมในการอบแห้งเนื้อผลไม้ในแต่ละส่วนที่มีคุณลักษณะแตกต่างกันจึงเป็นสิ่งจำเป็น เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพ ตรงตามความต้องการของผู้บริโภค ลดส่วนเนื้อผลไม้เหลือทิ้งและเพื่อใช้ประโยชน์จากส่วนของเนื้อผลไม้อย่างคุ้มค่ามากที่สุด เพื่อหาสถานะที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งสุญญากาศมะม่วงแต่ละส่วน และศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งต่อคุณภาพของมะม่วงเบาเพื่อหาแบบจำลองการอบแห้งมะม่วงเบาที่เหมาะสม ใช้ในการทำนายการลดลงของปริมาณความชื้นและเวลาที่เหมาะสมในการอบแห้ง เพื่อประหยัดค่าใช้จ่ายทำการทดลองและประหยัดเวลาการศึกษาอุณหภูมิและระยะเวลาที่เหมาะสมในการอบแห้ง

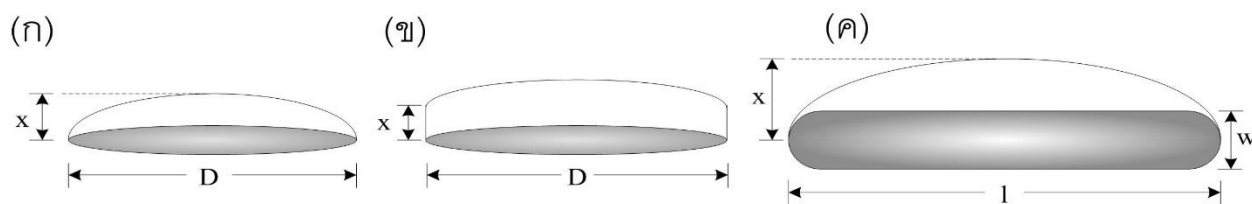
วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมวัตถุดิบ

มะม่วงเบา ที่ได้จากตลาดในท้องถิ่น อำเภอเมืองฯ จังหวัดสุราษฎร์ธานี คัดเลือกเฉพาะผลอ่อน ล้างทำความสะอาด ปอกเปลือกและแช่น้ำเกลือ 1 % w/v เป็นเวลา 2 min จากนั้นหั่นตามแนวเส้นประในภาพที่ 1 จะได้มะม่วงเบา 3 ส่วน คือ ส่วนริม (ชั้นที่ 1 และ 3) ส่วนกลาง (ชั้นที่ 2 และ 4) และส่วนขอบด้านข้าง (ชั้นที่ 5 และ 6) หั่นความหนา 3.5-4.5 2.5-3.5 และ 6.5-7.5 mm ตามลำดับ ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 1 (ก) และ (ข) แสดงภาพตัดขวางลักษณะการหั่นและลักษณะภายนอกของมะม่วง ตามลำดับ



ภาพที่ 2 ลักษณะของตัวอย่างมะม่วงเบาที่ใช้ในการทดลอง โดยที่ (ก) (ข) และ (ค) คือ ส่วน 1 และ 3, ส่วน 2 และ 4, และ ส่วน 5 และ 6 ตามลำดับ

2. การอบแห้ง

นำมะม่วงเบาจัดเรียงลงในถาดขนาด 17.78 x 27.94 x 3.81 cm ปริมาณ 70 - 80 g นำเข้าเครื่องอบแห้งสุญญากาศ (ยี่ห้อ Jeio Tech รุ่น OV-11) อบที่อุณหภูมิ 60 70 และ 80°C ความดัน 30 mmHg อบแห้งจนกระทั่งผลไม่มีความชื้นสุดท้ายน้อยกว่า 18 % ฐานเปียก โดยอ้างอิงจากค่าความชื้นมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมผลไม้อบแห้ง (มอก. 919-2532) (National Food Institute, 2007) มะม่วงเบาอบแห้งที่ได้ถูกบรรจุในถุงพลาสติก ปิดผนึกถุงแบบสุญญากาศและเก็บในกล่องสุญญากาศที่อุณหภูมิ 4°C เพื่อใช้วิเคราะห์ขั้นต่อไป

3. การวิเคราะห์คุณภาพด้านสี การหดตัว ความแข็งและความกรอบของมะม่วงอบแห้งสุญญากาศ

3.1 ค่าสี ทำการวัดโดยใช้เครื่อง Chroma Meter รุ่น CR-400 ใช้การวัดสีในระบบ CIE Lab เพื่อวิเคราะห์ค่า L^* a^* และ b^* ค่าที่ได้ในแต่ละสภาวะได้จากการเฉลี่ยจากกลุ่มตัวอย่าง 10 ชิ้น ค่าการเปลี่ยนแปลงของสีเมื่อเปรียบเทียบกับมะม่วงสด คำนวณได้จากสมการที่ 1 (Swasdisevi *et al.*, 2007)

$$\frac{\Delta L^*}{L_0^*} = \frac{L^* - L_0^*}{L_0^*}, \frac{\Delta a^*}{a_0^*} = \frac{a^* - a_0^*}{a_0^*}, \text{ และ } \frac{\Delta b^*}{b_0^*} = \frac{b^* - b_0^*}{b_0^*} \quad (1)$$

เมื่อ ΔL^* Δa^* และ Δb^* คือค่าการเปลี่ยนแปลงความสว่าง ความแดงและความเหลืองของมะม่วงเบาอบแห้ง เปรียบเทียบกับมะม่วงเบาสด โดยที่ L^* a^* และ b^* คือ ค่าความสว่าง ความแดงและความเหลืองของมะม่วงเบาหลังอบ และ L_0^* a_0^* และ b_0^* คือ ค่าความสว่าง ความแดงและความเหลืองของมะม่วงเบาก่อนอบ ตามลำดับ

3.2 การหัดตัว การหัดตัวของมะม่วงเบาอบแห้ง ทดสอบโดยวัดใช้เวอร์เนียร์คิเจอร์ ความละเอียด ± 0.1 mm วัดเส้นผ่านศูนย์กลาง ความกว้าง ความยาวและความหนาของมะม่วงเบาก่อนและหลังการอบแห้ง ตัวอย่างละ 3 ตำแหน่ง จำนวน 6 ตัวอย่าง คำนวณโดยใช้สมการที่ 2 (Yamsaengsung *et al.*, 2011)

$$\begin{aligned} \% \text{ Thickness shrinkage} &= \left(\frac{x_0 - x}{x_0} \right) 100, \quad \% \text{ Diameter shrinkage} = \left(\frac{D_0 - D}{D_0} \right) 100 \\ \% \text{ Width shrinkage} &= \left(\frac{w_0 - w}{w_0} \right) 100, \text{ และ } \% \text{ Length shrinkage} = \left(\frac{l_0 - l}{l_0} \right) 100 \end{aligned} \quad (2)$$

เมื่อ x D w และ l คือ ความหนา เส้นผ่านศูนย์กลาง ความกว้าง และความยาวของมะม่วงเบาหลังอบ (mm) และ x_0 D_0 w_0 และ l_0 คือ ความหนา เส้นผ่านศูนย์กลาง ความกว้าง และความยาวของมะม่วงเบาก่อนอบ (mm) ตามลำดับ

3.3 ความกรอบ (crispness) และความแข็ง (hardness) วัดโดยใช้เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Texture Analyzer) (CT3, UK) หัววัด knife blade ความสูง 30 mm ใช้โหลดเซลล์ 5 g ในการวัดใบมีดจะทำการกดลงบนตัวอย่างด้วยความเร็วในการทดสอบ 2 mm/s จนกระทั่งตัวอย่างแตกหัก โดยวัดค่าความแข็งโดยพิจารณาจากแรงกดสูงสุด (maximum force) และวัดค่าความกรอบโดยพิจารณาจากจำนวนยอดพีค (number of peaks) (Nimmol *et al.*, 2007) โดยแต่ละตัวอย่างวัดจำนวน 10 ซ้ำ

4. ศึกษาแบบจำลองที่เหมาะสมเพื่อทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้ง

สัดส่วนความชื้น (Moisture Ratio, MR) ของแต่ละตัวอย่างระหว่างการอบแห้ง ของตัวอย่างคำนวณดังสมการที่ 3

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (3)$$

เมื่อ M_t คือ ปริมาณความชื้นที่เวลาใดๆของวัสดุ ($g_{\text{water}}/g_{\text{solid}}$), M_e คือ ปริมาณความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content) ($g_{\text{water}}/g_{\text{solid}}$), M_0 คือ ปริมาณความชื้นเริ่มต้น โดยในการทดลองกำหนดให้ M_e มีค่าเป็นศูนย์ เพราะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ M_0

ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนความชื้นและเวลาถูกนำมาพล็อตกราฟและสร้างสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 6 สมการแบบจำลอง ได้แก่ Newton's model, logarithmic model, Page's model, two-term model, two-term exponential model และ Diffusion approach เพื่อหาแบบจำลองที่เหมาะสมเพื่อทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งสุญญากาศมะม่วงเบา โดยนำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคสมการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (nonlinear regression analysis) เพื่อเลือกแบบจำลองที่ดีที่สุด โดยเป็นแบบจำลองการอบแห้งที่ให้ค่า Correlation coefficient (R^2) สูงสุด ค่า Root Mean Square Error (RMSE) และ Chi-square (χ^2) ต่ำสุด (Zakipour & Hamidi, 2011)

นอกจากนี้ยังทำการเปลี่ยนแปลงความชื้นระหว่างการอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งที่ลดลง โดยใช้สมการทฤษฎีซึ่งความสัมพันธ์อยู่ในรูปกฎข้อที่สองของ Fick ในการทดลองเลือกใช้สมการค่าสัมประสิทธิ์การแพร่สำหรับวัสดุที่มีรูปทรงเป็นแผ่นระนาบที่มีความยาวมากๆ (Infinite slab) และมีความหนาครึ่งหนึ่งของอาหารหรือวัสดุชีวภาพที่มีรูปร่างเป็นแผ่นระนาบ ดังสมการที่ 4

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{p=0}^{\infty} \left[\frac{1}{(2p+1)^2} \right] \exp \left[- \frac{(2p+1)^2 \pi^2 D_{eff} \theta}{l^2} \right] \quad (4)$$

เมื่อ D_{eff} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (mm^2/s), θ คือเวลาในการอบแห้ง (s), l คือ ความหนาของมะม่วง (mm), p คือ จำนวนเทอมที่ใช้พิจารณา (Crank, 1975; Bouraoui et al., 1994; Rasouli et al., 2011)

พลังงานกระตุ้นสำหรับการแพร่ (E_a) แสดงถึงค่าพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นให้น้ำเคลื่อนที่ออกจากวัสดุ (Activation energy) สามารถคำนวณได้โดยประยุกต์ใช้สมการอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) ดังสมการที่ 5

$$D_{eff} = D_0 \exp \left(- \frac{E_a}{R_g T_{abs}} \right) \quad (5)$$

เมื่อ D_0 คือ ค่าคงที่เทียบเท่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลที่อุณหภูมิอากาศสูงไม่มีขอบเขต (m^2/s), E_a คือ พลังงานกระตุ้น (kJ/mol), T_{abs} คือ อุณหภูมิของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง (K) และ R คือ ค่าคงที่ของก๊าซ (8.3143 kJ/mol·K) โดยค่าสัมประสิทธิ์สำหรับแบบจำลองถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิคสมการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Chawla et al., 2008)

5. การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

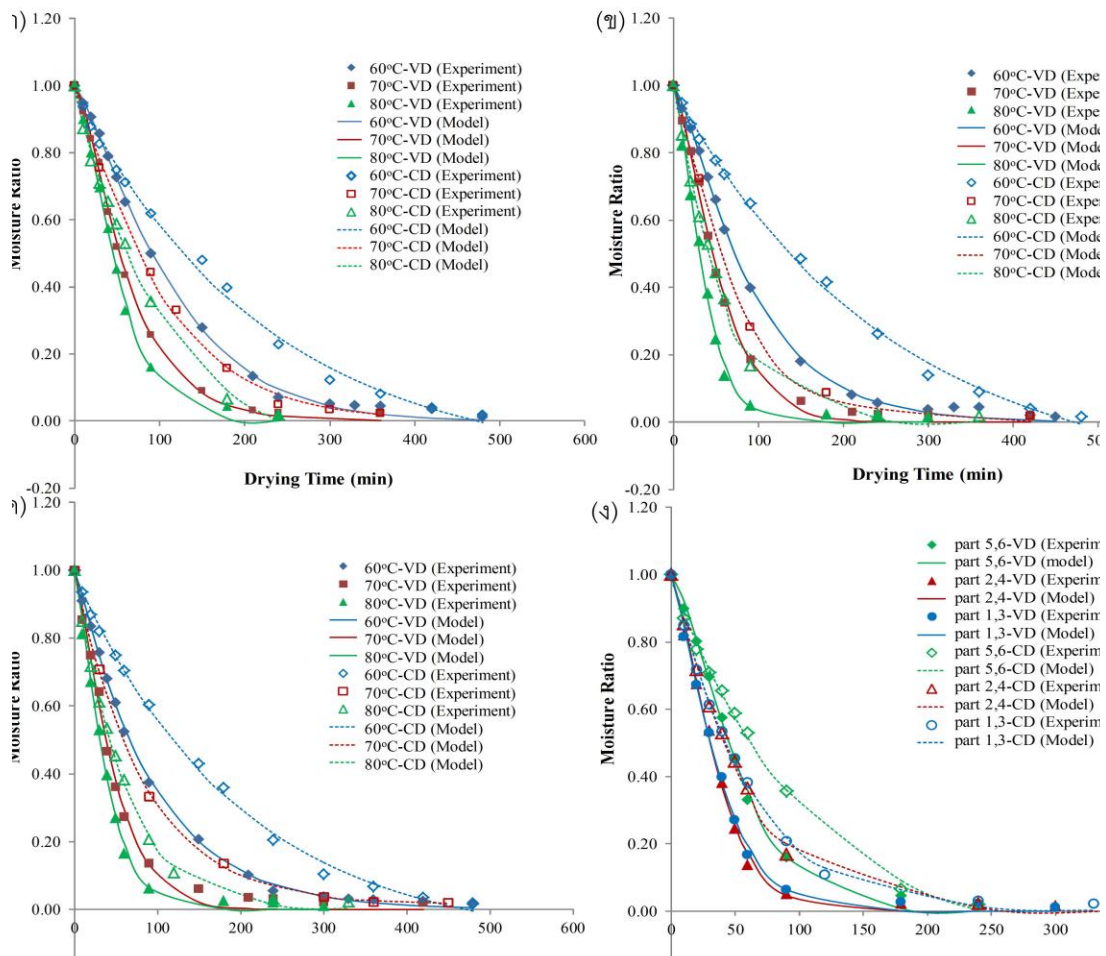
การทดลองนี้ใช้การวางแผนทดลองแบบ CRD วิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test โดยใช้โปรแกรม SPSS (SPSS software for Windows, SPSS Inc., USA) (Yamsaengsung et al., 2011) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งมะม่วงในแต่ละส่วน (ส่วน 2,4 5,6 และ 1,3) โดยใช้เกณฑ์การเลือกสภาวะที่ดีที่สุดในด้านใช้ระยะเวลาการอบแห้งต่ำ ค่าการหดตัวของผลิตภัณฑ์ต่ำ ค่าความชื้นน้อยและค่าการเปลี่ยนแปลงความเหลืองน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับผลไม้สด

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

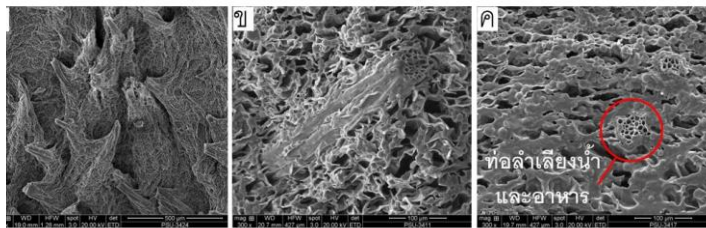
การหดตัว (Shrinkage)

ผลของสภาวะการอบแห้งต่อการหดตัวของมะม่วงเบาแสดงดังตารางที่ 1 พบว่าส่วนที่ 2,4 และ 1,3 มีแนวโน้มเดียวกัน โดยวิธีการอบแห้งทั้ง 2 วิธี มะม่วงอบแห้งหดตัวในทิศทางความหนาที่ใกล้เคียงกัน และมะม่วงส่วน 5,6 อบแห้งด้วยวิธี CD มะม่วงอบแห้งหดตัวในทิศทางความหนาน้อยกว่าวิธี VD แต่อย่างไรก็ตามหากพิจารณาการหดตัวของมะม่วงส่วน 5,6 ในทิศทางความกว้างและความยาวพบว่าการอบแห้งวิธี VD ที่ 80°C ผลิตรังสีจะเกิดการหดตัวต่ำที่สุดในขณะที่การอบแห้งมะม่วงส่วน 2,4 โดยวิธี CD ที่ 70 และ 80°C และการอบแห้งมะม่วงส่วน 1,3 โดยวิธี VD ที่ 80°C และ วิธี CD ทุกอุณหภูมิ มะม่วงหดตัวในทิศทางเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยเมื่อเทียบกับการอบแห้งที่สภาวะอื่น จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่ามะม่วงอบแห้งวิธี CD ที่อุณหภูมิต่ำหดตัวมากกว่าวิธี VD ที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากวิธี CD ใช้หลักการเป่าลมร้อนผ่านอาหารโดยตรง การถ่ายเทความร้อนโดยเฉพาะบริเวณผิวผลไม้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่อย่างไรก็ตามการระเหยของน้ำบริเวณผิวที่เร็วเกินไปส่งผลให้ผิวผลไม้แห้ง ความชื้นภายในผลไม้ระเหยออกมาได้ยาก และลักษณะผิวที่แห้งและแข็งของผลไม้จะช่วยรักษาโครงสร้างผลไม้ไม่ให้หดตัวระหว่างการอบแห้ง และมะม่วงเบาอบแห้งที่อุณหภูมิสูงระยะเวลาสั้นจะหดตัวน้อยกว่ามะม่วงอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำระยะเวลานาน ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Junlakan *et al.* (2017) และ Tirawanichakul *et al.* (2012) โดยทำการอบแห้งกล้วย สับปะรด แอปเปิ้ลและขนุนที่อุณหภูมิสูงผลิตรังสีเกิดการหดตัวต่ำ เนื่องจากอุณหภูมิสูงอัตราการอบแห้งจะสูง (ภาพที่ 3) เกรเดียนท์ของอุณหภูมิจากแหล่งพลังงานและผลไม้ขณะอบแห้งมีค่าเพิ่มสูงขึ้นทำให้อัตราการถ่ายโอนความร้อนจากผลไม้เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ใช้ระยะเวลาการอบแห้งสั้น ในขณะที่ผิวภายนอกผลไม้แข็งตัวอย่างรวดเร็วเป็นการช่วยคงสภาพโครงไม้ให้หดตัว (Nadee *et al.*, 2012; Tirawanichakul *et al.*, 2012)

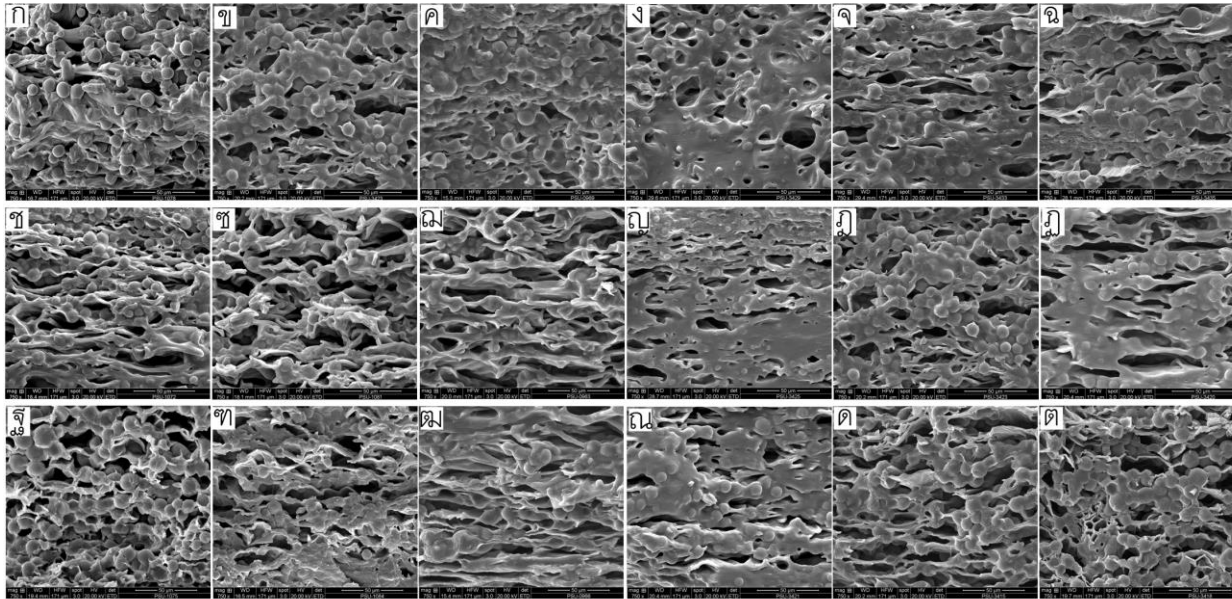
จากตารางพบว่าการอบแห้งวิธี VD ที่อุณหภูมิสูง (80°C) มะม่วงเบาส่วน 5,6 และ 2,4 หดตัวน้อยกว่าส่วน 1,3 เนื่องจากลักษณะโครงสร้างของมะม่วงส่วน 2,4 และ 5,6 เป็นส่วนเนื้อด้านในหรือส่วนของชั้น mesocarp ประกอบด้วยท่อลำเลียงน้ำและอาหาร กระจายตัวอยู่อย่างเบาบาง (ภาพที่ 4ข และ 4ค) การเคลื่อนที่ของน้ำออกจากผลไม้ระหว่างการอบแห้งเกิดขึ้นได้ดีส่งผลให้ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้น มะม่วงเบาอบแห้งจึงเกิดการหดตัวน้อย ในขณะที่ส่วน 1,3 หรือส่วนที่ใกล้ผิวของผลไม้หรือชั้น exocarp ประกอบด้วยท่อลำเลียงน้ำและอาหารขนาดใหญ่รวมตัวอย่างหนาแน่นปกคลุมผิวของผลไม้ (ภาพที่ 4ก) ขัดขวางการถ่ายโอนความร้อนออกจากผลไม้ทำให้มะม่วงเบาเกิดการหดตัวมากเนื่องจากระยะเวลาการอบที่ยาวนาน (Tafolla-Arellano *et al.*, 2017) เหล่านี้สอดคล้องกับภาพถ่าย SEM แสดงโครงสร้างของมะม่วงอบแห้งในภาพที่ 5 โดยมะม่วงอบแห้งที่เกิดการหดตัวน้อยจะบ่งบอกลักษณะโครงสร้างช่องว่างภายในของผลไม้ จากรูปสังเกตได้ว่ามะม่วงเบาอบแห้งวิธี VD มีลักษณะโครงสร้างภายในที่มีลักษณะโปร่งและมีความพรุนมากกว่ามะม่วงอบแห้งวิธี CD ที่อุณหภูมิต่ำอบแห้งสูงส่งผลต่อปริมาณช่องว่างของมะม่วงอบแห้งเพิ่มมากขึ้น โดยมะม่วงส่วน 5,6 และ 2,4 พบช่องว่างมากกว่าส่วน 1,3



ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงความชื้นของมะม่วงเบา (ก) ส่วน 5 และ 6 (ข) ส่วน 2 และ 4 (ค) ส่วน 1 และ 3 ระหว่างการอบแห้ง และ (ง) ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงความชื้นของมะม่วงเบาส่วนต่างๆ



ภาพที่ 4 ภาพถ่าย SEM ของมะม่วงเบาอบแห้ง (ก) เนื้อบริเวณใกล้ผิวของมะม่วง, (ข) ท่อน้ำเลี้ยงน้ำและอาหารของผลไม้ และ (ค) ภาพตัดขวางของท่อน้ำเลี้ยงน้ำและอาหารของผลไม้



ภาพที่ 5 ภาพถ่าย SEM ของมะม่วงเบาอบแห้ง (ก), (ข) และ (ค) ของมะม่วงอบแห้ง ส่วน 1 และ 3 วิธี VD ที่อุณหภูมิอบแห้ง 60 70 และ 80°C ตามลำดับ (ง), (จ) และ (ฉ) ของมะม่วงอบแห้ง ส่วน 1 และ 3 วิธี CD ที่อุณหภูมิอบแห้ง 60 70 และ 80°C ตามลำดับ (ช), (ซ) และ (ฅ) ของมะม่วงอบแห้ง ส่วน 2 และ 4 วิธี VD ที่อุณหภูมิอบแห้ง 60 70 และ 80°C ตามลำดับ (ญ), (ฎ) และ (ฏ) ของมะม่วงอบแห้ง ส่วน 2 และ 4 วิธี CD ที่อุณหภูมิอบแห้ง 60 70 และ 80°C ตามลำดับ (ฐ), (ท) และ (ฒ) ของมะม่วงอบแห้ง ส่วน 5 และ 6 วิธี VD ที่อุณหภูมิอบแห้ง 60 70 และ 80°C ตามลำดับ และภาพตัดขวาง (ณ), (ด) และ (ต) ของมะม่วงอบแห้ง ส่วน 5 และ 6 วิธี CD ที่อุณหภูมิอบแห้ง 60 70 และ 80°C ตามลำดับ

ตารางที่ 1 ผลของรูปร่างและอุณหภูมิในการอบแห้งที่มีผลคุณภาพทางกายภาพของมะม่วงเบาอบแห้ง

Shape	Drying Method	Temp (°C)	Drying Time (min)	%Thickness Shrinkage	%Width Shrinkage	%Length Shrinkage	%Diameter Shrinkage	Maximum force (N)	Number of peaks	$\frac{\Delta L}{L_0}^*$	$\frac{\Delta a}{a_0}^*$	$\frac{\Delta b}{b_0}^*$
Part 2,4	VD	60	450	72.65±3.48 ^{ns}			31.76±2.03 ^d	20.94±3.47 ^b	3.00±1.73 ^{ns}	0.08±0.03 ^c	-0.06±0.02 ^d	0.72±0.09 ^a
		70	420	70.57±2.37 ^{ns}			27.62±5.47 ^{cd}	14.27±4.98 ^{ab}	2.33±1.15 ^{ns}	0.008±0.003 ^{bc}	-0.25±0.19 ^{cd}	0.83±0.07 ^a
		80	300	72.40±9.35 ^{ns}			23.26±2.33 ^c	10.82±2.19 ^a	2.33±1.15 ^{ns}	-0.02±0.02 ^b	-0.43±0.23 ^c	1.04±0.39 ^{ab}
	CD	60	480	78.17±4.07 ^{ns}			16.54±1.19 ^b	21.57±5.77 ^b	1.33±0.58 ^{ns}	0.08±0.03 ^c	-1.24±0.24 ^b	0.88±0.44 ^a
		70	420	78.66±4.92 ^{ns}			11.44±0.28 ^a	13.59±5.90 ^{ab}	2.00±0.00 ^{ns}	-0.03±0.02 ^b	-1.46±0.04 ^{ab}	1.40±0.15 ^{bc}
		80	360	71.11±8.15 ^{ns}			10.32±0.80 ^a	12.32±1.24 ^a	1.33±0.58 ^{ns}	-0.13±0.11 ^a	-1.71±0.28 ^a	1.74±0.05 ^c
Part 5,6	VD	60	480	88.91±0.92 ^c	50.42±1.01 ^c	26.7±0.64 ^c		33.46±5.77 ^c	4.67±0.58 ^b	-0.12±0.03 ^{ab}	-0.33±0.10 ^b	0.94±0.04 ^a
		70	360	81.87±2.31 ^b	40.5±1.48 ^c	22.00±2.69 ^{ab}		27.29±1.01 ^{bc}	1.67±0.58 ^a	-0.12±0.11 ^{ab}	-0.49±0.21 ^b	0.96±0.21 ^a
		80	240	77.25±6.15 ^b	28.95±1.04 ^a	20.65±1.52 ^a		11.56±0.89 ^a	1.33±0.58 ^a	-0.10±0.07 ^{abc}	-0.54±0.14 ^b	1.02±0.23 ^a
	CD	60	480	66.89±0.61 ^a	45.41±1.29 ^d	26.95±1.10 ^c		27.91±9.71 ^{bc}	1.33±0.58 ^a	-0.02±0.03 ^{bc}	-0.52±0.26 ^b	0.75±0.17 ^a
		70	360	66.91±0.62 ^a	41.15±2.41 ^c	26.90±1.30 ^c		23.74±1.30 ^b	1.33±0.58 ^a	-0.0004±0.0291 ^c	-0.58±0.26 ^b	0.64±0.36 ^a
		80	240	66.65±2.55 ^a	32.97±3.15 ^b	23.66±2.93 ^b		19.40±1.85 ^{ab}	2.00±0.00 ^a	-0.17±0.03 ^a	-2.45±1.22 ^a	1.74±0.45 ^b
Part 1,3	VD	60	480	85.16±0.71 ^{ns}			27.49±3.97 ^c	17.36±4.32 ^b	1.67±0.58 ^{ab}	0.12±0.06 ^c	-0.04±0.10 ^b	0.25±0.14 ^a
		70	420	85.58±2.41 ^{ns}			20.63±2.66 ^b	23.82±0.96 ^c	3.00±1.00 ^c	0.10±0.02 ^{bc}	-0.18±0.03 ^b	0.49±0.11 ^{ab}
		80	300	84.24±1.19 ^{ns}			16.63±1.92 ^{ab}	7.20±1.05 ^a	2.67±0.58 ^{bc}	0.06±0.01 ^{bc}	-0.68±0.29 ^b	1.16±0.20 ^d
	CD	60	480	84.29±1.22 ^{ns}			15.61±4.72 ^{ab}	32.14±2.84 ^d	1.00±0.00 ^a	0.03±0.03 ^{ab}	-0.74±0.12 ^b	0.40±0.18 ^{ab}
		70	450	84.89±1.34 ^{ns}			16.14±2.44 ^{ab}	23.43±2.80 ^c	1.67±0.58 ^{ab}	0.07±0.09 ^{bc}	-0.67±0.69 ^b	0.70±0.46 ^{bc}
		80	330	83.48±3.08 ^{ns}			13.43±0.53 ^a	11.08±2.35 ^a	2.33±0.58 ^{bc}	-0.045±0.003 ^a	-1.76±0.48 ^a	1.06±0.06 ^{cd}

หมายเหตุ : a-d แสดงค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแถวแนวตั้งเดียวกันของแต่ละชุดข้อมูลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ ($P \leq 0.05$) และ ns แสดงค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแถวแนวตั้งเดียวกันของแต่ละชุดข้อมูลไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$)

ลักษณะเนื้อสัมผัส ได้แก่ ความแข็ง (hardness) และความกรอบ (crispness) ของมะม่วงอบแห้งสุญญากาศ

จากตารางที่ 1 แสดงผลของสภาวะการอบแห้งผลต่อความแข็ง (Maximum force) และความกรอบ (Number of peaks) ของมะม่วงอบแห้ง พบว่ามะม่วงอบแห้งที่อุณหภูมิสูง (80°C) มีความแข็งน้อยกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ (60 และ 70°C) ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Junlakan *et al.* (2017) โดยมะม่วงอบแห้งวิธี VD ที่ 80°C มีความแข็งต่ำที่สุดในทุกรูปร่างของมะม่วง และจากตารางพบว่ามะม่วงอบแห้งส่วน 5,6 มีความแข็งสูงกว่าส่วนอื่นๆ ที่อุณหภูมิเดียวกัน เนื่องจากลักษณะทางกายภาพที่หนากว่าส่วนอื่นๆ สัมพันธ์กับการมีปริมาณเส้นใยสูงซึ่งมีลักษณะแข็งหลังจากผ่านการอบแห้ง จากตารางพบว่าวิธีการอบแห้งไม่มีผลต่อค่าความกรอบของการอบแห้งมะม่วงส่วน 2,4 ในขณะที่มีผลต่อการอบแห้งมะม่วงส่วน 1,3 และ 5,6 โดยมะม่วงอบแห้งส่วน 1,3 ที่อุณหภูมิต่ำ (60°C และ 70°C) ทั้ง 2 วิธี มีค่าความกรอบต่ำและค่าความแข็งสูงเมื่อเทียบกับการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง (80°C) แสดงให้เห็นว่ามะม่วงอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำมีความเหนียวมากกว่ามะม่วงอบแห้งที่อุณหภูมิสูง (Saengthongpinit *et al.*, 2007) และจากตารางพบว่ามะม่วงอบแห้งส่วน 5,6 วิธี VD ที่อุณหภูมิต่ำ (60°C) มีค่าความกรอบและความแข็งสูงกว่าการอบแห้งวิธี CD ที่อุณหภูมิสูง ซึ่งแสดงถึงลักษณะมะม่วงอบแห้งที่มีความเหนียวน้อยและความแข็งมาก

ค่าสีของผลิตภัณฑ์มะม่วงอบแห้ง

จากผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงสีของมะม่วงเบาระหว่างการอบแห้งจากตารางที่ 1 พบว่ามะม่วงอบแห้งด้วยวิธี CD ที่อุณหภูมิสูง (80°C) การเปลี่ยนแปลงค่าความสว่าง (L^*) และค่าความเป็นสีแดง (a^*) เมื่อเทียบกับผลไม้สดน้อยกว่าและการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) เมื่อเทียบกับผลไม้สดสูงกว่าการอบแห้งวิธี VD ที่อุณหภูมิต่ำ (60°C) เนื่องจากการสัมผัสออกซิเจนในอากาศเป็นระยะเวลาอันยาวนานทำให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์ ส่งผลให้ผิวผลไม้หลังจากการอบแห้งด้วยวิธี CD มีสีคล้ำและการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจะส่งผลให้ค่า L^* (ความสว่าง) และ a^* (ความแดง) ของมะม่วงเบาอบแห้งลดลงและ b^* (ความเหลือง) เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลระหว่างการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง โดยมะม่วงอบแห้งส่วน 1,3 2,4 และ 5,6 ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความสว่างและค่าความเป็นสีแดงเทียบกับผลไม้สดลดน้อยลง ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นสีเหลืองเทียบกับผลไม้สดเพิ่มสูงขึ้น ตามลำดับ

แบบจำลองการอบแห้งของมะม่วงเบาอบแห้งสุญญากาศ

แบบจำลองที่ดีที่สุด พิจารณาจากแบบจำลองการอบแห้งที่ให้ค่า R^2 สูงสุด ค่า χ^2 และ RMSE ต่ำสุด จากทดลองพารามิเตอร์ของแบบจำลองการอบแห้งแสดงดังตารางที่ 2 และ 3 จากการทดลองทุกแบบจำลองให้ค่า R^2 มากกว่า 0.9 ค่า χ^2 น้อยกว่า 0.05 และค่า RMSE น้อยกว่า 0.06 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่ได้จากทดลองมีความน่าเชื่อถือและยอมรับได้ (Phothi & Prakancharoen, 2011) จากตารางแบบจำลองที่เหมาะสมในการทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งสุญญากาศมะม่วงเบาที่อุณหภูมิ 60°C ของมะม่วงส่วนที่ 2,4 5,6 และ 1,3 คือสมการ Diffusion approach Page และ Diffusion approach โดยค่า R^2 ค่า χ^2 และ RMSE มีค่า 0.99939, 0.00017, 0.01263 (Diffusion approach), 0.99930, 0.00021, 0.01414 (Page) และ 0.99956, 0.00012, 0.01050 (Diffusion approach) ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 70°C คือ Diffusion approach, Diffusion approach และ Page มีค่า 0.99727, 0.00074, 0.02609 (Diffusion approach), 0.99917, 0.00023, 0.01448 (Diffusion approach) และ 0.99732, 0.00066, 0.02472 (Page) ตามลำดับ และ การอบแห้งที่อุณหภูมิ 80°C คือ สมการ Page ทั้ง 3 ส่วนของมะม่วง มีค่า 0.99790, 0.00053, 0.02189 (มะม่วงส่วนที่ 2,4), 0.99850, 0.00038, 0.01843 (มะม่วงส่วนที่ 5,6) และ 0.99832, 0.00041, 0.01931 (มะม่วงส่วนที่ 1,3) ตามลำดับ

ตารางที่ 2 ค่าคงที่ของสมการการอบแห้งมะม่วงเบาส่วน 2,4 5,6 และ 1,3

Vacuum drying										
Models	Coeff	Part 2,4			Part 5,6			Part 1,3		
		60°C	70°C	80°C	60°C	70°C	80°C	60°C	70°C	80°C
Newton (MR=exp(-kt))	k	0.0097	0.0155	0.0249	0.0080	0.0130	0.0157	0.0104	0.0188	0.0242
Logarithmic (MR=a exp(-kt)+c)	a	1.0574	1.0570	1.0507	1.0859	1.0801	1.0813	1.0181	1.0302	1.0379
	k	0.0102	0.0166	0.0261	0.0080	0.0136	0.0161	0.0108	0.0204	0.0252
	c	-0.0087	-0.0010	-0.0033	-0.0317	-0.0215	-0.0274	0.0027	0.0124	-0.0012
Page (MR=exp(-kt ⁿ))	k	0.0037	0.0043	0.0064	0.0024	0.0035	0.0032	0.0078	0.0073	0.0088
	n	1.2162	1.3286	1.3704	1.2586	1.3216	1.4139	1.0648	1.2509	1.2762
Two-term (MR=aexp(-k ₀ t)+bexp(k ₁ t))	a	0.5258	0.5279	0.5239	0.5311	0.5316	0.5293	0.5096	0.5228	0.5184
	k ₀	0.0104	0.0167	2.0262	0.0087	0.0142	0.0170	0.0107	0.0198	0.0252
	b	0.5258	0.5279	0.5239	0.5311	0.5316	0.5293	0.5096	0.5168	0.5184
	k ₁	0.0104	0.0167	0.0262	0.0087	0.0142	0.0170	0.0107	0.0198	0.0252
Two-term exponential (MR=aexp(-kt)+(1-a)exp(-kat))	a	0.0080	0.3614	1.8795	0.0682	0.0088	0.0765	0.0117	0.0151	0.0125
	k	1.1870	0.0295	0.0378	0.0938	1.4563	0.1763	0.8717	1.2193	1.9004
Diffusion approach (MR=aexp(-kt)+(1-a)exp(-kbt))	a	-0.2486	-0.1597	-0.2202	-0.1472	-0.4128	-0.2182	-0.0404	-0.1153	-0.1673
	k	0.0478	0.2955	0.1920	0.0799	0.0591	0.1426	0.1275	0.3002	0.1807
	b	0.2614	0.0652	0.1586	0.1183	0.3185	0.1410	0.0861	0.0719	0.1586
Conventional drying										
Models	Coeff	Part 2,4			Part 5,6			Part 1,3		
		60°C	70°C	80°C	60°C	70°C	80°C	60°C	70°C	80°C
Newton (MR=exp(-kt))	k	0.0055	0.0130	0.0169	0.0059	0.0098	0.0116	0.0063	0.0117	0.0165
Logarithmic (MR=a exp(-kt)+c)	a	1.1690	1.0159	1.0081	1.1210	1.0467	1.0996	1.0895	0.9880	1.0012
	k	0.0040	0.0134	0.0173	0.0044	0.0088	0.0093	0.0051	0.0122	0.0168
	c	-0.1811	0.0028	0.0033	-0.1384	-0.0443	-0.1160	-0.1010	0.0143	0.0052
Page (MR=exp(-kt ⁿ))	k	0.0028	0.0067	0.0121	0.0037	0.0058	0.0080	0.0040	0.0135	0.0138
	n	1.1347	1.1542	1.0866	1.0888	1.1079	1.0897	1.0904	0.9684	1.0439
Two-term (MR=aexp(-k ₀ t)+bexp(k ₁ t))	a	0.5081	0.2006	0.4988	0.5065	0.4682	0.5017	0.5361	0.4988	0.5183
	k ₀	0.0056	0.0129	0.0171	0.0059	0.0099	0.0117	0.0063	0.0089	0.0166
	b	0.5081	0.8180	0.5122	0.4986	0.5439	0.5016	0.4705	0.5054	0.4871
	k ₁	0.0056	0.0134	0.0171	0.0059	0.0099	0.0117	0.0063	0.0158	0.0166
Two-term exponential (MR=aexp(-kt)+(1-a)exp(-kat))	a	0.0153	0.0132	0.0163	0.0139	0.0198	0.0232	0.0167	0.0298	0.0136
	k	0.3543	0.9690	1.0082	0.4142	0.4841	0.4805	0.3661	0.3779	1.1844
Diffusion approach (MR=aexp(-kt)+(1-a)exp(-kbt))	a	-0.8036	-0.1884	-0.1401	0.0788	-0.4618	-0.9521	-0.2651	0.0100	-0.0439
	k	0.0116	0.0687	0.0567	0.0752	0.0216	0.0219	0.0160	0.0964	0.0734
	b	0.6445	0.2271	0.3397	0.0703	0.5572	0.7189	0.4628	0.1198	0.2354

ตารางที่ 3 พารามิเตอร์ทางสถิติในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งมะม่วงเบา

Vacuum drying									
Part 2,4									
Models	60°C			70°C			80°C		
	R ²	X ²	RMSE	R ²	X ²	RMSE	R ²	X ²	RMSE
Newton	0.99574	0.00124	0.03401	0.99318	0.00184	0.04117	0.99059	0.00235	0.04626
Logarithmic	0.99738	0.00754	0.02659	0.99500	0.00402	0.06090	0.99197	0.00201	0.04273
Page	0.99913	0.00244	0.01513	0.99631	0.00329	0.05513	0.99790	0.00053	0.02189
Two-term	0.99732	0.00776	0.02698	0.99500	0.00135	0.03529	0.99196	0.00201	0.04277
Two-term exponential	0.99522	0.00139	0.03604	0.98816	0.00318	0.05419	0.99748	0.00063	0.02396
Diffusion approach	0.99939	0.00017	0.01263	0.99727	0.00074	0.02609	0.99570	0.00108	0.03131
Part 5,6									
Newton	0.99370	0.00191	0.04229	0.99205	0.00219	0.04482	0.98916	0.00270	0.04934
Logarithmic	0.99692	0.00093	0.02960	0.99512	0.00135	0.03515	0.99235	0.00191	0.04147
Page	0.99930	0.00021	0.01414	0.99869	0.00036	0.01822	0.99850	0.00038	0.01843
Two-term	0.99638	0.00110	0.03209	0.99478	0.00144	0.03634	0.99192	0.00202	0.04262
Two-term exponential	0.98364	0.00493	0.06799	0.99124	0.00241	0.04702	0.98030	0.00489	0.06636
Diffusion approach	0.99886	0.00034	0.01798	0.99917	0.00023	0.01448	0.99693	0.00077	0.02631
Part 1,3									
Newton	0.99911	0.00024	0.01496	0.99434	0.00140	0.03591	0.99384	0.00150	0.03696
Logarithmic	0.99933	0.00018	0.01292	0.99543	0.00113	0.03227	0.99469	0.00130	0.03434
Page	0.99952	0.00013	0.01102	0.99732	0.00066	0.02472	0.99832	0.00041	0.01931
Two-term	0.99933	0.00018	0.01295	0.99522	0.00118	0.03301	0.99468	0.00130	0.03435
Two-term exponential	0.99878	0.00033	0.01746	0.99361	0.00158	0.03815	0.99323	0.00165	0.03875
Diffusion approach	0.99956	0.00012	0.01050	0.99675	0.00080	0.02721	0.99703	0.00072	0.02567
Conventional drying									
Part 2,4									
Models	60°C			70°C			80°C		
	R ²	X ²	RMSE	R ²	X ²	RMSE	R ²	X ²	RMSE
Newton	0.99452	0.00140	0.03611	0.99770	0.00083	0.02576	0.99824	0.00040	0.01894
Logarithmic	0.99886	0.00029	0.01652	0.99798	0.00073	0.02411	0.99835	0.00037	0.01835
Page	0.99663	0.00086	0.02833	0.99924	0.00027	0.01481	0.99882	0.00027	0.01553
Two-term	0.99470	0.00136	0.03553	0.99797	0.00073	0.02416	0.99834	0.00038	0.01840
Two-term exponential	0.99389	0.00157	0.03812	0.99727	0.00098	0.02803	0.99785	0.00049	0.02094
Diffusion approach	0.99707	0.00075	0.02641	0.99957	0.00015	0.01109	0.99882	0.00027	0.01550
Part 5,6									
Newton	0.99514	0.00124	0.03393	0.99775	0.00060	0.02291	0.99561	0.00092	0.02883
Logarithmic	0.99825	0.00045	0.02035	0.99889	0.00029	0.01605	0.99871	0.00027	0.01565
Page	0.99612	0.00099	0.03032	0.99884	0.00031	0.01643	0.99672	0.00069	0.02492
Two-term	0.99517	0.00123	0.03384	0.99785	0.00057	0.02239	0.99563	0.00092	0.02879
Two-term exponential	0.99485	0.00131	0.03492	0.99733	0.00071	0.02495	0.99509	0.00103	0.03050
Diffusion approach	0.99123	0.00223	0.04554	0.99893	0.00029	0.01580	0.99729	0.00057	0.02265
Part 1,3									
Newton	0.99662	0.00088	0.02861	0.99954	0.00014	0.01091	0.99893	0.00024	0.01468
Logarithmic	0.99887	0.00029	0.01653	0.99980	0.00006	0.00723	0.99897	0.00023	0.01436
Page	0.99761	0.00062	0.02406	0.99961	0.00012	0.01002	0.99912	0.00019	0.01330
Two-term	0.99667	0.00087	0.02840	0.99974	0.00008	0.00817	0.99895	0.00023	0.01452
Two-term exponential	0.99619	0.00099	0.03036	0.99948	0.00016	0.01155	0.99874	0.00028	0.01590
Diffusion approach	0.99777	0.00058	0.02323	0.99955	0.00014	0.01079	0.99908	0.00020	0.01357

สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นและพลังงานกระตุ้น

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (D_{eff}) ระหว่างการอบแห้งแสดงในตารางที่ 4 พบว่าการอบแห้งด้วยวิธี VD ค่า D_{eff} สูงกว่าวิธี CD โดยการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลต่อ D_{eff} ที่เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการถ่ายโอนความชื้นเกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิในการอบแห้งสูงซึ่งสอดคล้องกับการทดลองอบแห้งสุญญากาศกล้วย สืบประวัติและแอปเปิ้ลของ Junlakan *et al.* (2017) โดยค่า D_{eff} ที่ได้จากการทดลองมีค่าอยู่ในช่วง $7.80 \times 10^{-11} - 9.43 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ซึ่งเป็นค่า D_{eff} ของอาหารโดยทั่วไป ($10^{-11} - 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$) (Wang *et al.*, 2007) จากการทดลองพบว่ารูปทรงที่แตกต่างกันมีผลต่อค่า E_a ที่แตกต่างกัน จากการทดลองส่วน 5,6 มีค่า E_a ต่ำกว่า ส่วน 2,4 และ 1,3 ซึ่งบ่งบอกถึงปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของการเคลื่อนที่ของความชื้น E_a มีค่าน้อยแสดงถึงปฏิกิริยาการเคลื่อนที่ของความชื้นหรืออัตราการอบแห้งอย่างรวดเร็ว เนื่องจากใช้พลังงานกระตุ้นในการเร่งปฏิกิริยาการเคลื่อนที่ของความชื้นน้อยกว่า (Assawarachan *et al.*, 2014)

ตารางที่ 4 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นและพลังงานกระตุ้นของการอบแห้งมะม่วงเบา

Vacuum drying						
Shapes	Temp. (°C)	$D_{eff}(\text{m}^2/\text{s})$	R^2	E_a (kJ/mol)	D_0 (m ² /s)	R^2
Part 2,4	60	1.10×10^{-10}	0.9740	50	7.2850×10^{-3}	0.9989
	70	1.74×10^{-10}	0.9729			
	80	2.94×10^{-10}	0.9724			
Part 5,6	60	4.98×10^{-10}	0.9662	27.17	1.0002×10^{-5}	0.9683
	70	7.91×10^{-10}	0.9656			
	80	9.43×10^{-10}	0.9606			
Part 1,3	60	2.08×10^{-10}	0.9844	50	2.2788×10^{-3}	0.9809
	70	3.81×10^{-10}	0.9786			
	80	5.05×10^{-10}	0.9777			
Conventional drying						
Shapes	Temp. (°C)	$D_{eff}(\text{m}^2/\text{s})$	R^2	E_a (kJ/mol)	D_0 (m ² /s)	R^2
Part 2,4	60	5.00×10^{-11}	0.9573	50	5.0520×10^{-3}	0.9263
	70	1.54×10^{-10}	0.9861			
	80	1.93×10^{-10}	0.9855			
Part 5,6	60	4.20×10^{-10}	0.9834	30	2.0000×10^{-5}	0.9439
	70	5.71×10^{-10}	0.9902			
	80	6.81×10^{-10}	0.9743			
Part 1,3	60	1.32×10^{-10}	0.9765	40	2.7600×10^{-4}	0.9804
	70	2.46×10^{-10}	0.9945			
	80	3.27×10^{-10}	0.9859			

สรุปผลการวิจัย

การอบแห้งด้วยวิธี VD ใช้ระยะเวลาการอบแห้งสั้นกว่าวิธี CD การใช้อุณหภูมิต่ำสูงที่ระยะเวลาสั้น ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นสูง มะม่วงอบแห้งหัดตัวต่ำ การอบแห้งมะม่วงส่วน 5,6 1,3 และ 2,4 ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งเพิ่มขึ้นตามลำดับ มะม่วงส่วน 5,6 มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของการอบแห้งสูง มะม่วงเบาอบแห้งมีการหัดตัวต่ำ ความชื้นน้อยกว่ามะม่วงเบาส่วน 2,4 และ 1,3 แบบจำลองที่เหมาะสมเพื่อทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งสุญญากาศของมะม่วงที่อุณหภูมิ 60°C ของมะม่วงเบาส่วน 2,4 5,6 และ 1,3 คือ สมการ Diffusion approach Page และ Diffusion approach และที่อุณหภูมิ 70°C คือ Diffusion approach Diffusion approach และ Page ตามลำดับ และสมการ Page สำหรับอุณหภูมิการอบแห้ง 80°C ของมะม่วงทุกส่วน จากการทดลองจะเห็นได้ว่าจลนพลศาสตร์การอบแห้งส่งผลต่อคุณภาพของมะม่วงเบาอบแห้ง โดยการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (D_{eff}) ที่มีค่าสูงในขณะที่

ค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) มีค่าต่ำ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นที่สูงจะบ่งบอกถึงอัตราการระเหยของน้ำออกจากผลไม้เกิดขึ้นได้ดี และค่าพลังงานกระตุ้นที่ต่ำบ่งบอกถึงปฏิกิริยาการเคลื่อนที่ของความชื้นหรืออัตราการอบแห้งเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากใช้พลังงานกระตุ้นในการเร่งปฏิกิริยาการเคลื่อนที่ของความชื้นน้อย เมื่อความชื้นเคลื่อนที่ออกจะเกิดช่องว่างภายในผลิตภัณฑ์ ส่งผลต่อคุณภาพด้านโครงสร้างภายในที่มีรูพรุนมาก และระยะเวลาการอบแห้งที่สั้นส่งผลให้ผลิตภัณฑ์เกิดการหดตัวน้อย ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมในทดลองนี้ คือ การอบแห้งด้วยวิธี VD ที่อุณหภูมิ 80°C เนื่องจากสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นสูงและใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นที่สุดจึงมีความสิ้นเปลืองพลังงานน้อยที่สุด อีกทั้งมะม่วงอบแห้งที่ได้มีรูพรุนมาก การหดตัวต่ำ มีความแข็งแรงและการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นสีเหลืองเทียบกับผลไม้สดสูงเมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ โดยระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งมะม่วงส่วน 2,4 5,6 และ 1,3 คือ 300 240 และ 300 นาที ตามลำดับ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี งบประมาณ 2506 ผู้วิจัยขอขอบคุณ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี ที่อำนวยความสะดวกสถานที่ในการทำวิจัย และขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ได้อำนวยความสะดวกในด้านเครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์ผลการทดลอง

เอกสารอ้างอิง

- Assawarachan, R., Suriyakunthorn, P., & Jino, P. Effect of Blanching Pretreatment and Drying Model of *Chrysanthemum indicum* Linn. *Thai Society of Agricultural Engineering Journal*, 20(2), 43-51.
- Bouraoui, M., Richard, P., & Durance, T. (1994). Microwave and convective drying of potato slices. *Journal of Food Process Engineering*, 17, 353-363.
- Chawla, C., Kaur, D., Oberoi, D.P.S., & Sogi, D.S. (2008). Drying characteristics, sorption isotherms and lycopene retention of tomato pulp. *Drying Technology*, 26(10), 1257-1264.
- Crank, J. (1975). *The mathematics of diffusion* (2nd ed.). Oxford, UK: Clarendon Press.
- Jaya, S. & Das, H.A. (2003). A vacuum drying model for mango pulp. *Drying Technology*, 21, 1215-1234.
- Junlakan, w., Tirawanichakul, S., & Yamsaengsung, R. (2017). Effects of vacuum drying on structural changes of bananas, pineapples, and apples. *Journal of Food Processing and Preservation*, DOI: 10.1111/jfpp.13264.
- Kin Dee U Dee. (2015). *Health and Trend everyday modern health*. Retrieved June 7, 2017, from <http://www.healthandtrend.com/slimming/slim-food/menu-prevent-fat-embolism>
- Nadee, A., Tirawanichakul, Y., & Tirawanichakul, S. (2012). Drying Kinetics of Pandanus Leaf by Infrared Radiation Combine Hot Air and Hot Air. *Burapha Science Journal*, 17(2), 130-138. (in Thai)
- National Food Institute. (2007). *TIS 919-2532: Dried/dehydrated fruit*. Retrieved June 7, 2017, from <http://iiu.oie.go.th/food/Food%20Document%20Library/Forms/AllItems.aspx>

- Nimmol, C., Devahastin, S., Swasdisevi, T., & Soponronnarit, S. (2007). Drying of banana slices using combined low-pressure superheated steam and far-infrared radiation. *Journal of Food Engineering*, 81(3), 624–633.
- Phothi, N. & Prakanchaen, S. (2011). Data Imputation Estimation Using Partial Least Squares of Structural Equation Modeling. In *Proceedings of 2nd Nation Conference on Applied Computer Technology and Information System*. (pp. 13-18). Bangkok: Rajamangala University of Technology Krungthep.
- Qiao, F., Fang, C., Huang, L. & Zhang, S. (2013). The effect of different heating patterns on vacuum freeze-drying of litchi pulp. *Journal of Food Process Engineering*, 36, 407-411.
- Rasouli, M., Seiedlou, S., Ghasemzadeh, H.R., & Nalbandi, H. (2011). Convective drying of garlic (*Allium sativum* L.): Part I: Drying kinetics, mathematical modeling and change in color. *Australian Journal of Crop Science*, 5(13), 1707-1714.
- Saengthongpinit, W., Luanglue, M., Somboonphol, P., & Sara, B. (2007). Pork Stick Supplemented with Pomelo Albedo Fiber. *VRU Research and Development Journal*, 9(2), 8-18.
- Swasdisevi, T., Devahastin, S., Ngamchum, R., & Soponronnarit, S. (2007). Optimization of a drying process using infrared vacuum drying of Cavendish banana slices. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 29, 809-816.
- Tafolla-Arellano, J.C., Zheng, Y., Sun, H., Jiao, C., Ruiz-May, E., Hernández-Oñate, M.A., González-León, A., Báez-Sañudo, R., Fei, Z., Domozych, D., Rose, J.K.C., & Tiznado-Hernández, M.E. (2017). Transcriptome Analysis of Mango (*Mangifera indica* L.) Fruit Epidermal Peel to Identify Putative Cuticle-Associated Genes. *Scientific Reports*, DOI: 10.1038/srep46163.
- Tirawanichakul, S., Lamaepae, S., & Tirawanichakul, Y. (2012). Combined Infrared/Microwave and Hot Air Drying for Jackfruit: Kinetics, Quality and Sensory Analysis. *Burapha Science Journal*, 17(1), 117-129. (in Thai)
- Wang, Z., Sun, J., Liao, X., Chen, F., Zhao, G., Wu, J., & Hu, X. (2007). Mathematical modeling on hot air drying of thin layer apple pomace. *Food Research International*, 40(1), 39-46.
- Yamsaengsung, R., Ariyapuchai, T., & Prasertsit, K. (2011). Effects of vacuum frying on structural changes of bananas. *Journal of Food Engineering*, 106(4), 298-305.
- Zakipour, E., & Hamidi, Z. (2011). Vacuum drying characteristics of some vegetables. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 30(4), 97-105.