
การอบแห้งชিংด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด
Ginger Drying Using Infrared-Vacuum Technique

อำไพศักดิ์ ทีบุญมา* และ ศักชัย จงจำ

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

Umphisak Teeboonma* and Sakchai Jongjam

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการอบแห้งชিংด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด และหาสมการการอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมสำหรับทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งชিং โดยทำการทดลองอบแห้งภายใต้เงื่อนไขความดันสัมบูรณ์ 5, 10 และ 15 กิโลปาสกาล และอุณหภูมิอบแห้ง 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส ซึ่งมีพารามิเตอร์ที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการศึกษา คือ อัตราส่วนความชื้น อัตราการอบแห้ง และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ผลจากการศึกษาพบว่า เมื่อลดความดันสัมบูรณ์หรือเพิ่มอุณหภูมิอบแห้ง จะทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลง นอกจากนั้นยังพบว่า สมการของ Modified Henderson and Pabis สามารถทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งชিংด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดได้ดีที่สุด โดยให้ค่า R^2 มากที่สุด และ RMSE น้อยที่สุด

คำสำคัญ : การอบแห้งชিং สุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด สมการอบแห้งชั้นบาง

Abstract

The objectives of this research were to study ginger drying using infrared-vacuum technique and to find out the appropriate thin layer equation for predicting the drying kinetic of ginger. To achieve these purposes, experiments were conducted on the following conditions: absolute pressures in drying chamber of 5, 10, 15 kPa and drying temperatures of 40, 50, 60°C. The effects of drying conditions on moisture ratio, drying rate and specific energy consumption were also investigated. From experimental results, it was revealed that increment of drying temperature or decrement of absolute pressure in drying chamber cause high drying rate and low specific energy consumption. Furthermore, it was found that thin layer equation providing the highest coefficient of determination (R^2) and the lowest root mean square error (RMSE) is Modified Henderson and Pabis equation.

Keywords : ginger drying, infrared-vacuum, thin layer equation

Corresponding author. E-mail: enaump@ubu.ac.th

บทนำ

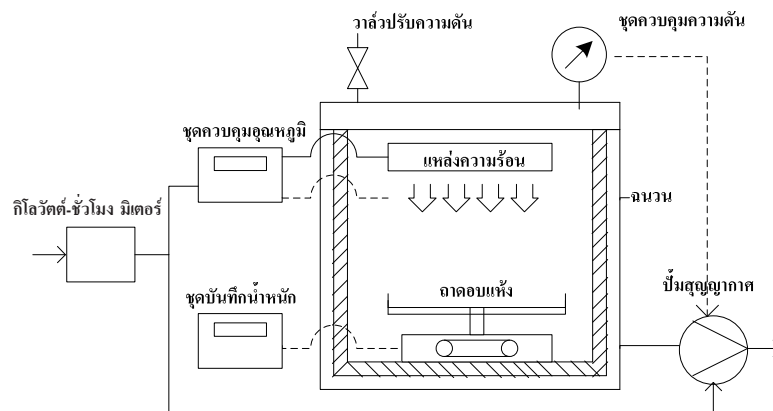
สมุนไพร ใช้เป็นยารักษาโรคมาตั้งแต่สมัยโบราณ ซึ่งถือได้ว่าเป็นมรดกทางภูมิปัญญาที่ทรงคุณค่ายิ่งของไทย ซึ่ง (Ginger) เป็นพืชสมุนไพรที่มีคุณประโยชน์ เป็นทั้งอาหารและยารักษาโรคเหง้าซึ่งมีกลิ่นฉุน มีสรรพคุณช่วยขับลม แก้ท้องอืด จุกเสียดแน่นเพื่อ แก้กลิ้นไส้อาเจียน และขับเสมหะ จากข้อมูลทางเภสัชวิทยา พบว่า ซึ่งมีฤทธิ์ต้านจุลชีวะ ลดการอักเสบ ป้องกันและบรรเทาอาการคลื่นไส้อาเจียนจากการเมาเรือ เมาเรือ อาการแพ้ท้อง อาการคลื่นไส้ในผู้ป่วยหลังการผ่าตัดหรือผู้ป่วยเคมีบำบัด ปัจจุบันจึงถูกนำมาแปรรูปเพื่อจุดประสงค์ทางการค้า โดยผ่านการแปรสภาพด้วยกระบวนการที่เหมาะสมเพื่อให้ง่ายต่อการเก็บรักษาและการใช้ประโยชน์ ในรูปของแคปซูล ยาเม็ด หรือยาชงสมุนไพร การอบแห้งเป็นกระบวนการลดความชื้นเพื่อแปรสภาพยาสมุนไพรที่มีความสำคัญ เทคโนโลยีการอบแห้งนั้นมีหลากหลาย ขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ใช้งาน โดยคำนึงถึงลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ ระยะเวลาการอบแห้ง คุณภาพของผลิตภัณฑ์ และพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งซึ่งถือว่ามีความสำคัญ เนื่องจากเป็นตัวแปรสำคัญด้านต้นทุนการผลิต การอบแห้งด้วยสุญญากาศเป็นกระบวนการลดความชื้นในขณะอบแห้ง เพื่อช่วยให้น้ำในเนื้อผลิตภัณฑ์ระเหยที่อุณหภูมิต่ำ ช่วยลดพลังงานความร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง (Jaya & Das, 2003) อย่างไรก็ตาม การอบแห้งด้วยสุญญากาศถึงแม้ว่าในผลิตภัณฑ์จะระเหยได้ที่อุณหภูมิต่ำ แต่ในทางปฏิบัติเพื่อลดระยะเวลาการอบแห้งก็ยังจำเป็นต้องใช้แหล่งผลิตความร้อนช่วย เช่นเดิม การนำรังสีอินฟราเรดมาเป็นแหล่งผลิตความร้อนให้กับ

เครื่องอบแห้งกำลังเป็นที่นิยม เนื่องจากรังสีอินฟราเรดสามารถแผ่ทะลุเข้าไปในเนื้อวัสดุ ส่งผลให้โมเลกุลของน้ำในเนื้อวัสดุสั่นและเกิดความร้อน ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิในเนื้อวัสดุสูงกว่าอุณหภูมิที่ผิว ส่งผลให้ผิวภายนอกของวัสดุอบแห้งไม่เหี่ยวแห้ง และยังคงสมบัติของผลิตภัณฑ์ไว้ใกล้เคียงกับวัตถุดิบที่นำมาอบแห้ง (Glouannec *et al*, 2002; Nourhene *et al*, 2009) นอกจากนี้ รังสีอินฟราเรดยังให้ความร้อนได้อย่างรวดเร็ว และกระจายความร้อนได้อย่างสม่ำเสมอ ติดตั้งง่าย ประหยัดพลังงานและลดระยะเวลาในการอบแห้ง (Vogt, 2007; Chua & Chou, 2003) จากข้อได้เปรียบดังกล่าว จึงมีแนวคิดที่จะนำรังสีอินฟราเรดมาเป็นแหล่งให้ความร้อนในการอบแห้งร่วมกับสุญญากาศ โดยศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ และสมการจลนพลศาสตร์การอบแห้งชั้นบาง สำหรับใช้อธิบายพฤติกรรมการอบแห้งในระบบดังกล่าว

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการทดลอง

อุปกรณ์การทดลอง

ภาพที่ 1 แสดงรายละเอียดชุดทดลอง ซึ่งประกอบด้วยห้องอบแห้งทรงกระบอก ขนาดระดับห้องปฏิบัติการ เส้นผ่านศูนย์กลาง 32 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร อุปกรณ์ให้ความร้อนของระบบติดตั้งอยู่บนของห้องอบแห้งโดยใช้หลอดรังสีอินฟราเรด ขนาด 500 วัตต์ ใช้หัววัดอุณหภูมิ ชนิด K และอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ แหล่งความร้อนและผลิตภัณฑ์มีระยะห่างเท่ากับ 15 เซนติเมตร ซึ่งน้ำหนักผลิตภัณฑ์ขณะอบแห้งโดยใช้โพลีเอทิลีน พร้อมชุดบันทึกข้อมูล ทำภาวะสุญญากาศใน



ภาพที่ 1 ชุดทดลอง

ห้องอบแห้งด้วยบั้งสุญญากาศ ต่อเข้ากับอุปกรณ์วัดและควบคุมความดัน วัดปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าโดยใช้ กิโลวัตต์-ชั่วโมงมิเตอร์

วิธีการทดลอง

ผลิตภัณฑ์ที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้คือ ชิง ซึ่งมีอายุประมาณ 10 เดือน โดยมีขั้นตอนการเตรียม คือ นำชิงมาล้างทำความสะอาด ปอกเปลือกให้ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2.5 เซนติเมตร และใช้เครื่องหั่นตามขวางให้ได้ความหนาประมาณ 0.2 เซนติเมตร หลังจากนั้นทำการอบแห้งที่ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 990 - 1020 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง อบจนกระทั่งน้ำหนักของชิงคงที่ โดยมีเงื่อนไขในการทดลอง คือ ความดันสัมบูรณ์ 5, 10 และ 15 กิโลปาสคาล และอุณหภูมิอบแห้งที่ 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส ในระหว่างทำการทดลองได้บันทึกข้อมูลการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก และอุณหภูมิอบแห้งทุกๆ 1 นาที

การวิเคราะห์ผล

งานวิจัยนี้ ได้วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลองตั้งแต่ช่วงความชื้นชิงเริ่มต้นประมาณ 990 - 1020 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง จนกระทั่งความชื้นสุดท้ายเหลือประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง โดยความชื้น (Moisture content, MC) ของผลิตภัณฑ์คำนวณจากสมการที่ (1)

$$MC = \frac{W_t - W_d}{W_d} \times 100\% \quad (1)$$

เมื่อ MC คือ ความชื้น (เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง)

W_t คือ น้ำหนักชิงที่เวลาใดๆ (กรัม)

W_d คือ น้ำหนักแห้งของชิง (กรัม)

การศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งของชิง ศึกษาในรูปของอัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio, MR) โดยคำนวณจากสมการที่ (2)

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_{in} - M_{eq}} \quad (2)$$

เมื่อ M_{in} คือ ความชื้นเริ่มต้น (เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง)

M_t คือ ความชื้นที่เวลาใดๆ (เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง)

M_{eq} คือ ความชื้นสมดุล (เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง)

การคำนวณค่าอัตราส่วนความชื้นในงานวิจัยนี้ เป็นการคำนวณค่าโดยประมาณ คือ ไม่คิดค่าความชื้นสมดุล โดยตั้งสมมติฐานว่า ความชื้นสมดุลมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความชื้นเริ่มต้น

ในส่วนของการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบอบแห้ง ได้กำหนดพารามิเตอร์เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการศึกษาเปรียบเทียบดังนี้

1) อัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR) คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นต่อหน่วยเวลา ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (3) (Kar & Gupta, 2003)

$$DR = \frac{M_0 - M_T}{T} \quad (3)$$

เมื่อ M_0 คือ ปริมาณความชื้นเริ่มต้น

(กรัม/น้ำ/กรัมมวลแห้ง)

M_T คือ ปริมาณความชื้นที่เวลา T

(กรัม/น้ำ/กรัมมวลแห้ง)

T คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (นาที)

2) ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาณพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งต่อปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุอบแห้ง โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4)

$$SEC = \frac{E_{infrared} + E_{vacuum}}{M_w} \quad (4)$$

เมื่อ $E_{infrared}$ คือ พลังงานที่ใช้กับหลอดอินฟราเรด (กิโลวัตต์-ชั่วโมง)

E_{vacuum} คือ พลังงานที่ใช้กับบั้งสุญญากาศ

(กิโลวัตต์-ชั่วโมง)

M_w คือ ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากเนื้อวัสดุ (กิโลกรัม)

การวิเคราะห์หาสมการอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมของการอบแห้งชิง ทำได้โดยนำค่าอัตราส่วนความชื้นที่เวลาใดๆ จากการทดลองมาเปรียบเทียบกับสมการอบแห้งชั้นบางที่ใช้สำหรับทำนายค่าความชื้น ซึ่งอยู่ในรูปสมการอบแห้งแบบกึ่งทฤษฎี (Semi-Theoretical Drying Equation) รูปแบบสมการพื้นฐานที่ใช้ทำนายการอบแห้งชั้นบางมีรายละเอียดดังแสดงไว้ในตารางที่ 1 ซึ่งการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสมการอบแห้งชั้นบางใช้เทคนิคการวิเคราะห์ความถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear regression) ซึ่งมีดัชนีบ่งชี้ความสามารถในการทำนายของสมการ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination, R^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square error, RMSE) โดยที่ RMSE มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (5)

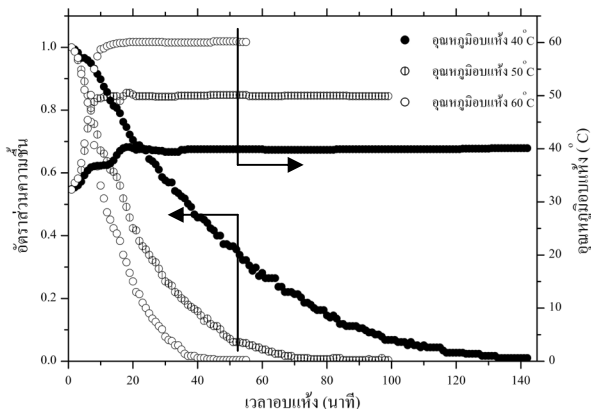
ตารางที่ 1 รูปแบบสมการการอบแห้งชั้นบาง

รูปแบบสมการ	ชื่อสมการ	อ้างอิง
MR = exp (-kt)	Newton	Lui, 1997
MR = exp (-kty)	Page	Sharma, 2001
MR = a exp (-kt)	Henderson and Pabis	Doymaz, 2004
MR = 1 + at + bt ²	Wang and Singh	Ozdemir, 1999
MR = a exp (-kt)+(1-a) exp (-kat)	Two term exponential	Ruiz, 2008
MR = exp (-(-kt)y)	Modified Page I	Diamante, 1993
MR = a exp (-kt)+c	Logarithmic	Togrul, 2002
MR = a exp (-kt)+(1-a) exp (-kbt)	Approximation of diffusion	Yaldiz, 2001
MR = a exp (-kt)+(1-a) exp (-gt)	Verma et al.	Verma, 1985
MR = a exp (-ktn)+bt	Midilli	Midilli, 2002
MR = a exp (-k1t)+b exp (-k2t)	Two term	Rahman, 1998
MR = a exp (-kt)+b exp (-gt)+c exp (-ht)	Modified Henderson and Pabis	Karathanos, 1999

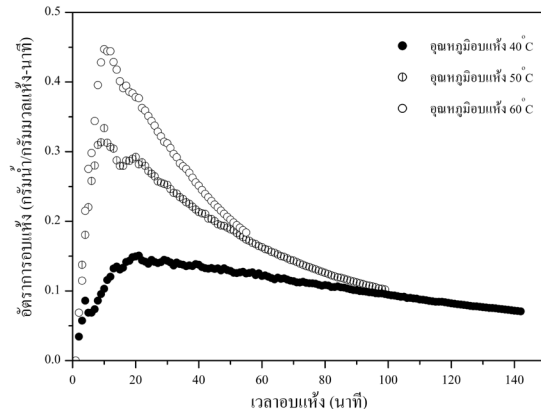
$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (MR_{\text{prediction},i} - MR_{\text{experiment},i})^2}{N} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

เมื่อ N คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด

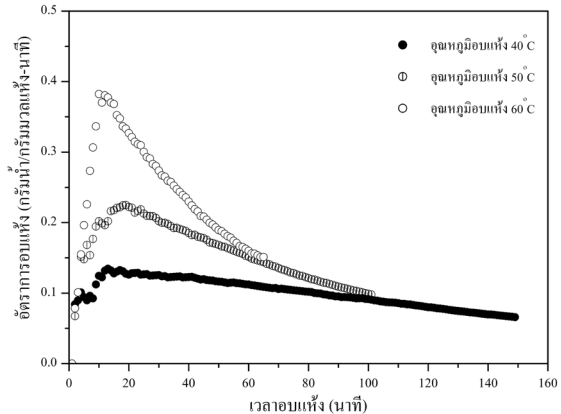
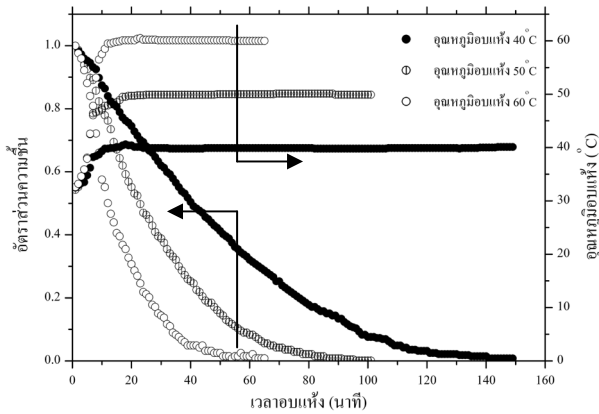
**ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง
ผลของอุณหภูมิอบแห้ง**



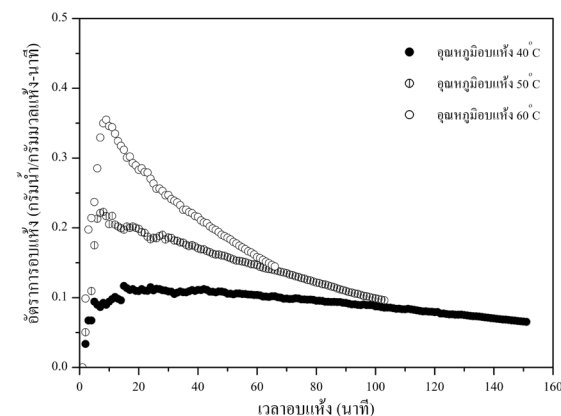
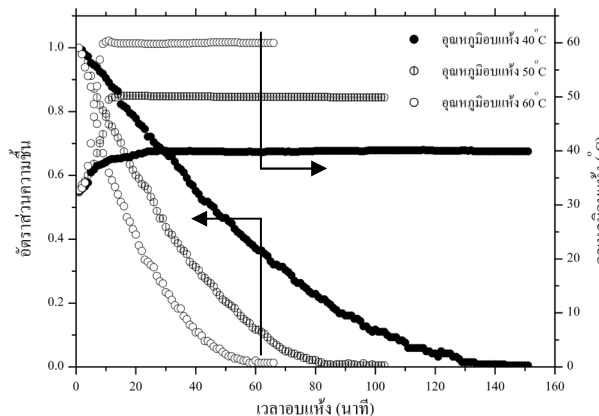
ภาพที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นและอัตราการอบแห้งกับเวลา ในการอบแห้งซึ่งที่ความดันสัมบูรณ์คงที่เท่ากับ 5 กิโลปาสคาล โดยเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขอุณหภูมิอบแห้ง จากการทดลองพบว่า อัตราส่วนความชื้นจะลดลงตามระยะเวลาอบแห้ง โดยช่วงแรกของการอบแห้งความชื้นจะลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากเป็นช่วงที่ผลิตภัณฑ์ยังมีความชื้นสูง ดังนั้นจึงเกิดการถ่ายเทความชื้นจากเนื้อผลิตภัณฑ์สู่ห้องอบแห้งอย่างรวดเร็ว และถูกดูดออกจากห้องอบแห้งโดยปั๊มสุญญากาศ หลังจากนั้นความชื้นจะค่อยๆ ลดลง จนคงที่ในที่สุด



ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นและอัตราการอบแห้งกับเวลา ที่ความดันสัมบูรณ์ 5 กิโลปาสคาล



ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นและอัตราการอบแห้งกับเวลา ที่ความดันสัมบูรณ์ 10 กิโลปาสคาล



ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นและอัตราการอบแห้งกับเวลา ที่ความดันสัมบูรณ์ 15 กิโลปาสคาล

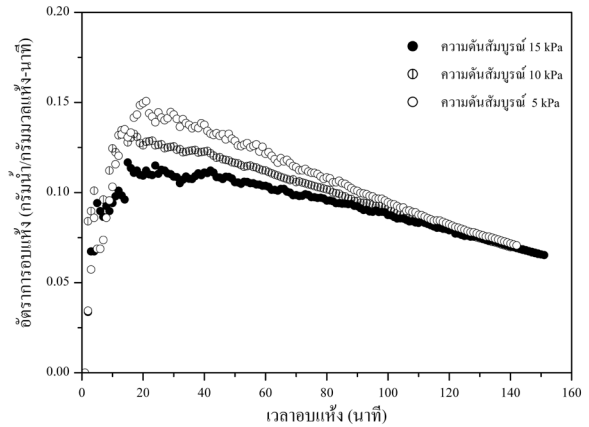
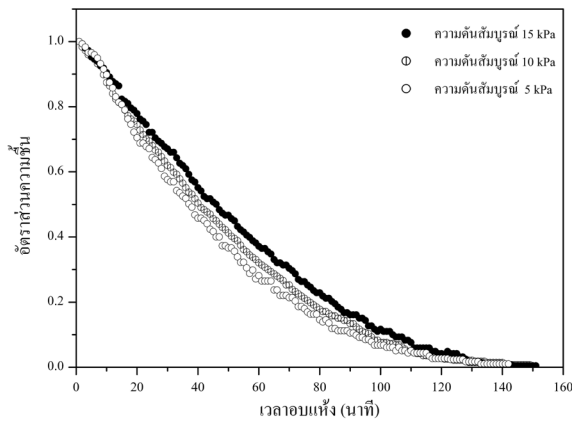
เมื่อพิจารณาความแตกต่างของอุณหภูมิอบแห้ง พบว่าที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีความชื้นลดลงเร็วที่สุด ส่งผลให้ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งน้อยที่สุด และจากการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่า ที่อุณหภูมิอบแห้ง 60 องศาเซลเซียส มีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และ 40 องศาเซลเซียส โดยเฉลี่ยประมาณ 44 และ 61 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ภาพที่ 3-4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นและอัตราการอบแห้งกับเวลา ในการอบแห้งซึ่งที่ความดันสัมบูรณ์คงที่เท่ากับ 10 และ 15 กิโลปาสคาล ตามลำดับ โดยเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขอุณหภูมิอบแห้ง จากการทดลองพบว่า การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความชื้นและอัตราการอบแห้ง มีแนวโน้มเหมือนกันกับการอบแห้งซึ่งที่ความดัน 5 กิโลปาสคาล กล่าวคือ ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความชื้นจะลดลงเร็วที่สุด ส่งผลให้ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งน้อยที่สุด และให้อัตราการอบแห้งสูงที่สุดด้วย

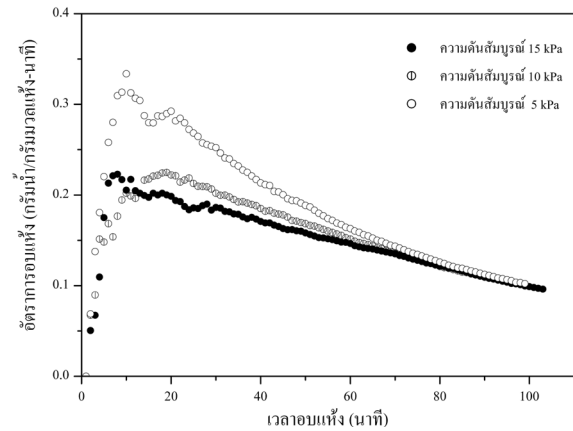
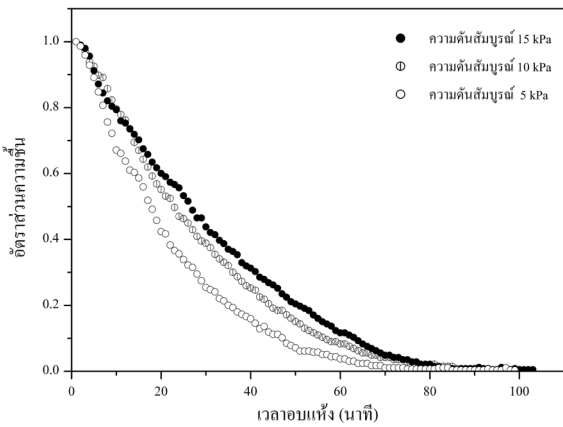
จากผลการทดลองข้างต้นสรุปได้ว่า อุณหภูมิอบแห้งมีผลต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งซึ่ง โดยที่ภาวะความดันเดียวกัน อัตราการอบแห้งจะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิอบแห้ง

ผลของความดันสัมบูรณ์

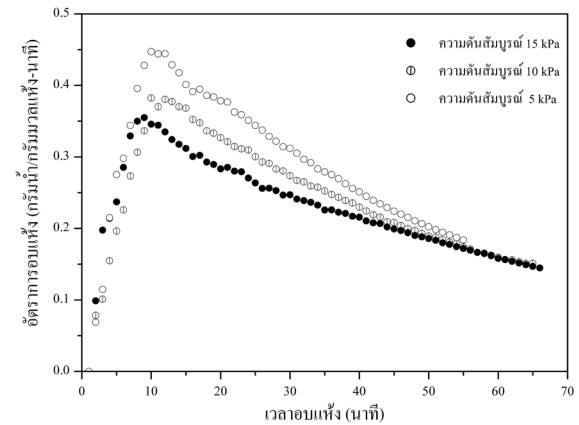
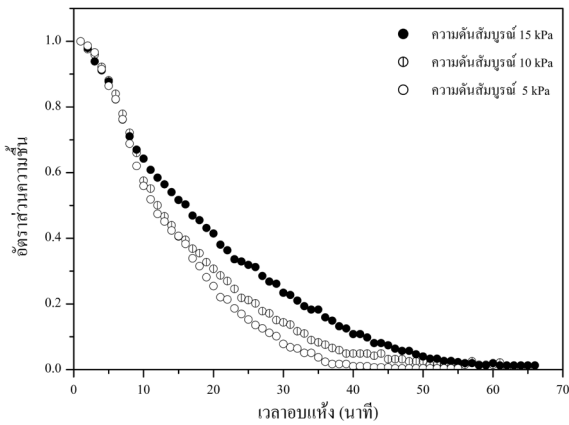
ภาพที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นและอัตราการอบแห้งกับเวลา ในการอบแห้งซึ่งที่อุณหภูมิอบแห้งเท่ากับ 40 องศาเซลเซียส โดยเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขภาวะความดันสัมบูรณ์ ผลการทดลองพบว่า อัตราส่วนความชื้นจะลดลงตามระยะเวลาอบแห้ง กล่าวคือ ที่เงื่อนไขความดันสัมบูรณ์ 5 กิโลปาสคาล มีความชันของเส้นกราฟมากที่สุด นั่นคืออัตราส่วนความชื้นลดลงเร็วที่สุด ในขณะที่ความดันสัมบูรณ์ 15 กิโลปาสคาล มีอัตราส่วนความชื้นลดลงช้าที่สุด ซึ่งเป็นผลมาจากภาวะความดันสัมบูรณ์ มีอิทธิพลต่อจุดเดือดของน้ำ โดยที่ความดันสัมบูรณ์ 5, 10 และ 15 กิโลปาสคาล มีจุดเดือดที่ 32.88, 45.81 และ



ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นและอัตราการอบแห้งกับเวลา ที่อุณหภูมิตั้ง 40 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นและอัตราการอบแห้งกับเวลา ที่อุณหภูมิตั้ง 50 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นและอัตราการอบแห้งกับเวลา ที่อุณหภูมิตั้ง 60 องศาเซลเซียส

53.97 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของความดันสุญญากาศ พบว่า ที่ภาวะความดันสัมบูรณ์ 5 กิโลปาสคาล มีอัตราการอบแห้งมากกว่าที่ความดันสัมบูรณ์ 10 และ 15 กิโลปาสคาล โดยเฉลี่ยประมาณ 7 และ 14 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยทั้ง 3 เงื่อนไขมีอัตราการอบแห้งสูงสุดหลังจากเริ่มอบแห้งประมาณ 20 นาที และค่อยๆ ลดลง โดยไม่พบช่วงอัตราการอบแห้งคงที่

ภาพที่ 6-7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นและอัตราการอบแห้งกับเวลา ที่อุณหภูมิอบแห้ง 50 และ 60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จากภาพพบว่า การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความชื้นและอัตราการอบแห้ง มีแนวโน้มลักษณะเช่นเดียวกันกับการอบแห้งที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส แต่มีอัตราการอบแห้งสูงสุดหลังจากอบแห้งผ่านไปประมาณ 10 นาที หลังจากนั้นจะลดลง โดยไม่พบช่วงอัตราการอบแห้งคงที่เมื่อเปรียบเทียบเวลาการอบแห้ง พบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ใช้เวลาน้อยกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 40 และ 50 องศาเซลเซียส ผลการทดลองข้างต้นสรุปได้ว่า ความดันสุญญากาศมีอิทธิพลต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งซึ่ง โดยที่อุณหภูมิเดียวกัน อัตราการอบแห้งจะเพิ่มขึ้นเมื่อลดความดันสัมบูรณ์

ความสัมพันธ์พลังงานจำเพาะ

ตารางที่ 2 แสดงความสัมพันธ์พลังงานจำเพาะของการอบแห้งซึ่งด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดจากข้อมูลพบว่า ที่เงื่อนไขความดันเดียวกัน ความสัมพันธ์พลังงานจำเพาะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิอบแห้ง โดยการอบแห้งที่อุณหภูมิ

60 องศาเซลเซียส มีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะน้อยกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 และ 40 องศาเซลเซียส โดยเฉลี่ยประมาณ 33 และ 53 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งการเพิ่มอุณหภูมิช่วยเพิ่มความสามารถในการระเหยของน้ำในผลิตภัณฑ์ให้มากขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาในการอบแห้งน้อยลง ทำให้ใช้พลังงานในส่วนของบ่มสุญญากาศน้อยลง และเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิอบแห้งเดียวกัน ยังพบอีกว่า ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งที่ความดัน 5 กิโลปาสคาล มีค่าน้อยกว่าการอบแห้งที่ความดัน 10 และ 15 กิโลปาสคาล โดยเฉลี่ยประมาณ 7 และ 18 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากที่ภาวะความดันต่ำ น้ำในผลิตภัณฑ์สามารถระเหยได้ง่ายและรวดเร็วขึ้น ทำให้ใช้เวลาอบแห้งน้อยลง ซึ่งสรุปได้ว่า การเปลี่ยนภาวะความดันสุญญากาศและอุณหภูมิอบแห้ง ส่งผลต่อความสัมพันธ์พลังงานจำเพาะ โดยความสัมพันธ์พลังงานจำเพาะจะลดลง เมื่อลดภาวะความดันสัมบูรณ์หรือเพิ่มอุณหภูมิอบแห้ง

สมการอบแห้งชั้นบาง

การวิเคราะห์หาสมการอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมสำหรับทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งซึ่ง ดำเนินการโดยนำค่าอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์เปรียบเทียบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์หรือค่าคงที่ของสมการอบแห้งชั้นบางที่สรุปไว้ในตารางที่ 1 ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาถึงอิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้ง และความดัน ดังนั้น a, b, c, g, h, k, k_1 , k_2 n, หรือ y ซึ่งเดิมเป็นเพียงค่าคงที่ จึงได้ถูกกำหนดให้เป็นฟังก์ชัน

ตารางที่ 2 ความสัมพันธ์พลังงานจำเพาะของการอบแห้งซึ่งด้วยสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรด

เงื่อนไขการอบแห้ง		ปริมาณน้ำระเหย (kg)	เวลาอบแห้ง (min)	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (kWh)	ความสัมพันธ์พลังงานจำเพาะ (kWh/kg)
ความดันสัมบูรณ์ (kPa)	อุณหภูมิ (°C)				
5	40	0.0452	142	1.01	22.35
	-	0.0455	99	0.66	14.50
	-	0.0455	55	0.46	10.11
10	40	0.0452	149	1.07	23.67
	-	0.0455	101	0.71	15.60
	-	0.0452	65	0.50	11.06
15	40	0.0454	151	1.14	25.13
	-	0.0455	103	0.93	20.44
	-	0.0449	66	0.54	12.03

ตารางที่ 3 ค่าคงที่ของสมการอเนกชั้นบาง

ชื่อสมการ	พารามิเตอร์	x_0	x_1	x_2	x_3	R_2	RMSE
Newton	k	-0.08141	0.00261	0.00286	-0.00008	0.97067	0.05120
Page	k	-0.02026	0.00070	0.00067	-0.00002	0.99478	0.02160
	y	0.90886	0.00935	0.01225	-0.00029		
Henderson and Pabis	a	0.86889	0.00616	0.02315	-0.00054	0.98536	0.03610
	k	-0.10140	0.00318	0.00407	-0.00011		
Wang and Singh	a	0.03169	-0.00123	-0.00077	0.00003	0.97658	0.04570
	b	-0.00048	0.00001	0.00001	0.00000		
Two term exponential	a	-0.00002	0.00000	0.00000	0.00000	0.97129	0.05060
	k	-446.874	21.5198	4.69137	-0.34783		
Modified Page I	k	0.14782	0.00021	-0.01297	0.00023	0.97153	0.05040
	y	-0.51958	0.01658	0.03357	-0.00078		
Logarithmic	a	0.92691	0.00472	0.02977	-0.00058	0.99315	0.02470
	k	-0.08605	0.00273	0.00374	-0.00011		
	c	-0.02862	0.00011	-0.00862	0.00006		
Approximation of diffusion	a	2.93318	0.00906	0.03379	-0.00012	0.98881	0.03160
	b	0.82070	0.00017	-0.00572	0.00005		
	k	-0.04638	0.00152	0.00182	-0.00005		
Verma et al.	a	4.97368	-0.23305	-0.49069	0.00915	0.99115	0.02810
	g	-0.05279	0.00165	0.00168	-0.00005		
	k	-0.05243	0.00160	0.00169	-0.00005		
Midilli	a	0.86368	0.00352	0.01932	-0.00043	0.99720	0.01580
	b	-0.00034	0.00001	-0.00012	0.00000		
	k	-0.03193	0.00101	0.00187	-0.00004		
	n	0.98938	0.00665	-0.01972	0.00025		
Two term	a	-247.751	5.96819	8.18974	-0.19893	0.99650	0.01770
	b	248.822	-5.96811	-8.18257	0.19872		
	k_1	-0.26429	0.00697	0.00678	-0.00018		
	k_2	-0.26447	0.00699	0.00686	-0.00018		
Modified Henderson and Pabis	a	-17.2740	0.25480	2.96650	-0.05111	0.99783	0.01390
	b	2.23530	-0.00510	-1.20980	0.01702		
	c	15.9074	-0.24400	-1.75340	0.03390		
	g	-0.05450	0.00169	0.00050	-0.00003		
	h	-0.01713	0.00126	-0.00602	0.00008		
	k	0.01011	0.00048	-0.00522	0.00009		

กับอุณหภูมิอบแห้ง และความดัน โดยสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$K = x_0 + x_1 T + x_2 P + x_3 TP \quad (6)$$

- เมื่อ K คือ a, b, c, g, h, k, k_1 , k_2 , n, หรือ y
 T คือ อุณหภูมิอบแห้ง (องศาเซลเซียส)
 P คือ ความดันสัมบูรณ์ (กิโลปาสคาล)
 x_i คือ ค่าคงที่ของสมการที่ (6)

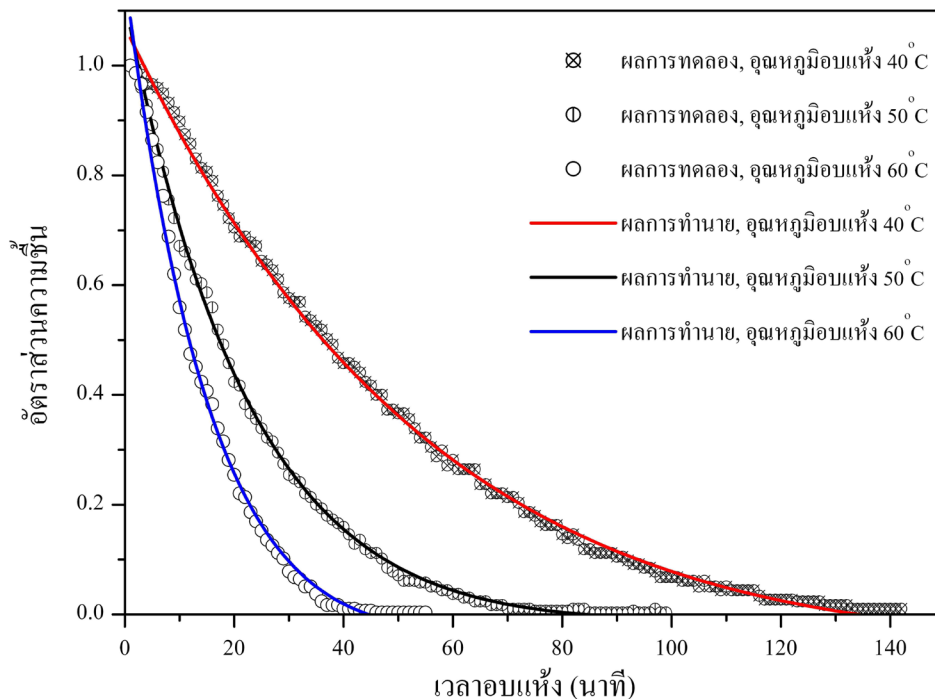
ตารางที่ 3 แสดงค่าคงที่ของสมการอบแห้งชั้นบาง, R_2 และ RMSE จากกรวิธีวิเคราะห์สมการทั้ง 12 สมการ พบว่าสมการ Modified Henderson and Pabis สามารถทำนายผลการอบแห้งซึ่งด้วยสัญญาณกร่วมกับอินฟราเรดได้ดีที่สุด โดยให้ค่า R^2 (0.99783) มากที่สุด และค่า RMSE (0.01390) น้อยที่สุด ซึ่งเมื่อนำค่าที่ได้จากการคำนวณตามรูปแบบของสมการ Modified Henderson and Pabis มาเปรียบเทียบกับผลการทดลอง พบว่ามีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี ดังข้อมูลซึ่งได้แสดงในภาพที่ 8-10

สรุปผลการทดลอง

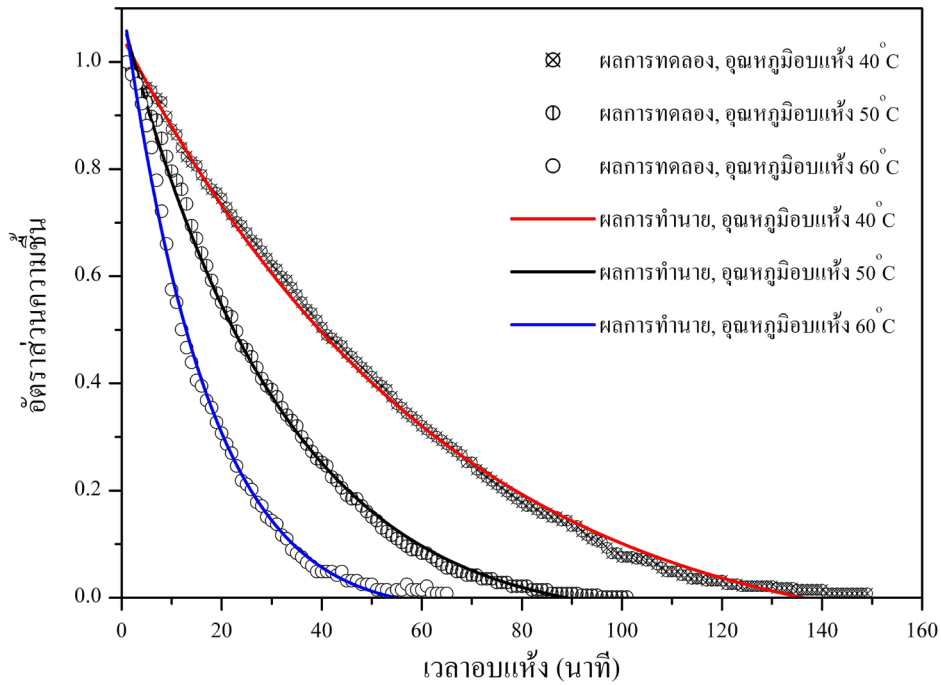
งานวิจัยนี้ ได้ศึกษาการอบแห้งซึ่งด้วยเทคนิคสัญญาณกร่วมกับอินฟราเรด ซึ่งผลจากการศึกษาพบว่า อุณหภูมิอบแห้ง และภาวะความดันสัญญาณกรมีผลต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งซึ่ง โดยเมื่อลดความดันสัมบูรณ์หรือเพิ่มอุณหภูมิอบแห้ง จะทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งลดลง นอกจากนี้พบว่าสมการของ Modified Henderson and Pabis สามารถทำนายผลการอบแห้งซึ่งด้วยเทคนิคสัญญาณกร่วมกับอินฟราเรดได้ดีที่สุด โดยให้ค่า R^2 (0.99783) มากที่สุด และค่า RMSE (0.01390) น้อยที่สุด

กิตติกรรมประกาศ

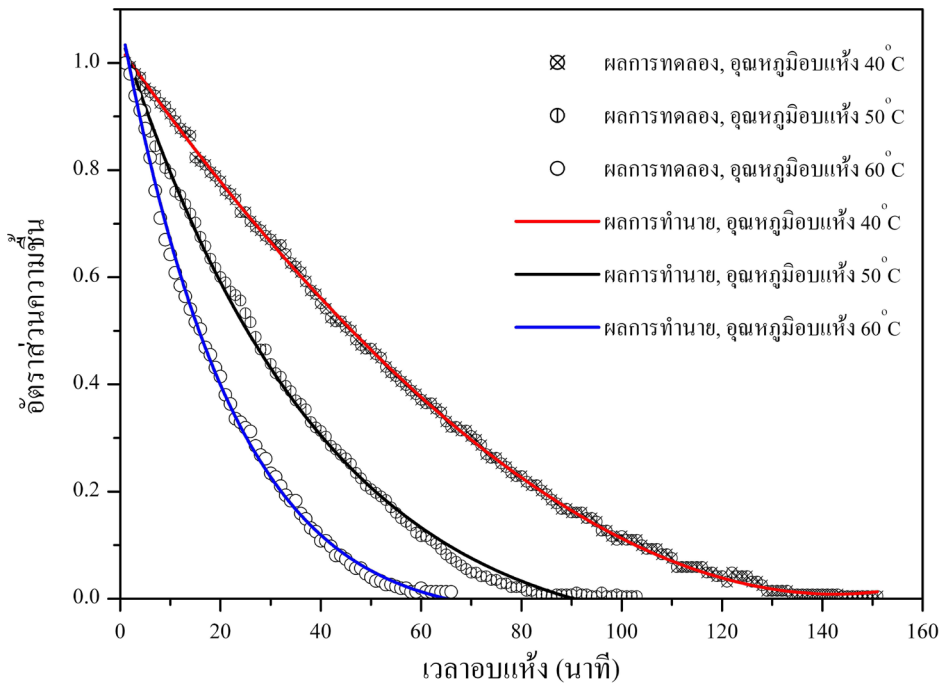
งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี



ภาพที่ 8 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Modified Henderson and Pabis ที่ความดัน 5 กิโลปาสคาล



ภาพที่ 9 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Modified Henderson and Pabis ที่ความดัน 10 กิโลปาสกาล



ภาพที่ 10 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Modified Henderson and Pabis ที่ความดัน 15 กิโลปาสกาล

- Chua, K.J., & Chou, S.K. (2003). Low-cost drying methods for developing countries. *Trends in Food Science & Technology*, 14, 519-528.
- Diamante, L.M., & Munro, P.A. (1993). Mathematical modeling of the thin layer solar drying of sweet potato slices. *Solar Energy*, 51, 271-276.
- Doymaz, I. (2004). Convective air drying characteristics of thin layer carrots. *Journal of Food Engineering*, 61, 359-364.
- Glouannec, P., Lecharpentier, D., & Noel, H. (2002). Experimental survey on the combination of radiating infrared and microwave sources for the drying of porous material. *Applied Thermal Engineering*, 22, 1689-1703.
- Jaya, S., & Das, H. (2003). A vacuum drying model for mango pulp. *Drying Technology*, 21(7), 1215-1234.
- Kar, A., & Gupta, D.K. (2003). Air drying of osmoted button mushroom. *Journal of Food Science and Technology*, 40(1), 23-27.
- Karathanos, V.T. (1999). Determination of water content of dried fruits by drying kinetics. *Journal of Food Engineering*, 39, 337-344.
- Lui, Q., & Bakker-Arkema, F.W. (1997). Stochastic modeling of grain drying, part 2; model development. *Journal of Agricultural Research*, 66, 275-280.
- Midilli, A., Kucuk, H., & Yapar, Z. (2002). A new model for single-layer drying. *Drying Technology*, 20(7), 1503-1513.
- Nourhene, B., Neila, B., Imen B.S., & Nabil, K. (2009). Comparison on the total phenol contents and the color of fresh and infrared dried olive leaves. *Industrial Crops and Product*, 29, 412-419.
- Ozdemir, M., & Devres, Y.O. (1999). The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting. *Journal of Food Engineering*, 42, 225-233.
- Rahman, M.S., & Perera, C.O. (1998). Desorption isotherm and heat pump drying kinetics of peas. *Food Research International*, 30, 485-491.
- Ruiz, C.A., Rojas, S., & Lopez, R.L. (2008). Mathematical modeling of thin-layer infrared drying of wet olive husk. *Chemical Engineering and Processing*, 47, 1810-1818.
- Sharma, G.P., & Prasad, S. (2001). Drying of garlic cloves by microwave-hot air combination. *Journal of Food Engineering*, 50, 99-105.
- Togrul, I.T., & Pehlivan, D. (2002). Mathematical modeling of soar drying of apricots in thin layers. *Journal of Food Engineering*, 55, 209-216.
- Verma, L. (1985). Drying effects of drying air parameters on rice drying models. *Transaction of the ASAE*, 85, 296-301.
- Vogt, M. (2007). Infrared drying lowers energy costs and drying times. *Plastics, Additives and Compounding*, 9, 58-61.
- Yaldiz, O., Erketing, C., & Uzum, H.I. (2001). Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes. *Energy*, 26, 457-564.