การศึกษาจลนพลศาสตร์และคุณภาพฟักทองอบแห้งด้วยสุญญากาศร่วมกับลมร้อน

DRYING KINETICS AND QUALITY OF PUMPKIN SLICES UNDERGOING VACUUM DRYING COMBINE HOT AIR DRYING

ภักดี สิทธิฤทธิ์กวิน
อาจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาลัยเชียงราย
199 ม.6 ต. ป่าอ้อดอนชัย อ. เมือง จ.เชียงราย 5700, pakdee.me@gmail.com

Pakdee Sittiritkawin
Lecturer, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,
Chiangrai College, 199 Moo 6 Muang District, Chiangrai 5700, Thailand,
pakdee.me@gmail.com

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา จลนพลศาสตร์การอบแห้ง การพัฒนาสมการการอบแห้งจากค่าคงที่การอบแห้งและค่าความสิ้นเปลืองพลังงาน รวมไปถึงการศึกษาคุณภาพของฟักทองหลังอบแห้งในแง่ของ สี การหดตัว การคืนตัว ค่าความแข็ง ค่าความกรอบและโครงสร้างระดับจุลภาคของเนื้อฟักทอง ที่สภาวะการทดลอง อุณหภูมิ 70 80 90 และ 100 องศาเซลเซียส และความดันสัมบูรณ์ที่ 7 10 13 15 และ 101 กิโลปาสคาล หลังจากการทดลองพบว่าเมื่ออุณหภูมิการอบแห้งสูงขึ้นและความดันเพิ่มสูงขึ้นทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งลดลง โดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ความดันสัมบูรณ์ที่ 101 กิโลปาสคาล ใช้เวลาอบแห้งน้อยที่สุด และใช้พลังงานน้อยที่สุด การพัฒนาสมการค่าคงที่ของการอบแห้งสามารถนำค่า $k_{predict}$ ที่ได้มาคำนวณตามรูปแบบของสมการ Page มีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดีกับค่าได้จากการทดลอง แต่ในแง่คุณภาพด้านสี พบว่าในช่วงความดัน 7-10 กิโลปาสคาล อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ให้สีฟักทองอบแห้งดีที่สุดมีสีส้มเข้ม อุณหภูมิอบแห้งที่สูงจะช่วยลดการหดตัวได้ดีแต่ก็ทำให้การคืนตัวได้ไม่ค่อยดีนักเนื่องจากผิวที่แข็งไปต้านทานการดูดคืนน้ำกลับเข้าเนื้อเซลล์ นอกจากนั้นอุณหภูมิที่สูงขึ้นยังทำให้ชิ้นฟักทองอบแห้งมีค่าความกรอบมากขึ้น

คำสำคัญ: สมการจลนพลศาสตร์, ฟักทองอบแห้ง, สุญญากาศร่วมกับลมร้อน

ABSTRACT

The objectives of this study were to the drying kinetics, development of drying equations from drying constant and specific energy consumption. Including the study of the qualities dried pumpkin were in terms of color, shrinkage, rehydration, hardness, crispness and microstructure of pumpkin. The experimental conditions were the drying temperature 70, 80, 90 and 100 ^{o}C and drying pressure at 7, 10, 13, 15 and 101 kPa. After the experiment, it was found that when the increase in drying temperature and drying pressure was a drying time decreased. Especially at 100 ^{o}C, drying pressure at 101 kPa were the minimum drying time and uses the least energy. The development of the drying constant equation can be used $k_{predict}$ values calculated in Page equation, which was well consistent with the value from the experiment. But in terms of color quality it was found that in the range of pressure 7-10 kPa and the temperature of 80 ^{o}C gave the best dried pumpkin color with dark orange color. High drying temperatures will help reduce shrinkage well, but it will make the rehydration not so well due to the surface hardening resist the water return to cell. In addition, the higher temperature was the cause of the dried pumpkin slices, it have more crispness.

KEYWORDS: Drying kinetics equation, Dried pumpkin, Vacuum combined with hot air

1. บทนำ

ปัจจุบันฟักทองได้รับการแปรรูปด้วยวิธีการต่างๆมากมาย อันเนื่องมาจากต้องการเพิ่มมูลค่า ซึ่งวิธีการอบแห้งฟักทองเป็นอีกวิธีที่ได้ความนิยมเช่นการอบแห้งด้วยลมร้อนเป็นวิธีที่สะดวกรวดเร็ว แต่วิธีนี้ก็มีข้อเสียในแง่ของคุณภาพของสารอาหารของผลิตภัณฑ์หลังจากการอบแห้งซึ่งสูญเสียได้ง่าย เมื่อต้องเจอความร้อน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Thurdthai and Krajangmathekul [1] ซึ่งศึกษาคุณภาพของฟักทองอบแห้งที่ผ่านการอบด้วยลมร้อนและลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟและไมโครเวฟร่วมกับสุญญากาศซึ่งพบว่า การใช้ไมโครเวฟร่วมกับการอบแห้งด้วยลมร้อนสามารถลดเวลาในการอบแห้งให้เร็วขึ้นได้ นอกเหนือจากนี้การใช้ไมโครเวฟร่วมกับสุญญากาศยังสามารถรักษาสารเบต้าแคโรทีนได้มากกว่าการทำให้แห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว Nawirska et al [2] ได้ศึกษาการอบแห้งของฟักทองหั่นบางด้วยการอบแห้งลมร้อน สุญญากาศและการอบแห้งไมโครเวฟร่วมกับสุญญากาศ จากการทดลองพบว่าการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับสุญญากาศจะใช้เวลาในการอบแห้งที่สั้นกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน 10 เท่าซึ่งวิธีการอบแห้งทั้งหมดนั้นจะได้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว Alibas [3] ศึกษาการอบแห้งชิ้นฟักทองด้วยวิธีการอบแห้ง 3 วิธี ได้แก่ การอบแห้งด้วยไมโครเวฟ การอบแห้งด้วยลม

ร้อนและการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ จากการศึกษาพบว่าการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนเป็นวิธีการอบแห้งที่ได้ผลดีที่สุดโดยพิจารณาจากเวลาในการอบแห้งค่าสีและการใช้พลังงาน

ในส่วนการอบแห้งแบบสุญญากาศนั้นมีข้อได้เปรียบในการใช้อุณหภูมิในการอบแห้งที่ต่ำกว่าอบแห้งด้วยลมร้อน จึงสามารถลดความสูญเสียด้านคุณภาพ ในแง่ของสีและเนื้อสัมผัส ซึ่งก็มีงานวิจัยมากมายที่ศึกษาเกี่ยวกับการอบแห้งแบบสุญญากาศอย่างเช่น Junlakan [4] ศึกษาผลของจลนพลศาสตร์การอบแห้งต่อคุณภาพของกล้วย สับปะรดและแอปเปิ้ล โดยการอบแห้งแบบสุญญากาศ พบว่าใช้เวลาในการอบแห้งที่น้อยที่สุดที่อุณหภูมิการอบแห้งสูงสุด ในด้านคุณภาพพบว่าผลิตภัณฑ์ที่อบแห้งแล้วให้ค่าของสีเหลืองสูงสุด การหดตัวต่ำเนื่องจากเกิดโครงสร้างในเนื้อผลิตภัณฑ์เป็นโพรงอากาศขนาดใหญ่และมีจำนวนมากจึงทำให้ค่าความกรอบสูงและความสามารถในการคืนตัวสูง Wua et al [5] ศึกษาคุณลักษณะการอบแห้งของมะเขือยาวด้วยวิธีสุญญากาศ ผลการศึกษาพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิการอบแห้งจะช่วยเร่งกระบวนการอบแห้งสุญญากาศให้เร็วขึ้น ในขณะที่ความดันในห้องอบแห้งไม่มีผลต่อกระบวนการอบแห้งภายในทุกช่วงอุณหภูมิการอบแห้ง ในส่วนการหดตัวของชิ้นตัวอย่าง พบว่าไม่ขึ้นกับอุณหภูมิในการอบแห้ง แต่เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อความดันในห้องอบแห้งเพิ่มขึ้น

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาทำให้ทราบลักษณะเด่นของการอบแห้งด้วยลมร้อนจะใช้เวลาน้อยและการอบแห้งด้วยสุญญากาศสามารถรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังอบแห้งได้ดีกว่า จึงเกิดแนวคิดการศึกษานำข้อดีของทั้งสองวิธีมาแก้ไขปัญหาและพัฒนาการอบแห้งด้วยวิธีสุญญากาศร่วมกับลมร้อนอาศัยเทคนิคการปรับเพิ่มความดันภายในห้องอบแห้งให้สูงขึ้นเพื่อปรับปริมาณอากาศให้เข้ามาหมุนเวียนภายในห้องอบแห้งเพิ่มมากขึ้นตามระดับความดันที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบจากการอบแห้งฟักทองด้วยวิธีสุญญากาศร่วมกับลมร้อน โดยศึกษา จลนพลศาสตร์การอบแห้ง การพัฒนาสมการการอบแห้งจากค่าคงที่การอบแห้งและค่าความสิ้นเปลืองพลังงาน รวมไปถึงการศึกษาคุณภาพของฟักทองหลังอบแห้งในแง่ของ สี การหดตัว การคืนตัว ค่าความแข็ง ค่าความกรอบ และโครงสร้างระดับจุลภาคของเนื้อฟักทอง

2. วัสดุและวิธีการทดลอง

2.1 วิธีการทดลอง

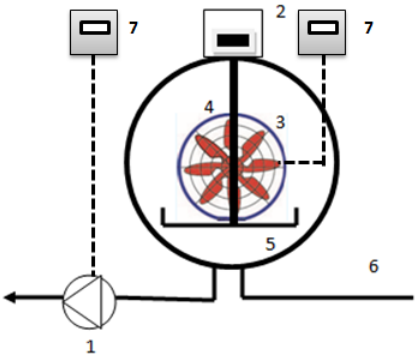
ในการทดลองอบแห้งฟักทองจะเตรียมฟักทองไว้สำหรับการทดลองแต่ละครั้งประมาณ 20 ชิ้น วางในชั้นบางๆ บนถาดใส่ตัวอย่าง ทดลองที่อุณหภูมิ 70 80 90 และ 100 องศาเซลเซียส และความดันสัมบูรณ์ที่ 7 10 13 15 และ 101 กิโลปาสคาลที่ความเร็วลม 1.2 เมตร/วินาที (ความดันบรรยากาศ) ตามลำดับ จนฟักทองมีความชื้นสุดท้ายเป็น 18% มาตรฐานแห้งอ้างอิงจาก มาตรฐาน

ผลิตภัณฑ์ชุมชนไทยปี 2546 [6] วัดปริมาณความชื้นของตัวอย่างและนำผลิตภัณฑ์อบแห้งมาทดสอบคุณภาพของสี การหดตัว อัตราส่วนการคืนตัวและเนื้อสัมผัส (ความแข็งและความกรอบ)

ขั้นตอนการทดลอง เริ่มต้นด้วยการปรับความดันภายในห้องอบแห้งที่ 7 กิโลปาสคาล และอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส จากนั้นเก็บข้อมูลการอบแห้งทั้งหมดจนถึงความชื้นสุดท้ายแล้วเริ่มการทดลองใหม่จนครบทุกช่วงอุณหภูมิ แล้วจึงปรับความดันภายในห้องอบแห้งใหม่เป็น 10 กิโลปาสคาล และปรับอุณหภูมิใหม่ทำซ้ำเหมือนในขั้นตอนแรก จนครบทุกช่วงความดันและช่วงอุณหภูมิที่ได้กำหนดไว้ ซึ่งการปรับระดับความดันภายในห้องอบแห้งให้เพิ่มสูงขึ้นตามความดันที่กำหนดในแต่ละการทดลอง ระบบจะใช้วิธีปล่อยความดันบรรยากาศภายนอกที่สูงกว่าเข้ามาเพื่อปรับความดันให้สูงขึ้นซึ่งทำให้มีอากาศเข้ามาไหลเวียนภายในมากขึ้นตามระดับความดันที่เพิ่มขึ้นด้วย และสุดท้ายที่ความดัน 101 กิโลปาสคาล จะเป็นการอบแห้งที่ระดับความดันบรรยากาศเปรียบเสมอเป็นการอบแห้งด้วยลมร้อนทั่วไป

2.2 ส่วนประกอบของเครื่องอบแห้งสุญญากาศ

อุปกรณ์การทดลองแสดงในรูปที่ 1 แสดงรายละเอียดภายในห้องอบแห้งสุญญากาศ ระบบประกอบด้วยห้องอบแห้งทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 30 เซนติเมตรและยาว 40 เซนติเมตร ทำจากสแตนเลสและหุ้มด้วยฉนวนอิลาสโตเมอร์ ปั๊มสุญญากาศขนาด 1 แรงม้า ฮีตเตอร์ไฟฟ้าขนาด 1.5 กิโลวัตต์ การบันทึกการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างระหว่างการอบแห้งใช้โหลดเซลล์ (Transtronic ความจุ 5 กิโลกรัม) ที่มีความแม่นยำ ± 0.2 กรัม และการวัดอุณหภูมิภายในห้องวัดโดยเทอร์โมคับเปิลชนิด K ส่งสัญญาณไปยังตัวควบคุม PID



รูปที่ 1 รายละเอียดเครื่องอบแห้งสุญญากาศ (1. ปั๊มสุญญากาศ 2. โหลดเซล 3. ฮีตเตอร์ไฟฟ้า 4. พัดลมไฟฟ้า 5. ถาดรับวัสดุอบ 6. ท่ออากาศเข้า 7. กิโลวัตต์-มิเตอร์)

2.3 วัสดุทดสอบ

วัสดุทดลองใช้ฟักทองสดพันธุ์ทองอำไพ (CV.Tong Ampai) มาจากตลาดท้องถิ่นในจังหวัดเชียงราย ฟักทองถูกนำมาปอกเปลือกแล้วหั่นเป็นชิ้นบางๆ เป็นแผ่นยาว 30 มิลลิเมตร และกว้าง 20 มิลลิเมตร หนา 3 ± 0.3 มิลลิเมตร ปริมาณความชื้นเริ่มต้นของฟักทองอยู่ในช่วง 700-900% ความชื้นมาตรฐานแห้ง ซึ่งพิจารณาจากการอบลมร้อนที่ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง

2.4 จลนพลศาสตร์การอบแห้งของฟักทอง

อัตราส่วนความชื้นของฟักทอง ณ เวลาใดๆ ถูกคำนวณโดย

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_{in} - M_{eq}} \quad (1)$$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น

M_t คือ ความชื้น ณ เวลาใดๆ (กิโลกรัม/กิโลกรัมมวลแห้ง)

M_{in} คือ ความชื้นเริ่มต้น (กิโลกรัม/กิโลกรัมมวลแห้ง)

M_{eq} คือ ความชื้นสมดุล (กิโลกรัม/กิโลกรัมมวลแห้ง)

k คือ ค่าคงที่การทำให้แห้ง (นาที$^{-1}$) t คือเวลา (นาที)

สำหรับสมการอบแห้งเอมไพริเคิลเป็นสมการที่สร้างจากแนวโน้มข้อมูลการทดลองซึ่งสามารถใช้ทำนายอัตราการอบแห้งได้ดี โดยเงื่อนไขการอบแห้งสอดคล้องกับสภาวะการทดลองถูกพัฒนาในรูปแบบของ Page [7] ดังสมการ (2)

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

เมื่อ n คือ ค่าคงที่

k คือ ค่าคงที่ของการอบแห้ง

2.5 การประเมินการใช้พลังงานเฉพาะ

ในการศึกษาครั้งนี้ระบบมีการเชื่อมต่อด้วยกิโลวัตต์-ชั่วโมงมิเตอร์ จำนวน 2 ตัว ต่อกับปั๊มสุญญากาศและเครื่องทำความร้อนไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 1 เพื่อวัดการใช้พลังงานและประสิทธิภาพการใช้พลังงานของกระบวนการอบแห้งได้รับการประเมินในแง่ของการใช้พลังงานเฉพาะดังสมการ

$$SEC = \frac{(E_{vacuum} + E_{heater})}{m_{water}} \quad (3)$$

เมื่อ SEC คือ การใช้พลังงานเฉพาะ (กิโลวัตต์-ชั่วโมง/กิโลกรัม$_{น้ำ}$)
E_{vacuum} คือ การวัดการใช้พลังงานไฟฟ้าของปั๊มสุญญากาศ (กิโลวัตต์-ชั่วโมง)
E_{heater} คือ การวัดการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องทำความร้อน (กิโลวัตต์-ชั่วโมง)
m_{water} คือ ปริมาณของน้ำที่ระเหยจากผลิตภัณฑ์แห้ง (กิโลกรัม)

2.6 การวัดสี

Spectrophotometer การวัดสี (ห้องปฏิบัติการ Hunter Association, Inc. รุ่น Mini Scan XE Plus, VA, USA) ถูกนำมาใช้เพื่อกำหนดสีของชิ้นตัวอย่างสดและแห้ง ในแง่ของ L แทนความสว่างจาก 0 (สีดำ) ถึง 100 (สีขาว) a แสดงถึงสีแดง (+) / greenness (-) และ b แสดงถึงสีเหลือง (+) / blueness (-) ในระบบสี Hunter Lab สำหรับการทดสอบการอบแห้งแต่ละครั้งการวัดสีได้ดำเนินการกับชิ้นตัวอย่าง 5 ชิ้นตัวอย่างที่ตำแหน่งที่แตกต่างกัน 3 ตำแหน่ง การเปลี่ยนแปลงสีของตัวอย่างถูกคำนวณโดย

$$\Delta L = \frac{(L - L_o)}{L_o} \quad (4)$$

$$\Delta a = \frac{(a - a_o)}{a_o} \quad (5)$$

$$\Delta b = \frac{(b - b_o)}{b_o} \quad (6)$$

โดยที่ L, a, b หมายถึงความสว่าง สีแดงและสีเหลืองของตัวอย่างแห้งตามลำดับ ในขณะ L_o, a_o และ b_o แทนค่าเริ่มต้นของความสว่าง สีแดงและสีเหลืองของกลุ่มชิ้นตัวอย่างสดตามลำดับ

2.7 การวัดการหดตัว

การวัดการหดตัวของฟักทองอบแห้งและวิเคราะห์ในรูปของการเปลี่ยนแปลงเปอร์เซ็นต์ของปริมาตรของตัวอย่าง โดยใช้วิธีการแทนที่ด้วยน้ำมันพืชเป็นของเหลวทำงาน ใช้ตัวอย่างสิบตัวอย่าง

สำหรับการวัดการหดตัวสำหรับแต่ละสภาวะการทดลอง การหดตัวของฟักทองอบแห้งแสดงในรูปของสูตรต่อไปนี้

$$\% \text{ Shrinkage} = \frac{V_o - V_f}{V_o} \times 100 \quad (7)$$

เมื่อ V_o และ V_f คือปริมาตรเริ่มต้นและสุดท้ายของชิ้นตัวอย่างตามลำดับ (ลูกบาทมิลลิเมตร)

2.8 ความสามารถในการคืนสภาพ (Rehydration ratio)

ความสามารถในการคืนสภาพของชิ้นฟักทองแห้งถูกวัดในอัตราส่วนของมวลฟักทองแห้งแช่ลงในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เวลา 10 นาที จากนั้นนำฟักทองมาซับน้ำเช็ดออกด้วยกระดาษชำระเพื่อกำจัดน้ำส่วนเกินบนพื้นผิว มวลของชิ้นฟักทองที่ผ่านการอบแห้งและมวลที่คืนสภาพแล้วจะถูกวัดด้วยเครื่องชั่งที่มีความแม่นยำ ± 0.001 กรัม จากนั้นอัตราส่วนการคืนตัวของตัวอย่างจะถูกคำนวณโดย

$$\text{Rehydration ratio} = \frac{m_{after}}{m} \quad (8)$$

เมื่อ m และ m_{after} คือมวลของตัวอย่างที่แห้งและมวลตัวอย่างที่คืนสภาพหลังจากแช่น้ำตามลำดับ

2.9 การวิเคราะห์เนื้อสัมผัส

การวัดเนื้อสัมผัสของตัวอย่าง ดำเนินการโดยใช้เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Stable Micro System, TA.XT. Plus, UK) ตัวอย่างจะถูกวางไว้บนฐานระนาบกลวงและจากนั้นจะใช้แรงกดไปที่ชิ้นตัวอย่างตัวอย่างโดยใช้หัวกดทรงกลมขนาด 5 มิลลิเมตร ถูกตั้งค่าให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ 2 มิลลิเมตร/วินาที จนกระทั่งชิ้นตัวอย่างแตกหรือหัก แรงสูงสุดของการทำให้ชิ้นตัวอย่างแตกและความชันเริ่มต้นของการเสียรูปถูกระบุว่าเป็นความแข็งและความกรอบของตัวอย่างตามลำดับ [8]

2.10 การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค

โครงสร้างทางจุลภาคของกลุ่มตัวอย่างถูกวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (LEO, Leo 1450 VP, UK) ที่กำลังขยาย 190 เท่า โดยการตัดชิ้นตัวอย่างและเคลือบผิวด้วยทองทำโดยใช้สปัตเตอร์ - โคเทอร์

2.11 การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การหารูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับวิเคราะห์กระบวนการอบแห้ง ได้ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จากสมการอบแห้งเอมไพริเคิล จากการนำข้อมูลผลการทดลองมาวิเคราะห์ด้วยวิธีการแบบไม่เชิงเส้นเพื่อพิจารณาความสามารถในการทำนายผลสมการที่พัฒนาขึ้นมา จะพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2) ที่สูงสุดและค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (Root mean square error, RMSE) ที่ต่ำที่สุด ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (9)

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^{N} (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{N} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

เมื่อ $MR_{exp,i}$ และ $MR_{pre,i}$ คือ อัตราส่วนความชื้นจากการทดลอง และ จากแบบจำลองตามลำดับ, N คือ จำนวนข้อมูล

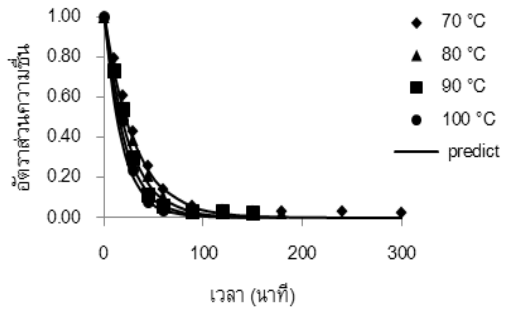
3 ผลการทดลองและวิจารณ์การทดลอง

เมื่อทำการทดลองและเก็บผลการทดลองตามสภาวะต่างๆ ที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.1 เสร็จเรียบร้อยแล้ว จากนั้นนำผลการทดลองมาทำการวิเคราะห์ศึกษา จลนพลศาสตร์การอบแห้ง การพัฒนาสมการการอบแห้งจากค่าคงที่การอบแห้งและค่าความสิ้นเปลืองพลังงาน รวมไปถึงการศึกษาคุณภาพของฟักทองหลังอบแห้งในแง่ของ สี การหดตัว การคืนตัว ค่าความแข็ง ค่าความกรอบและโครงสร้างระดับจุลภาคของเนื้อฟักทอง ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

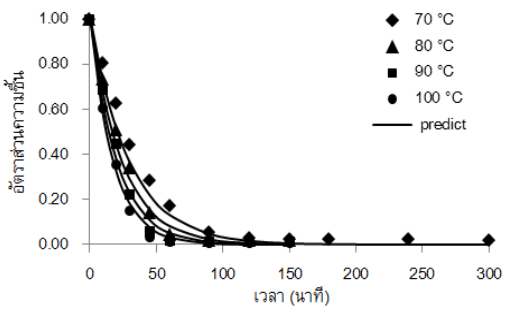
3.1 จลนพลศาสตร์การอบแห้งของชิ้นฟักทอง

ผลของการทดลองภายใต้การอบแห้งแบบสุญญากาศที่อุณหภูมิการอบแห้ง 70-100 องศาเซลเซียส และความดันในการอบแห้งที่ 7 10 13 15 และ 101 กิโลปาสคาล แสดงดังรูปที่ 2 (ก)-(จ) พบว่าอุณหภูมิมีผลต่ออัตราการอบแห้ง เมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงจะทำให้ความชื้นลดลงอย่างรวดเร็ว

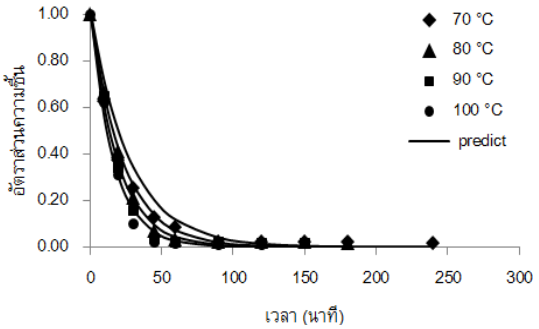
ส่งผลให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้นเนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิการอบแห้งจะเพิ่มแรงผลักดันของความร้อนและการถ่ายเทมวล สำหรับการอบแห้งที่ความดัน 7 กิโลปาสคาล ที่อุณหภูมิการอบแห้งที่ 70 80 90 และ 100 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ใช้เวลาในการอบแห้งจนไปถึงความชื้นสุดท้ายประมาณ 287 180 150 และ 86 นาที ดังแสดงในตารางที่ 1 จะเห็นได้ชัดว่าที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ใช้เวลาอบแห้งน้อยที่สุด



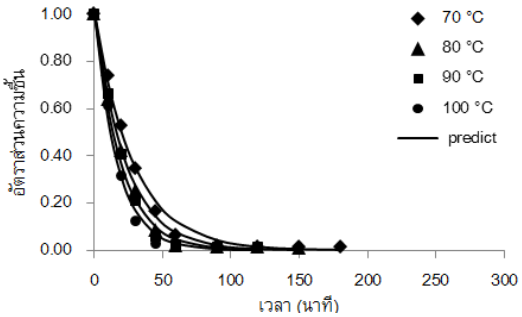
(ก) ความดัน 7 กิโลปาสคาล



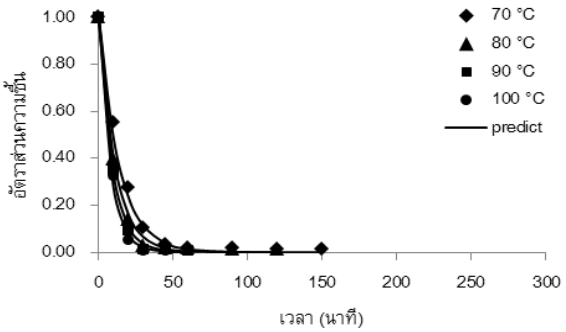
(ข) ความดัน 10 กิโลปาสคาล



(ค) ความดัน 13 กิโลปาสคาล



(ง) ความดัน 15 กิโลปาสคาล



(จ) ความดัน 101 กิโลปาสคาล

รูปที่ 2 การลดลงของความชื้นจากการอบแห้งฟักทอง และการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทำนายค่าคงที่การอบแห้ง ($k_{predict}$) โดยการพัฒนาสมการจลนพลศาสตร์

ตารางที่ 1 เวลาที่ใช้ในการอบแห้งฟักทอง

ความดัน (กิโลปาสคาล)	เวลาการอบแห้ง (นาที) อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)			
	70	80	90	100
7	287.0	180.0	150.0	86.0
10	146.0	112.0	68.0	60.5
13	90.0	60.0	58.0	51.0
15	88.9	78.0	57.8	44.0
101	59.0	37.0	26.0	24.0

ในแง่ของอิทธิพลของความดันภายในห้องอบแห้งตามเวลาที่ใช้ในการอบแห้งดังแสดงในตารางที่1 แสดงให้เห็นว่าความดันภายในห้องอบแห้งส่งผลต่อเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง เนื่องจากเมื่อความดันภายในห้องอบแห้งเพิ่มขึ้นทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งลดลงอย่างเช่นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส อบแห้งที่ความดันของ 7 10 13 15 และ 101 กิโลปาสคาล ใช้เวลา 54 55 45 38 34 30 และ 28 นาที ตามลำดับ เป็นผลมาจากการเพิ่มความดันภายในห้องอบแห้งเพื่อสร้างลมร้อนให้มีการหมุนเวียนในระบบไปพร้อมๆ กัน โดยการควบคุมระบบให้เปิดวาล์วเพื่อเพิ่มความดันภายในห้องอบแห้งในการรักษาระดับความดันตามสภาวะที่กำหนดไว้ให้คงที่ แต่ในเวลาเดียวกันก็ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของกระแสอากาศและเพิ่มสัมประสิทธิ์การพาความร้อนและการถ่ายเทมวลเกิดขึ้นด้วยทุกครั้ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความดัน 101 กิโลปาสคาลโดยประมาณ เป็นสภาวะที่ความดันบรรยากาศจะใช้เวลาน้อยที่สุด อย่างไรก็ตามความดันจะมีผลต่อช่วงเวลาในการทำให้แห้งมากกว่าของอุณหภูมิ

การพัฒนาสมการจลนศาสตร์การอบแห้งโดยนำผลการทดลองมาวิเคราะห์ และหาค่าคงที่ของการอบแห้งเอมไพริเคิลรูปแบบของ Page (k_{exp}) สมการที่ (2) แสดงดังตารางที่ 2 ซึ่งพบว่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของอุณหภูมิและความดันภายในห้องอบแห้งในลักษณะเป็นเส้นตรง จากการพัฒนาสมการค่าคงที่ของการอบแห้งเป็นฟังก์ชั่นกับอุณหภูมิและความดันในลักษณะเป็นเส้นตรงจากนั้นถูกนำมาหาความสัมพันธ์โดยสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$k_{predict} = a + bP + cT + dPT \quad (10)$$

เมื่อ $k_{predict}$ คือ ค่าคงที่ของการอบแห้ง

a, b, c, d คือ ค่าคงที่ของสมการ

P คือ ความดันสัมบูรณ์ (กิโลปาสคาล)

T คือ อุณหภูมิอบแห้ง (องศาเซลเซียส)

ตารางที่ 2 ค่าคงที่ของสมการอบแห้งที่ได้จากการทดลองและจากการพยากรณ์

ความดัน (กิโลปาสคาล)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	k_{exp}	$k_{predict}$	R^2	RMSE
7	70	0.0293	0.0327	0.988	0.036
	80	0.0333	0.0401	0.988	0.052
	90	0.0393	0.0474	0.977	0.069
	100	0.0444	0.0548	0.943	0.082
10	70	0.0278	0.0339	0.910	0.053
	80	0.0384	0.0417	0.918	0.034
	90	0.0474	0.0494	0.920	0.034
	100	0.0569	0.0572	0.925	0.028
13	70	0.0369	0.0352	0.955	0.018
	80	0.0473	0.0433	0.974	0.023
	90	0.0499	0.0514	0.935	0.022
	100	0.0602	0.0595	0.935	0.025
15	70	0.0527	0.0361	0.905	0.043
	80	0.0493	0.0444	0.978	0.025
	90	0.0558	0.0527	0.944	0.029
	100	0.0621	0.0611	0.914	0.031
101	70	0.0663	0.0726	0.990	0.016
	80	0.0965	0.0913	0.998	0.012
	90	0.1106	0.1099	0.978	0.009
	100	0.1209	0.1286	0.986	0.015

ตารางที่ 2 แสดงค่าคงที่ของสมการอบแห้งจากการพยากรณ์ $k_{predict}$ ของสมการที่ (10), R^2 และ RMSE พบว่าสามารถทำนายผลการอบแห้งฟักทองด้วยสุญญากาศร่วมกับลมร้อนได้ดีโดยให้ค่า R^2 อยู่ระหว่าง 0.905-0.998 และค่า RMSE อยู่ระหว่าง 0.009-0.082 ซึ่งเมื่อนำค่า $k_{predict}$ ที่ได้มาคำนวณตามรูปแบบของสมการ Page มาเปรียบเทียบกับผลการทดลอง พบว่ามีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี ดังข้อมูลซึ่งได้แสดงในรูปที่ 2 (ก)-(จ)

ตารางที่ 3 การใช้พลังงานเฉพาะของการอบแห้ง

ความดัน (กิโลปาสคาล)	อุณหภูมิอบแห้ง (องศาเซลเซียส)	เวลาการอบแห้ง (นาที)	การใช้พลังงาน (กิโลวัตต์ ชั่วโมง)				SEC (กิโลวัตต์ ชั่วโมง/กิโลกรัมน้ำ)
			E_{Vac}	E_{he}	E_f	E_{total}	
7	70	287	8.4	0.5	0.9	9.8	560.6
	80	180	5.2	0.4	0.6	6.2	361.8
	90	150	4.4	0.4	0.5	5.3	340.7
	100	86	2.5	0.4	0.3	3.2	186.2
10	70	146	4.2	0.3	0.5	5.0	291.6
	80	112	3.3	0.3	0.4	3.9	222.4
	90	68	2.0	0.3	0.2	2.5	147.6
	100	60	1.7	0.3	0.2	2.2	134.8
13	70	90	2.6	0.2	0.3	3.1	185.9
	80	60	1.7	0.1	0.2	2.1	117.1
	90	58	1.7	0.2	0.2	2.1	126.8
	100	51	1.5	0.2	0.2	1.9	116.5
15	70	90	2.6	0.2	0.3	3.1	207.1
	80	78	2.3	0.2	0.3	2.7	175.8
	90	58	1.7	0.2	0.2	2.1	141.3
	100	44	1.3	0.2	0.1	1.6	102.1

ตารางที่ 3 การใช้พลังงานเฉพาะของการอบแห้ง (ต่อ)

ความดัน (กิโลปาสคาล)	อุณหภูมิอบแห้ง (องศาเซลเซียส)	เวลาการอบแห้ง (นาที)	การใช้พลังงาน (กิโลวัตต์ ชั่วโมง)				SEC (กิโลวัตต์ ชั่วโมง/กิโลกรัมน้ำ)
101	70	59.0	-	0.20	0.30	0.50	32.97
	80	37.0	-	0.22	0.19	0.41	28.78
	90	26.0	-	0.25	0.13	0.38	26.00
	100	24.0	-	0.24	0.12	0.36	24.75

หมายเหตุ: SEC หมายถึง ค่าการใช้พลังงานจำเพาะ เป็นค่าที่สะท้อนถึงประสิทธิภาพการใช้พลังงานและต้นทุนด้านพลังงาน

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของเครื่องอบแห้งจากการอบแห้งฟักทองโดยใช้การอบแห้งแบบสุญญากาศแสดงในตารางที่ 3 พบว่าที่เงื่อนไขความดันเดียวกันเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้การใช้พลังงานลดลงโดยที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส มีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะน้อยที่สุด เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิการอบแห้งเพิ่มขึ้นจะทำให้เวลาในการอบแห้งลดลงส่งผลให้การใช้พลังงานลดลง และเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิอบแห้งเดียวกันพบว่าอิทธิพลของความดันภายในห้องอบแห้งมีผลต่อการใช้พลังงานโดยเฉพาะเมื่อความดันเพิ่มขึ้นจะทำให้ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลง เนื่องจากเวลาในการอบแห้งสั้นลงเพราะเกิดจากการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของอากาศในห้องอบแห้งและเมื่อใช้ความดันในการอบแห้งเพิ่มขึ้นเป็นการลดการทำงานของปั๊มสุญญากาศให้มีการทำงานลดลงเนื่องการใช้พลังงานส่วนใหญ่มาจากปั๊มสุญญากาศ (E_{vac}) มากกว่าเครื่องทำความร้อน (E_{he}) และพัดลม (E_f) ซึ่งปั๊มสุญญากาศใช้พลังงานประมาณ 70–85% ของพลังงานที่ใช้ทั้งหมด โดยเฉพาะที่ความดันบรรยากาศ 101 กิโลปาสคาลโดยประมาณ ปั๊มสุญญากาศไม่มีการทำงานจึงทำให้ใช้พลังงานจำเพาะน้อยที่สุด

3.2 คุณภาพด้านสีของฟักทอง

ตารางที่ 4 แสดงค่าสีของชิ้นตัวอย่างหลังอบแห้งเมื่อพิจารณาที่ความดันเดียวกัน พบว่าเมื่ออุณหภูมิการอบแห้งสูงขึ้นทำให้สีของชิ้นตัวอย่างมีการเปลี่ยนแปลงค่าความสว่างลดลงค่าความเป็นสีแดงเพิ่มขึ้นเล็กน้อยอย่างไม่มีนัยสำคัญ และค่าความเป็นสีเหลืองเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย เนื่องจากปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลเอนไซม์ [9] เมื่อได้รับความร้อนเพิ่มสูงขึ้น จะเปลี่ยนสีของฟักทองให้เป็นสีแดง หากสัมผัสเป็นระยะเวลานานขึ้นจะทำให้สีเข้มขึ้นเป็นสีน้ำตาลเข้มจนเป็นสีดำในที่สุด สำหรับ

การเพิ่มขึ้นของความดันมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของฟักทองเช่นกัน โดยเฉพาะที่ความดันสูง 101 กิโลปาสคาล พบว่า ค่าความสว่าง ค่าความเป็นสีแดงและค่าความเป็นสีเหลืองของชิ้นฟักทองหลังอบแห้งเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าที่ความดันต่ำ 7 กิโลปาสคาล เนื่องจากที่ความดันสูงใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่าจึงทำให้ชิ้นทดสอบสัมผัสกับความร้อนน้อยกว่า นอกจากนั้นยังพบว่าค่าความสว่างของชิ้นฟักทองหลังอบแห้งมีการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด เนื่องจากเนื้อฟักทองมีแป้งเป็นองค์ประกอบในปริมาณมากเมื่อผิวชิ้นฟักทองสัมผัสกับกระแสอากาศที่เพิ่มมากขึ้นในช่วงความดันสูง จึงทำให้น้ำระเหยออกไปอย่างรวดเร็วแต่ยังคงเม็ดแป้งสีขาวบริเวณผิวไว้ โดยสรุปพบว่า ความดันในการอบแห้งมีผลต่อความสว่างของฟักทองอบแห้งมากกว่าอุณหภูมิการอบแห้ง และเมื่อพิจารณาสีฟักทองอบแห้งด้วยสายตาลักษณะสีที่เป็นที่ยอมรับจะต้องมีสีส้มเข้มขึ้นจากเนื้อฟักทองสด ซึ่งอยู่ในช่วงความดัน 7-10 กิโลปาสคาล อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4 ผลของอุณหภูมิและความดันต่อการเปลี่ยนแปลงสีของชิ้นฟักทองอบแห้ง

ความดัน (กิโลปาสคาล)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	(ΔL)	(Δa)	(Δb)
7	70	-0.115 ± 0.016^{cd}	-0.268 ± 0.033^{bc}	-0.280 ± 0.028^{f}
	80	$-0.128 \pm 0.024b^{cd}$	-0.247 ± 0.051^{c}	-0.247 ± 0.015^{g}
	90	-0.165 ± 0.044^{a}	-0.130 ± 0.094^{d}	-0.267 ± 0.066^{fg}
	100	-0.165 ± 0.042^{a}	-0.100 ± 0.068^{d}	-0.305 ± 0.047^{de}
10	70	-0.116 ± 0.051^{cd}	-0.217 ± 0.088^{c}	-0.119 ± 0.016^{ij}
	80	-0.147 ± 0.017^{ab}	-0.037 ± 0.013^{e}	-0.142 ± 0.026^{hi}
	90	-0.155 ± 0.054^{a}	0.026 ± 0.004^{e}	-0.164 ± 0.028^{h}
	100	-0.148 ± 0.037^{ab}	0.031 ± 0.010^{e}	-0.139 ± 0.030^{i}
13	70	-0.062 ± 0.058^{fgh}	-0.106 ± 0.058^{d}	-0.093 ± 0.022^{kl}
	80	-0.070 ± 0.020^{fgh}	-0.089 ± 0.121^{d}	-0.288 ± 0.026^{ef}
	90	-0.105 ± 0.040^{de}	-0.082 ± 0.112^{d}	-0.312 ± 0.028^{d}
	100	-0.140 ± 0.013^{abc}	-0.086 ± 0.039^{d}	-0.328 ± 0.040^{cd}
15	70	-0.051 ± 0.033^{h}	-0.020 ± 0.106^{e}	-0.320 ± 0.022^{b}
	80	-0.063 ± 0.044^{fgh}	-0.009 ± 0.072^{e}	-0.373 ± 0.034^{a}
	90	-0.084 ± 0.050^{efg}	0.135 ± 0.119^{f}	-0.386 ± 0.036^{a}

ตารางที่ 4 ผลของอุณหภูมิและความดันต่อการเปลี่ยนแปลงสีของชิ้นฟักทองอบแห้ง (ต่อ)

ความดัน (กิโลปาสคาล)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	(ΔL)	(Δa)	(Δb)
15	100	-0.103 ± 0.045^{de}	0.170 ± 0.191^{f}	-0.338 ± 0.025^{c}
101	70	-0.053 ± 0.015^{gh}	-0.461 ± 0.065^{a}	-0.072 ± 0.024^{l}
	80	-0.073 ± 0.033^{fgh}	-0.327 ± 0.074^{b}	-0.111 ± 0.039^{jk}
	90	-0.080 ± 0.051^{efg}	-0.410 ± 0.066^{a}	-0.109 ± 0.050^{jk}
	100	-0.089 ± 0.028^{ef}	-0.436 ± 0.028^{a}	-0.376 ± 0.031^{b}

หมายเหตุ: ค่าในคอลัมน์เดียวกันที่มีตัวยกที่แตกต่างกันหมายความว่าค่านั้นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

3.3 การหดตัว

การหดตัวของฟักทองอบแห้งแสดงในตารางที่ 5 เมื่อพิจารณาที่ความดันเดียวกันพบว่า ผลของอุณหภูมิการอบแห้งต่อการหดตัวของฟักทองอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นการหดตัวของชิ้นทดลองลดลง เนื่องจากการหดตัวของชิ้นฟักทองเกิดจากความร้อนของอากาศในห้องอบแห้งส่งผลให้น้ำที่อยู่ภายในเซลล์ฟักทองมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจึงมีการระเหยน้ำจากการเคลื่อนที่ของของน้ำจากภายในเนื้อฟักทองไปยังอากาศแวดล้อมในห้องอบแห้งได้ง่ายขึ้น ทำให้โครงสร้างภายในเนื้อฟักทองมีปริมาตรลดลง จึงเกิดการหดตัวตามมาโดยเฉพาะการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำเช่นที่ 70 องศาเซลเซียส เกิดการถ่ายเทความร้อนอย่างช้าๆ ทำให้โครงสร้างภายในเกิดการทรุดตัวจะทำให้ฟักทองเกิดการหดตัวสูงกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง สาเหตุเนื่องมาจากอุณหภูมิสูงทำให้ผิวภายนอกของชิ้นทดลองจะเกิดเป็นโซนแข็งอย่างรวดเร็วเนื่องจากแป้งในเนื้อฟักทองจับตัวเป็นผิวแข็งตัว ทำให้ยืดตัวและคงสภาพของโครงสร้าง ส่งผลต่อเนื้อฟักทองไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ยกเว้นการอบแห้งที่ความดันสูง 101 กิโลปาสคาล ซึ่งอุณหภูมิการอบแห้งไม่มีผลต่อการหดตัวอย่างไม่มีนัยสำคัญต่อกัน เนื่องจากเป็นการอบแห้งในสภาวะลมร้อนมีปริมาณลมมากที่สุดทำให้ผิวของฟักทองแห้งเร็วมากในช่วงเริ่มต้นการทำให้แห้ง นอกจากนี้ชั้นที่แข็งของพื้นผิวที่พัฒนาขึ้นในกรณีของอากาศแห้งที่อุณหภูมิสูงทำให้ลดระดับของการหดตัว [10] จึงทำให้ผิวของชิ้นทดสอบเป็นชั้นแข็งยึดเกาะกันตั้งแต่ที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งเมื่ออุณหภูมิอบแห้งเพิ่มสูงขึ้นจึงไม่มีผลทำให้การหดลดลง ในส่วนของความดันภายในห้องอบแห้งมีผลต่อการหดตัวอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งพบว่าเมื่อความดันเพิ่มสูงขึ้นทำให้การหดตัวลดลง เนื่องจากทุกๆ สภาวะที่ความดันเพิ่มขึ้นจะเป็นการเพิ่มอากาศให้ไหลเวียนภายในห้องอบแห้งให้เพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ส่งผลให้ผิวฟักทองเกิดเป็นชั้นแข็งเร็วขึ้นและ

ลดการหดตัวเร็วขึ้นเช่นกัน ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Santacruz et al [11] และ Zhang et al [12] ซึ่งพบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำกว่าจะทำให้ที่เกิดจากการหดตัวสูงสุด

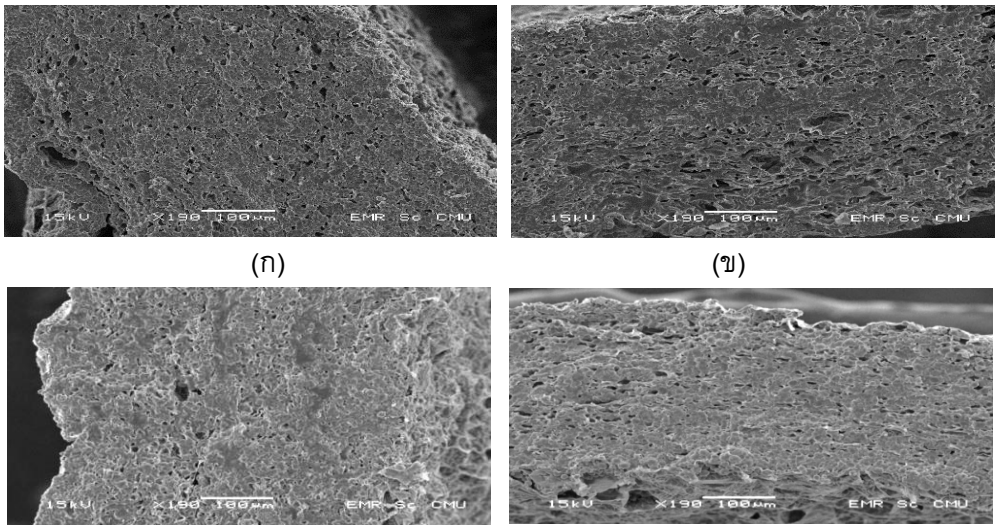
ตารางที่ 5 ผลของการอบแห้งด้วยอุณหภูมิและความดันต่อคุณภาพด้านต่าง ๆ ของชิ้นฟักทองอบแห้ง

ความดัน (กิโลปาสคาล)	อุณหภูมิการอบแห้ง (องศาเซลเซียส)	การหดตัว (%)	อัตราส่วนการคืนตัว	ค่าความแข็ง (นิวตัน)	ค่าความกรอบ (นิวตัน/มิลลิเมตร)
7	70	90.82 ± 1.26^{def}	3.28 ± 0.075^{bc}	17.40 ± 1.07^{cd}	6.10 ± 1.39^{ab}
	80	89.60 ± 1.16^{bcde}	3.30 ± 0.245^{bc}	16.52 ± 0.13^{cd}	7.20 ± 0.99^{abc}
	90	89.62 ± 1.34^{bcde}	3.55 ± 0.051^{defgh}	15.26 ± 1.68^{bc}	8.11 ± 0.99^{bcd}
	100	85.88 ± 0.39^{bcde}	3.56 ± 0.096^{defgh}	12.02 ± 3.06^{ab}	11.12 ± 0.45^{def}
10	70	91.09 ± 0.78^{efgh}	3.15 ± 0.037^{ab}	29.11 ± 1.48^{hi}	6.80 ± 1.61^{abc}
	80	91.27 ± 0.74^{fgh}	3.26 ± 0.061^{bc}	28.10 ± 2.72^{hi}	7.22 ± 0.64^{abc}
	90	88.52 ± 0.97^{bcdef}	3.36 ± 0.126^{bcde}	25.36 ± 2.32^{gh}	8.11 ± 2.65^{bcd}
	100	89.92 ± 0.63^{cdef}	3.60 ± 0.050^{fgh}	21.15 ± 1.79^{defg}	10.14 ± 0.49^{cde}
13	70	90.97 ± 0.42^{defg}	3.30 ± 0.030^{bc}	35.11 ± 2.25^{j}	4.60 ± 1.59^{ab}
	80	89.44 ± 0.87^{bcd}	3.33 ± 0.020^{bcd}	33.67 ± 2.61^{j}	4.81 ± 2.52^{ab}
	90	89.71 ± 0.75^{bcdef}	3.34 ± 0.190^{bcd}	27.17 ± 2.10^{hi}	6.91 ± 2.06^{abc}
	100	90.18 ± 0.81^{cdef}	3.58 ± 0.047^{efgh}	22.86 ± 3.00^{efg}	9.41 ± 0.95^{cde}
15	70	88.39 ± 1.38^{b}	3.01 ± 0.090^{a}	25.08 ± 2.70^{gh}	8.41 ± 1.58^{bcd}
	80	90.10 ± 0.81^{def}	3.36 ± 0.256^{bcde}	24.73 ± 2.89^{fgh}	9.92 ± 3.57^{cde}
	90	90.07 ± 0.59^{cdef}	3.45 ± 0.095^{cdefg}	18.87 ± 1.31^{cde}	12.30 ± 3.38^{ef}
	100	88.51 ± 1.54^{bc}	3.69 ± 0.283^{gh}	10.00 ± 0.21^{a}	13.39 ± 1.55^{ef}
101	70	93.09 ± 1.24^{i}	3.76 ± 0.015^{h}	78.09 ± 1.07^{k}	4.22 ± 0.67^{a}
	80	92.48 ± 1.10^{hi}	3.73 ± 0.066^{h}	31.31 ± 1.62^{ij}	4.85 ± 2.68^{def}
	90	92.34 ± 1.02^{ghi}	3.67 ± 0.026^{gh}	20.50 ± 1.13^{def}	8.88 ± 2.89^{g}
	100	86.15 ± 1.96^{a}	3.40 ± 0.011^{cdef}	18.07 ± 1.70^{cde}	8.91 ± 4.23^{fg}

หมายเหตุ: ค่าในคอลัมน์เดียวกันที่มีตัวยกที่แตกต่างกันหมายความว่าค่านั้นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

3.4 อัตราส่วนการคืนตัว

ตารางที่ 5 แสดงให้เห็นว่าผลของอุณหภูมิการอบแห้งและความดันค่อนข้างมีผลต่อความสามารถในการคืนตัวเนื่องจากที่อุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ชิ้นฟักทองอบแห้งที่มีโครงสร้างที่มีรูพรุนมากขึ้นสังเกตจากรูปที่ 3 (ก) และ (ข) จะเห็นว่าชิ้นฟักทองแห้งที่ความดัน 7 กิโลปาสคาลและอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส รูป(ก) มีขนาดของรูพรุนใหญ่และมีจำนวนมากขึ้นเมื่อเทียบกับที่ความดันเดียวกันอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสที่ต่ำกว่า จึงทำให้น้ำสามารถเคลื่อนที่กลับเข้าไปในโครงสร้างได้สะดวกมากขึ้น [13] ในส่วนของความดันการอบแห้งมีผลที่ไม่แน่นอนต่อการคืนตัวที่อุณหภูมิการอบแห้งเดียวกัน ยกเว้นการอบแห้งที่ความดัน 101 กิโลปาสคาล อุณหภูมิไม่มีผลต่อการคืนตัวของชิ้นฟักทองอย่างไม่มีนัยสำคัญ เนื่องจากผิวของชิ้นฟักทองเป็นชั้นแข็งตั้งแต่อุณหภูมิต่ำ 70 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นตัวต้านทานทำให้น้ำสามารถคืนกลับไปในโครงสร้างได้ยากขึ้น



(ก) (ข)

(ค) (ง)

รูปที่ 3 โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นฟักทองหลังอบแห้งที่ถูกวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน: (ก) 7 กิโลปาสคาล 80 องศาเซลเซียส (ข) 7 กิโลปาสคาล 100 องศาเซลเซียส (ค) 101 กิโลปาสคาล 80องศาเซลเซียส (ง) 7 กิโลปาสคาล 100 องศาเซลเซียส

3.5 การทดสอบคุณภาพด้านเนื้อสัมผัส

ผลการทดลองของเนื้อสัมผัสของชิ้นฟักทองหลังอบแห้งในแง่ของค่าความแข็งและกรอบ แสดงในตารางที่ 5 พบว่าที่ความดันเดียวกันเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นทำให้ค่าความแข็งของชิ้นตัวอย่างลดลงและค่าความกรอบเพิ่มขึ้นทุกช่วงความดันเนื่องจากการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงกว่าทำให้

ผลิตภัณฑ์ที่แห้งมีรูพรุนมากขึ้นและมีขนาดใหญ่ แสดงดัง รูปที่ 3 (ก) และ(ข) ในแง่มุมของความดันเมื่อเพิ่มสูงขึ้นมีผลต่อค่าความแข็งและความค่ากรอบเช่นกันแต่มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะที่ความดัน 101 กิโลปาสคาล ให้ค่าความแข็งสูงที่สุดเนื่องจากการอบแห้งที่ความดันดังกล่าวโครงสร้างภายในมีเนื้อเกาะตัวรวมเป็นเนื้อเดียวกันเป็นจำนวนมาก รวมทั้งรูพรุนมีขนาดเล็กและจำนวนน้อยกว่าที่ความดันต่ำแสดงดังรูปที่ 3(ค) ในแง่ของความกรอบสามารถดูจากตารางที่ 5 ที่อุณหภูมิสูงขึ้นให้ชิ้นฟักทองอบแห้งมีค่าความกรอบมากขึ้นนี่อาจเป็นเพราะรูพรุนมีขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อยๆ แต่ผลการวิจัยพบว่าความกรอบของตัวอย่างที่อบแห้งนั้นแปรผกผันกับความแข็ง

4. สรุปผล

ผลจากการศึกษาจลนพลศาสตร์และคุณภาพฟักทองอบแห้งด้วยสุญญากาศร่วมกับการอบแห้งลมร้อนพบว่า อุณหภูมิมีผลต่ออัตราการอบแห้ง ซึ่งเมื่ออุณหภูมิการอบแห้งที่สูงและความดันเพิ่มสูงขึ้นทำให้เวลาในการอบแห้งลดลงความชื้นลดลง โดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ใช้เวลาอบแห้งน้อยที่สุด แต่อย่างไรก็ตามความดันจะมีผลต่อช่วงเวลาในการทำให้แห้งมากกว่าของอุณหภูมิ ในส่วนของการพัฒนาสมการค่าคงที่ของการอบแห้งสามารถนำค่า $k_{predict}$ ที่ได้มาคำนวณตามรูปแบบของสมการ Page มีความสอดคล้องกับค่าได้จากการทดลอง การอบแห้งที่ความดัน 101 กิโลปาสคาลใช้พลังงานน้อยที่สุดเนื่องจากใช้เวลาน้อยที่สุดและไม่ต้องใช้ปั๊มสุญญากาศ แต่ในแง่คุณภาพด้านสี พบว่าในช่วงความดัน 7-10 กิโลปาสคาล อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ให้สีฟักทองอบแห้งดีที่สุดโดยมีสีส้มเข้ม ในส่วนคุณภาพที่เป็นค่าการหดตัว อุณหภูมิอบแห้งที่สูงจะช่วยลดการหดตัวได้ดีแต่ทำให้การคืนตัวได้ไม่ค่อยดีเท่าที่ควรเนื่องจากผิวที่แข็งจะต้านทานการดูดคืนน้ำกลับเข้าเนื้อเซลล์ นอกจากนั้นอุณหภูมิที่สูงขึ้นยังทำให้ชิ้นฟักทองอบแห้งมีค่าความกรอบมากขึ้นอาจมีสาเหตุจากรูพรุนกว้างขึ้นเรื่อยๆ นอกจากนี้ผลการวิจัยยังพบว่าอีกว่าความกรอบของตัวอย่างที่อบแห้งนั้นแปรผกผันกับความแข็ง

References

[1] Thurdthai N, Krajangmathekul S. Effect of microwave assisted HD on quality of dried pumpkin. Proceedings of 49th Kasetsart University Annual Conference: Agro-Industry; 2011 Feb 1-4; Bangkok. Bangkok: Kasetsart University; 2011. p. 253-63. (In Thai).

[2] Nawirska A, Figiel A. Kucharska A.Z, Sokol–Letowska A, Biesiada A. Drying kinetics and quality parameters of pumpkin slices dehydrated using different methods. Journal of Food Engineering 2009;94:14-20.

[3] Alibas I. Microwave, air and combined microwave - air drying parameters of pumpkin Slices. LWT–Food Science and Technology 2006;40:1445-51.

[4] Junlakan W. Effect of drying kinetics on the quality of vacuum dried banana, pineapple and apple slices [Doctor of Philosophy in Chemical Engineering]. Songkhla, Thailand: Prince of Songkla University; 2014. (In Thai)

[5] Wua L, Orikasa T, Ogawa Y, Tagawa A. Vacuum drying characteristics of eggplants. Journal of Food Engineering 2007;83:422-9.

[6] Thai Community Product Standard. TCPS 139/2003: Dried fruit [Internet]. 2003 [cited 2015 October 1]. Available from: http://www.tifi.go.th. (In Thai)

[7] Page G. Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers [Master of Science's Thesis]. USA: Purdue University; 1949.

[8] Aguilera JM, Castro L, Cadoche L. Structure property relationships in starch amorphous model. Proceedings of The 14th International Drying Symposium; 2004 August 22-25; Sao Paulo City, Brazil. Campinas, Brazil: State University; 2004. p.1468-72.

[9] Krokida MK, Maroulis Z. Quality changes during drying of food materials. In: Mujumdar AS, editor. Drying Technology in Agriculture and Food Science. Enfield, USA: Science Publishers; 2000. p. 61-106.

[10] Suvarnakuta P, Devahastin S, Mujumdar AS. Drying kinetics and carotene degradation in carrot undergoing different drying processes. Journal of Food Science 2005;70:520-6.

[11] Santacruz V, Welti-Chanes J, Farrera-Rebollo RR. Effects of air-drying on the shrinkage, surface temperatures and structural features of apples slabs by means of fractal analysis. Revista Mexicana de Ingeniera Química 2008;7(1):55-63.

[12] Zhang K, Lu J, Guo Y, Sun B, Zhao F, Cao Y, Ren D. Effects of different drying processes on the quality of spirulina platensis. International Agricultural Engineering Journal 2013;22(4):63-71.

[13] Nimmol C, Devahastin S, Swasdisevi T, Soponronnarit S. Drying of banana slices using combined low–pressure superheated steam and far–infrared radiation. Journal of Food Engineering 2007;81:624-33.

ประวัติผู้เขียนบทความ

ภักดี สิทธิฤทธิ์กวิน ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง อาจารย์ประจำหลักสูตรสาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาลัยเชียงราย 199 ม.6 ต. ป่าอ้อดอนชัย อ. เมือง จ. เชียงราย 57000 โทรศัพท์ 085-0406404
E-Mail: pakdee.me@gmail.com

Article History:

Received: August 26, 2019

Revised: December 9, 2019

Accepted: December 13, 2019