จลนพลศาสตร์และแบบจำลองการอบแห้งขมิ้นชันด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรด

Kinetics and Modeling of Turmeric Using Hot Air and Infrared Drying

ณัฐพล กระจ่าง[1] และ ณรงค์ อึ้งกิมบ้วน[2,*]

Nattapon Krachang[1] and Narong Uengkimbuan[2,*]

[1,2]*ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา*

[1,2]*Physics Department, Faculty of Science, Burapha University*

Received : 29 June 2016

Accepted : 23 November 2016

Published online : 30 November 2016

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งขมิ้นชัน และหาแบบจำลองการอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมสำหรับทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งขมิ้นชันด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรด โดยปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิของลมร้อนเท่ากับ 40 50 และ 60ºC และกำลังของรังสีอินฟราเรดเท่ากับ 300 400 และ 500 W ความเร็วของลมร้อนเท่ากับ 0.5 m/s และความชื้นเริ่มต้นของขมิ้นชันอยู่ในช่วง 400-600 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง และจากข้อมูลการทดลองใช้แบบจำลองการอบแห้งจำนวน 5 แบบจำลอง ได้แก่ แบบจำลอง Newton, Page, Henderson and Pabis, Logarithm และแบบจำลอง Two-term เพื่อหาแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับทำนายการอบแห้งขมิ้นชัน จากผลการทดลอง พบว่าอัตราการอบแห้งจะแปรผันกับอุณหภูมิลมร้อนและกำลังของรังสีอินฟราเรด และแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งขมิ้นชันด้วยลมร้อน และกำลังของรังสีอินฟราเรด ได้แก่ แบบจำลองการอบแห้งแบบ Two -term และแบบจำลองการอบแห้งแบบ Page ตามลำดับ

คำสำคัญ : การอบแห้ง ขมิ้นชัน รังสีอินฟราเรด ลมร้อน แบบจำลอง

Abstract

The objectives of this research were to study the drying kinetics and to find out the suitable thin layer model for predicting the evolution of moisture transfer of turmeric using hot air and infrared radiation. The drying parameters were hot air temperature at 40, 50 and 60°C and infrared power at 300, 400 and 500 W. The air velocity was fixed at 0.5 m/s. The initial moisture contents of turmeric were between 400 and 600% dry-basis. Five drying models such as Newton, Page, Henderson and Pabis, Logarithmic and Two–term were fitted to the experimental data. The experimental results showed that drying rate was proportional to drying air temperature and infrared power. The best drying models for turmeric using hot air and infrared power were Two–term model and Page model, respectively.

Keywords : drying, turmeric, infrared radiation, hot air, modeling

***Corresponding author. E-mail** : narong@buu.ac.th

บทนำ

ขมิ้นชันมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Curcuma longa Linn* และมีชื่อสามัญว่า Turmeric จัดเป็นพืชล้มลุกในวงศ์ขิง มีถิ่นกำเนิดในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ มีเนื้อในเหง้าสีเหลืองหรือสีเหลืองส้ม มีกลิ่นหอมเฉพาะตัว มีฤทธิ์ทางเภสัชวิทยาที่มีคุณประโยชน์อย่างมาก ขมิ้นชันเป็นพืชสมุนไพรที่มีความสำคัญและใช้ประโยชน์อย่างมากในอุตสาหกรรมอาหาร สามารถสร้างรายได้ให้กับผู้ประกอบการ เช่น ยารักษาโรค ลูกประคบ สมุนไพร ผลิตภัณฑ์ดูแลร่างกายรวมไปถึงผงขัดผิวที่ทำมาจากขมิ้นชัน การอบแห้งเป็นกระบวนการแปรรูปอาหารและวัสดุชีวภาพที่มีความสำคัญมากที่สุดกระบวนการหนึ่งในการรักษาคุณภาพ ลดความสูญเสีย และยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์เนื่องจากความชื้นมีค่าต่ำในระดับที่สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดการเน่าเสียในอาหาร และยังช่วยยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ที่ส่งผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพในอาหาร (Assawarachan *et al*., 2013) ในปัจจุบันการแปรรูปทางการเกษตรเป็นที่ต้องการอย่างมากทั้งภายในและต่างประเทศ แต่ปัญหาที่เกษตรกรและผู้ประกอบการต้องประสบคือ ผลิตภัณฑ์แปรรูปที่ได้ไม่ตรงตามมาตรฐานอุตสาหกรรม เนื่องจากกระบวนการผลิตนิยมใช้วิธีการตากแดดในที่โล่งโดยอาศัยการพาความร้อนตามธรรมชาติ ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์แปรรูปที่ได้มีปัญหาเกี่ยวกับฝุ่นละอองและการรบกวนจากแมลงต่าง ๆ ส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ไม่ได้คุณภาพ ดังนั้นกระบวนการลดความชื้นด้วยวิธีการอบแห้งของผลิตภัณฑ์สามารถนำเทคโนโลยีการอบแห้งด้วยการใช้พลังงานจากแหล่งต่าง ๆ เช่น คลื่นไมโครเวฟ รังสีอินฟราเรด และพลังงานลมร้อน (Soponronnarit, 1997) เพื่อทำให้ผลิตภัณฑ์อบแห้งที่ได้มีคุณภาพตามมาตรฐานการส่งออกและเป็นการเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์อีกด้วย ซึ่งการอบแห้งในแต่ละวิธีจะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นเร็วช้าแตกต่างกัน โดยแต่ละวิธีก็มีข้อดีที่แตกต่างกันออกไป ยกตัวอย่างเช่น การอบแห้งด้วยลมร้อนเป็นวิธีหนึ่งที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก เนื่องจากเป็นระบบอบแห้งที่ไม่ยุ่งยาก และมีต้นทุนสำหรับการสร้างเครื่องอบแห้งที่ค่อนข้างต่ำ และสำหรับแหล่งพลังงานความร้อนจากรังสีอินฟราเรด เป็นการแผ่รังสีในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามาตกกระทบลงบนผิวของวัสดุ โดยที่พลังงานจากรังสีอินฟราเรดจะทะลุทะลวงเข้าไปในเนื้อวัสดุ ทำให้โมเลกุลของน้ำภายในวัสดุสั่น และเกิดความร้อนขึ้นภายในเนื้อวัสดุ จึงทำให้เกิดการแพร่ความชื้นไปยังบริเวณผิวของวัสดุ ซึ่งจุดเด่นของรังสีอินฟราเรดตรงนี้จะทำให้วัสดุอบแห้งมีคุณภาพที่ดี และยังทำให้อัตราการอบแห้งมีค่าสูงขึ้น ทำให้ลดระยะเวลาและพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองอบแห้งขมิ้นชัน โดยเลือกใช้พลังงาน 2 แบบ คือ การอบแห้งด้วยลมร้อนและการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดโดยทำการอบแห้งแบบขั้นตอนเดียว เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งขมิ้นชันและหาแบบจำลองการอบแห้งชั้นบางแบบเอมพิริคัลที่เหมาะสมสำหรับทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้ง

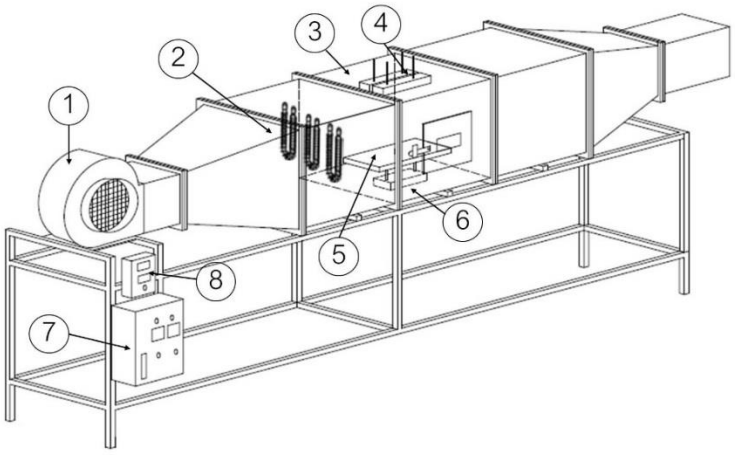
วิธีดำเนินการวิจัย

วัสดุ

ผลิตภัณฑ์ที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้คือ ขมิ้นชัน โดยใช้เครื่องหั่นเป็นแผ่นบางขนาดประมาณ (กว้าง×ยาว) 1.0×3.0 cm^2 ที่ระดับความหนา 2.0 mm ในแต่ละการทดลองจะใช้ตัวอย่างขมิ้นชันในการอบแห้งประมาณ 50-60 กรัม ความชื้นเริ่มต้นของขมิ้นชันมีค่าระหว่าง 400-600 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง

อุปกรณ์

เครื่องอบแห้งที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้เป็นเครื่องอบแห้งระดับห้องปฏิบัติการที่สร้างขึ้นมาโดยมีแหล่งพลังงานความร้อน 2 แหล่ง คือ ลมร้อนจากขดลวดความร้อน และรังสีอินฟราเรดเป็นแหล่งพลังงาน หรือใช้แบบพลังงานความร้อนร่วมลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด แสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งประกอบด้วยห้องอบแห้ง (Drying chamber) ขนาด 40×40×40 cm^3 หุ้มด้วยฉนวนใยแก้วหนา 7.5 cm ภายในห้องอบแห้งมีอุปกรณ์ให้ความร้อนติดตั้งอยู่ด้านบนของห้องอบแห้งโดยใช้แท่งรังสีอินฟราเรด (Infrared heaters) ขนาด 1,000 W จำนวน 2 แท่ง พร้อมชุดควบคุมกำลังไฟฟ้า (Regulator) ที่ป้อนเข้าสู่แท่งอินฟราเรด ระยะห่างระหว่างแท่งรังสีอินฟราเรดและผลิตภัณฑ์ประมาณ 10 cm และในส่วนของการทดลองลมร้อนจะใช้ขดลวดความร้อน (Heaters) ขนาด 1,500 W จำนวน 3 ตัว ควบคุมอุณหภูมิด้วยหน่วยควบคุมอุณหภูมิชนิด PID (Controller) ซึ่งมีสายเทอร์โมคัปเปิลชนิด K เป็นตัวเซนเซอร์อุณหภูมิ พัดลมแรงเหวี่ยงใบพัดโค้งหน้าขับด้วยมอเตอร์ (Blower) ขนาด 0.5 hp ชั่งน้ำหนักผลิตภัณฑ์ขณะอบแห้งโดยใช้เซนเซอร์น้ำหนัก (Load cell) พร้อมอุปกรณ์อ่านค่าน้ำหนัก



ภาพที่ 1 รายละเอียดและส่วนประกอบเครื่องอบแห้งลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดระดับห้องปฏิบัติการ
(1: Blower, 2: Heaters, 3: Drying chamber, 4: Infrared heaters, 5: Tray, 6: Load cell
7: Controller and 8: Regulator)

วิธีการทดลอง

การอบแห้งขมิ้นชันทำการทดลองอบแห้ง โดยมีเงื่อนไขการทดลองดังนี้ การอบแห้งขมิ้นชันด้วยลมร้อนโดยใช้อุณหภูมิลมร้อน 40 50 และ 60ºC และการอบแห้งขมิ้นชันด้วยรังสีอินฟราเรด โดยใช้กำลังของรังสีอินฟราเรด 300 400 และ 500 W ทำการเก็บข้อมูลการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของขมิ้นชันในระหว่างการอบแห้งโดยเก็บข้อมูลทุก ๆ 5 นาที ในครึ่งชั่วโมงแรก หลังจากนั้นเก็บข้อมูลทุก ๆ 15 นาที จนน้ำหนักของขมิ้นชันไม่เปลี่ยนแปลง ในการทดลองการอบแห้งขมิ้นชันแต่ละเงื่อนไขการทดลองจะทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง การหาความชื้นของขมิ้นชันจะใช้การอบแห้งด้วยตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 103ºC เป็นเวลา 72 ชั่วโมง AOAC (AOAC, 1995)

ในงานวิจัยนี้ทำการทดลองอบแห้งขมิ้นชันที่ความชื้นเริ่มต้นอยู่ในช่วง 400-600 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง โดยที่ความชื้นของขมิ้นชันสามารถคำนวณจากสมการที่ (1)

$$M_d = \frac{w - d}{d} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ M_d คือ ความชื้นมาตรฐานแห้งมีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง (%dry-basis, %d.b.)

w คือ น้ำหนักของวัสดุมีหน่วยเป็น kg

d คือ น้ำหนักแห้งของวัสดุ (ไม่มีความชื้น) มีหน่วยเป็น kg

การวิเคราะห์จลนพลศาสตร์การอบแห้งขมิ้นชัน จะอยู่ในรูปของอัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio, MR) สามารถคำนวณจากสมการที่ (2)

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

เมื่อ M_t คือ ความชื้นที่เวลาใด ๆ มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง (%dry-basis, %d.b.)

M_{in} คือ ความชื้นเริ่มต้นมีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง (%dry-basis, %d.b.)

M_{eq} คือ ความชื้นสมดุลมีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง (%dry-basis, %d.b.)

สำหรับการคำนวณค่าอัตราส่วนความชื้นในงานวิจัยนี้ โดยปกติแล้วค่าความชื้นสมดุลจะมีค่าน้อยมาก ๆ เมื่อเทียบกับค่าความชื้นเริ่มต้น ดังนั้นการหาค่าอัตราส่วนความชื้น (MR) สามารถคำนวณจากสมการที่ (3)

$$MR = \frac{M_t}{M_{in}} \quad (3)$$

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

สำหรับงานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองการอบแห้งแบบเอมพิริคัลเพื่อทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของขมิ้นชันที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรด โดยมีรูปแบบสมการดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้งชั้นบางแบบเอมพิริคัล (Qilong *et al.*, 2013)

No.	Name of Model	Model Equation
1	Newton	$MR = \exp(-kt)$
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$
3	Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$
4	Logarithmic	$MR = a \exp(-kt)+c$
5	Two - term	$MR = a \exp(-k_0t)+b \exp(-k_1t)$

สำหรับขั้นตอนการวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ดีที่สุด ทำได้โดยการนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ความถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear regression) เพื่อหาสมการอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมที่สุด โดยจะพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square error, RMSE) ซึ่งแบบจำลองที่ดีจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่สูงสุด และค่า RMSE น้อยที่สุด โดยที่ R^2 และ RMSE มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (4) และ (5)

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N} (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^{N} (\overline{MR}_{pre} - MR_{pre,i})^2} \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{N}} \quad (5)$$

เมื่อ $MR_{exp,i}$ คือ อัตราส่วนความชื้นจากการทดลอง

$MR_{pre,i}$ คือ อัตราส่วนความชื้นจากการทำนาย

$\overline{MR}_{pre,i}$ คือ อัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยจากการทำนาย

N คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด

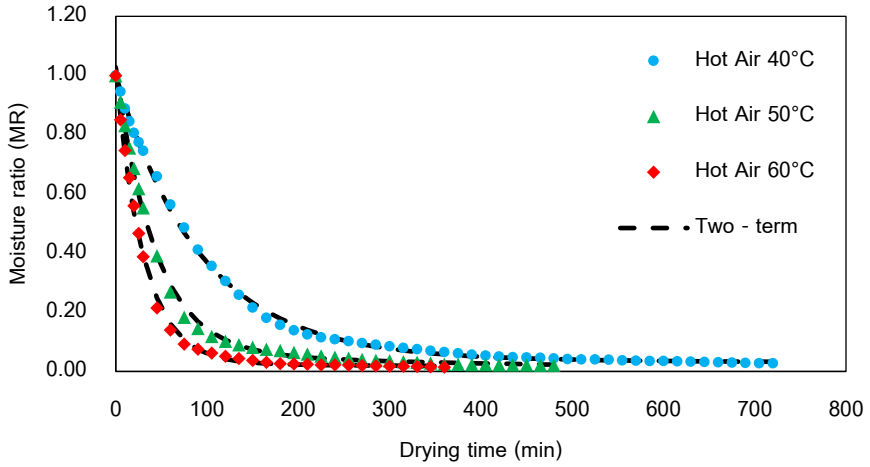
ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

ในการวิเคราะห์ผลการทดลองการอบแห้งขมิ้นชันด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรด เพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิลมร้อนและกำลังของอินฟราเรดที่มีต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งและแบบจำลองการอบแห้งชั้นบางแบบเอมพิริคัลที่เหมาะสม โดยมีรายละเอียดผลการศึกษาดังนี้

จลนพลศาสตร์การอบแห้ง

1. อิทธิพลของอุณหภูมิลมร้อนต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้ง

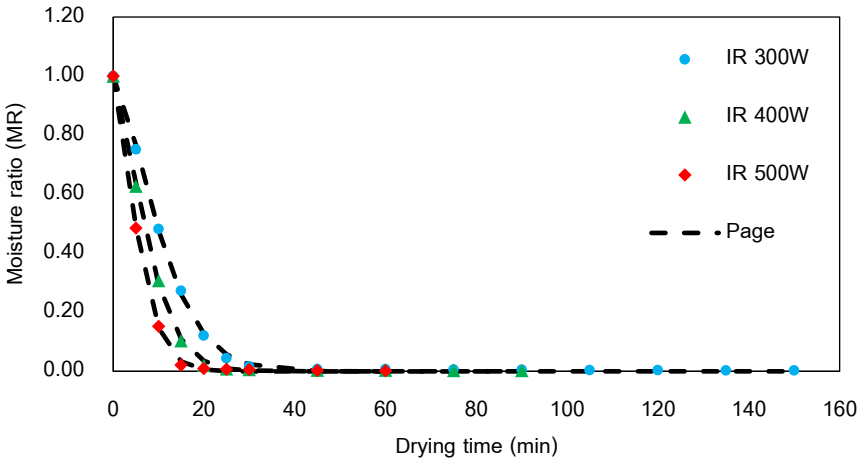
ผลของอุณหภูมิลมร้อนที่มีต่อการลดลงของความชื้นขมิ้นชัน ที่เงื่อนไขอุณหภูมิ 40 50 และ 60ºC แสดงดังภาพที่ 2 จากภาพ พบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลทำให้ความชื้นในขมิ้นชันลดลงได้เร็วกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้มากขึ้นส่งผลทำให้ความชื้นในขมิ้นชันเกิดการระเหยได้ดีขึ้น ทำให้อัตราการอบแห้งมีค่าสูงขึ้น ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับรายงานของ การอบแห้งพริกไทย (Uengkimbuan *et al*., 2011) การอบแห้งใบสะระแหน่ (Phosee *et al*., 2013) และจากข้อมูลการอบแห้ง พบว่า การอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60ºC จะใช้เวลาในการอบแห้งประมาณ 720 480 และ 360 นาที ตามลำดับ และจากผลการทดลอง พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนจาก 40 เป็น 50 และ 60ºC จะทำให้เวลาในการอบแห้งลดลงประมาณ 33 และ 50 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาการอบแห้งขมิ้นชันด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 40 50 และ 60ºC

2. อิทธิพลของกำลังอินฟราเรดต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้ง

ภาพที่ 3 แสดงการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นกับเวลาของการอบแห้งขมิ้นชันด้วยกำลังของรังสีอินฟราเรด 300 400 และ 500 W จากภาพพบว่า การเพิ่มขึ้นของกำลังอินฟราเรดส่งผลทำให้อัตราการอบแห้งมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มของกำลังอินฟราเรดจะเป็นการเพิ่มพลังงานต่อหน่วยพื้นที่มากขึ้นส่งผลต่ออัตราการถ่ายเทมวลน้ำเพิ่มมากขึ้น ทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งลดน้อยลง ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับรายงานของ การอบแห้งใบบัวบก (Tirawanichakul *et al*., 2013) การอบแห้งแครอท (Doymaz, 2015) และจากข้อมูลการอบแห้ง พบว่า การอบแห้งด้วยกำลังอินฟราเรดที่ 300 400 และ 500 W จะใช้เวลาในการอบแห้งประมาณ 150 90 และ 60 นาที ตามลำดับ และจากการผลการทดลอง พบว่า การเพิ่มกำลังของรังสีอินฟราเรดจาก 300 เป็น 400 และ 500 W ทำให้เวลาในการอบแห้งลดลงประมาณ 40 และ 60 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาการอบแห้งขมิ้นชันที่กำลังของรังสีอินฟราเรด 300 400 และ 500 W

3. เปรียบเทียบการอบแห้งขมิ้นชันด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรด

จากผลการทดลอง พบว่า อุณหภูมิลมร้อนและขนาดกำลังอินฟราเรดมีผลต่อพฤติกรรมการลดความชื้นของขมิ้นชัน โดยที่ปัจจัยเหล่านี้มีผลต่อการเพิ่มอุณหภูมิวัสดุและการถ่ายเทมวล โดยที่การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดจะใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนในทุกเงื่อนไขการอบแห้ง เนื่องจากพลังงานจากรังสีอินฟราเรดจะถูกแผ่ไปยังผิวของวัสดุซึ่งจะทำให้โมเลกุลของน้ำภายในวัสดุสั่นและทำให้เกิดเป็นความร้อนขึ้นภายในวัสดุ ทำให้อุณหภูมิภายในวัสดุสูงกว่าอุณหภูมิที่ผิวส่งผลทำให้เกิดการถ่ายเทมวลได้ง่ายกว่า ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับ รายงานของ การอบแห้งลำไย (Nuthong *et al.*, 2011) การอบแห้งพริกไทยดำ (Sae-Khow *et al*., 2013) การอบแห้งใบกระเพราแดง (Apintanapong, 2009) การอบแห้งปลาข้าวสาร (Tasara *et al*., 2014) ดังนั้นทำให้การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน

แบบจำลองการอบแห้งขมิ้นชัน

เมื่อนำผลการทดลองมาวิเคราะห์หาแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งขมิ้นชันด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรด โดยเลือกใช้สมการเอมพิริคัลที่นิยมใช้ทั่วไปจำนวน 5 สมการ แสดงดังตารางที่ 1 และจากการวิเคราะห์แสดงค่าคงตัวต่าง ๆ ของแบบจำลองการอบแห้งในแต่ละเงื่อนไขการทดลองการอบแห้ง แสดงดังตารางที่ 2 ทั้งนี้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งจะพิจารณาจากค่า R^2 และค่า RMSE เพื่อเปรียบเทียบหาแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สุดสำหรับอธิบายจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งขมิ้นชัน พบว่า แบบจำลองของ Two-term จะมีค่า R^2 สูงที่สุด และมีค่า RMSE ต่ำที่สุดสำหรับการทดลองอบแห้งด้วยลมร้อน ในส่วนของการทดลองอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด พบว่า แบบจำลองของ Page จะมีค่า R^2 สูงที่สุด และมีค่า RMSE ต่ำที่สุด และเมื่อนำค่าที่ได้จากแบบจำลองของการอบแห้งด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรดมาเขียนกราฟเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลอง พบว่า มีค่าใกล้เคียงกันทั้งการอบแห้งด้วยอากาศร้อนและการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ดังแสดงในภาพที่ 2 และ 3 ตามลำดับ

ตารางที่ 2 ค่าคงตัวของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการการอบแห้งที่เงื่อนไขต่าง ๆ

Model	Condition	Constant	R^2	RMSE
Newton	Hot Air (40ºC)	k=0.0095	0.998338	0.010816
	Hot Air (50ºC)	k=0.0197	0.992478	0.024079
	Hot Air (60ºC)	k=0.0305	0.996174	0.020096
	IR (300 W)	k=0.0860	0.967571	0.057328
	IR (400 W)	k=0.1237	0.967233	0.059488
	IR (500 W)	k=0.1716	0.990505	0.035259
Page	Hot Air (40ºC)	k=0.0152 , n=0.9017	0.997017	0.014110
	Hot Air (50ºC)	k=0.0236 , n=0.9530	0.992462	0.023717
	Hot Air (60ºC)	k=0.0303 , n=1.0019	0.996209	0.020064
	IR (300 W)	k=0.0251 , n=1.4709	0.999932	0.002927
	IR (400 W)	k=0.0445 , n=1.4424	0.998945	0.011708
	IR (500 W)	k=0.0735 , n=1.4182	0.999655	0.007002
Henderson and Pabis	Hot Air (40ºC)	k=0.0093 , a=0.9786	0.998339	0.010812
	Hot Air (50ºC)	k=0.0198 , a=1.0035	0.992536	0.024054
	Hot Air (60ºC)	k=0.0307 , a=1.0045	0.996236	0.020023
	IR (300 W)	k=0.0899 , a=1.0531	0.974411	0.053740
	IR (400 W)	k=0.1269 , a=1.0325	0.971802	0.057423
	IR (500 W)	k=0.1735 , a=1.0152	0.990946	0.034859
Logarithmic	Hot Air (40ºC)	k=0.0106 , a=0.9633 , c=0.0351	0.999159	0.007518
	Hot Air (50ºC)	k=0.0222 , a=0.9897 , c=0.0324	0.997682	0.013000
	Hot Air (60ºC)	k=0.0327 , a=0.9930, c=0.0208	0.997771	0.015094
	IR (300 W)	k=0.0880 , a=1.0615, c=-0.0098	0.990092	0.035118
	IR (400 W)	k=0.1217 , a=1.0471, c=-0.0167	0.996401	0.021731
	IR (500 W)	k=0.1671 , a=1.0275, c=-0.0138	0.999292	0.010077
Two-term	Hot Air (40ºC)	k_0=0.0005 , k_1=0.0108 , a=0.0456 , b=0.9544	0.999183	0.007425
	Hot Air (50ºC)	k_0=0.0021 , k_1=0.0235 , a=0.0631 , b=0.9646	0.997800	0.012616
	Hot Air (60ºC)	k_0=0.0330 , k_1=0.0009 , a=0.9889 , b=0.0259	0.997951	0.014469
	IR (300 W)	k_0=0.0899 , k_1=0.0899 , a=0.5265 , b=0.5265	0.974411	0.053740
	IR (400 W)	k_0=0.1269 , k_1=0.1269 , a=0.5162 , b=0.5162	0.971802	0.057423
	IR (500 W)	k_0=0.1735 , k_1=0.1735 , a=0.5076 , b=0.5076	0.990946	0.034859

สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งขมิ้นชันด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60ºC และกำลังรังสีอินฟราเรด 300 400 และ 500 W พบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิและกำลังรังสีอินฟราเรดที่สูงขึ้น จะสามารถลดความชื้นของขมิ้นชันได้เร็วกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิและกำลังรังสีอินฟราเรดต่ำ และจากการวิเคราะห์แบบจำลองการอบแห้งที่ดีที่สุดที่ใช้ในการอธิบายจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งขมิ้นชันจากการทดลองอบแห้งด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรด พบว่า แบบจำลองแบบ Two–term ให้ผลการทำนายดีที่สุดสำหรับการอบแห้งขมิ้นชันด้วยลมร้อน และแบบจำลองแบบ Page ให้ผลการทำนายดีที่สุดสำหรับการอบแห้งขมิ้นชันด้วยรังสีอินฟราเรด

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่สนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัยจากเงินรายได้คณะวิทยาศาสตร์ และขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ที่ให้การอนุเคราะห์สถานที่และสนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับใช้ในการทำวิจัยจนทำให้งานสำเร็จลุล่วงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

AOAC. (1995). *Official Method of Analysis*, 16th ed., The Association of Official Analytical Chemists. Inc. Arlington, Verginia, USA.

Apintanapong, M. (2009). Infrared drying of Holy Basil leaves and its effect on sensory characteristics. *Journal of Agricultural Science, 40*(3), 69-72.

Assawarachan, R., Nookong M., Chailungka N and Amornlerdpison, D. (2013). Effects of microwave power on the drying characteristics, color and phenolic content of Spirogyrasp. *Journal of Food, Agriculture & Environment, 11* (1), 1-4.

Doymaz, I., (2015). Infrared drying kinetics and quality characteristics of carrot slices. *Journal of Food Processing and Preservation,* (ISSN 1745-4549), 1-8.

Nuthong, P., Achariyaviriya, A., Namsanguan, K. & Achariyaviriya, S. (2011). Kinetics and modeling of whole longan with combined infrared and hot air. *Journal of Food Engineering*, *102*, 233-239.

Phosee, N., Khongbutr, P., Uttamating, K. and Assawarachan, R. (2013). Effect of temperature on moisture ratio and color changes of mint leaves during hot air drying process. *RMUTSB Acadenic Journal*, *1*(2), 103-114. (in Thai)

Qilong, S., Yagin, Z. and Ya, Z. (2013). Mathematial modeling on thin–layer heat pump drying of yacon (Smallanthus sonchifolius) slices. *Energy Conversion and Management, 71*, 208 – 216.

Sae-Khow, A., Tirawanichakul, S., Tirawanichakul, Y. (2013). Effect of drying with heat convection and heat radiation on drying kinetics and quality aspect of black pepper. *Burapha Science Journal*, *18*(1), 166-180. (in Thai)

Soponronnarit, S. (1997). *Drying Grains and Some Types of Foods*. (5th edition), Bangkok: King Mongkut's University of Technology Thonburi. 338 pages. (in Thai)

Tasara, J., Tirawanichakul, S., and Tirawanichakul, Y. (2014). Strategic Development of Crisp Tiny Anchovy Using Hot Air and Infrared Drying. *Burapha Science Journal*, *19*(1), 1-10. (in Thai)

Tirawanichakul, S., Chanchiew, S. and Tirawanichakul, Y. (2013). Pennywort Drying using Infrared Radiation: Drying Kinetics, Energy Consumption and Quality Aspect. KKU Research Journal, *18*(2), 311-324. (in Thai)

Uengkimbuan, N., Boonpain, P., Hwanrarun, W. (2011). Models of pepper drying using hot air oven. *Agricultural Science Journal, 42*(3 (Suppl.)), 533-536. (in Thai)