

แบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งบอระเพ็ดด้วยลมร้อน

Optimum Model for Drying of Heart-Leaved Moonseed by Hot Air

บัณฑิต กฤตาคม¹ ปฐวิติ วรามิตร^{*1} นันทวัฒน์ วีระยุทธ² อำไพศักดิ์ ทัพญมา² โสภณ สิ้นสร้าง¹

¹สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

²ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี 34190

Bundit Krittacom¹ Pathiwat Waramit^{*1} Nantawatana Weerayuth² Umphisak Teeboonma² Sophon Sinsang¹

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Architecture,

Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima 30000

²Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University,

Warinchamrap, Ubon Ratchathani 34190

Tel: 0-4423-3000 Fax: 0-4423-3074 E-mail : pathiwat.wa@rmuti.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งบอระเพ็ดด้วยลมร้อน ภายใต้อุณหภูมิอบแห้ง 50-70 องศาเซลเซียส และความเร็วลม 1.0-2.0 เมตรต่อวินาที แบบจำลองทำการทดสอบโดยเปรียบเทียบผลการทำนายอัตราส่วนความชื้นจากแบบจำลองกับอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลอง จากนั้นเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมโดยใช้ค่า r^2 และ RMSE เป็นดัชนีชี้วัด ผลจากการศึกษาพบว่าแบบจำลองเอมพิริคัลสามารถทำนายอัตราส่วนความชื้นการอบแห้งได้ดี โดยที่แบบจำลองของ Page มีความเหมาะสมที่สุดกับผลการทดลอง โดยมีค่า r^2 มากที่สุดเท่ากับ 0.98634 และ RMSE น้อยที่สุดเท่ากับ 0.03463 **คำหลัก** แบบจำลองการอบแห้ง แบบจำลองเอมพิริคัล การอบแห้งด้วยลมร้อน บอระเพ็ด

Abstract

The aim of this work is to obtain the optimum hot air drying model. Heart-leaved moonseed was dried under drying temperatures of 50-70°C and air velocities of 1.0-2.0 m/s. Empirical models (EM) were applied to predict the drying moisture ratio and

the prediction result of EM was compared with the experimental data by using r^2 and RMSE as the criterion for this comparison. The results showed that EM can predict the moisture ratio effectively. Page model is the best fit to experimental results with maximum $r^2=0.98634$ and minimum RMSE=0.03463

Keywords: Drying model, empirical model, hot air drying, heart leaved moonseed

1. บทนำ

บอระเพ็ดเป็นไม้เลื้อยที่พบโดยทั่วไปตามป่าดิบแล้ง ป่าเบญจพรรณและสามารถปลูกได้ง่าย โดยที่บอระเพ็ดนั้นถือเป็นพืชสมุนไพรที่รู้จักกันอย่างแพร่หลายในประเทศไทย โดยมีสรรพคุณเป็นยาบำรุงสุขภาพ เป็นยาอายุวัฒนะ บำรุงกำลัง ช่วยขับน้ำย่อย ทำให้เจริญอาหาร การประยุกต์ใช้บอระเพ็ดเพื่อรับประทานเป็นสมุนไพรนั้นสามารถทำได้หลายวิธีทั้งการรับประทานแบบสด หรือรับประทานแบบแห้ง เช่น ใช้น้ำคั้นมาดื่มเป็นประจำวันเป็นยาอายุวัฒนะ กินแล้วร่างกายแข็งแรงไม่เจ็บป่วยง่าย ในผู้ป่วยเบาหวานพบว่าการกินร่วมกับยาแผนปัจจุบันสามารถควบคุมปริมาณน้ำตาลได้ดี [1] ด้วย

เหตุนี้จึงมีการแปรรูปบอระเพ็ดในรูปแบบต่างเพื่อการเก็บรักษาที่ยาวนานขึ้นและสะดวกต่อการใช้งาน โดยการอบแห้งบอระเพ็ดเป็นอีกวิธีการหนึ่งที่ยิยมใช้ในการแปรรูปบอระเพ็ดเช่นกัน

การอบแห้งคือกระบวนการถนอมอาหารด้วยการลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ และถ่ายเทความร้อนพร้อมๆกัน [2] กระบวนการเหล่านี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างที่แตกต่างกันดังต่อไปนี้

ธรรมชาติของวัสดุ วัสดุที่มีรูปพรุนขนาดใหญ่จะมีการเคลื่อนของน้ำภายในวัสดุแบบผ่านซึ่งเร็วกว่าการแพร่ในวัสดุเนื้อแน่น ดังนั้นอาหารที่มีรูปพรุนขนาดใหญ่จึงแห้งเร็วกว่าวัสดุที่มีเนื้อแน่น วัสดุที่มีน้ำตาลสูงจะมีความเหนียวกีดขวางการเคลื่อนที่ของน้ำจึงแห้งช้า ส่วนวัสดุที่มีการลวก นวดคลึง ทำให้เซลล์แตกจึงแห้งเร็วกว่า [3]

ขนาดและรูปร่าง ขนาดและรูปร่างมีผลต่อพื้นที่ผิวต่อน้ำหนัก (mm^2/g) เช่น รูปร่างเหมือนกันขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวต่อน้ำหนักมากกว่าขนาดใหญ่จึงแห้งเร็วกว่า แต่ทั้งนี้ต้องคำนึงถึงพื้นที่ผิวที่สัมผัสกับอากาศที่พาเอาไอน้ำออกไปได้ ถ้าชิ้นเล็กมากแล้วมีการทับถมกัน การระเหยจะเกิดได้เฉพาะพื้นที่ผิวที่สัมผัสกับอากาศจึงเกิดได้ช้า ทั่วทั้งพื้นที่ผิวต่อน้ำหนักมาก [3]

ตำแหน่งของผลิตภัณฑ์ที่วางในห้องอบ ตำแหน่งการวางผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสมคือตำแหน่งที่พื้นผิวของผลิตภัณฑ์สัมผัสกับลมร้อนมากที่สุด ซึ่งพื้นผิวของผลิตภัณฑ์ที่สัมผัสกับลมร้อนได้ดีกว่าหรือสัมผัสกับลมร้อนที่มีความชื้นต่ำย่อมระเหยได้ดีกว่า

ความสามารถในการรับไอน้ำของลมร้อน อากาศร้อนที่มีความชื้นสูงจะรับไอน้ำได้น้อยส่งผลให้อัตราการอบแห้งลดลงและลดลงในอัตราคงที่ซึ่งจะพบในช่วงเริ่มต้นการอบแห้ง [3]

อุณหภูมิของอากาศร้อน ถ้าอากาศภายในห้องอบมีความชื้นคงที่การเพิ่มอุณหภูมิเป็นการเพิ่มความสามารถในการรับไอน้ำ จึงมีผลต่ออัตราการแห้งคงที่และอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้การแพร่กระจายของน้ำดีขึ้นจึงมีผลต่อช่วงการแห้งลดลงด้วย [3]

ความเร็วของลมร้อน ลมร้อนทำหน้าที่ในการเคลื่อนย้ายไอน้ำออกไปวัสดุ เมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นการพาพาน้ำออกจากวัสดุจึงเร็วขึ้น [3]

ความชื้นในอากาศ

ความชื้นในอากาศมักเรียกเป็นความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity) คืออัตราส่วนระหว่างปริมาณความชื้นที่มีอยู่จริงในอากาศกับปริมาณความชื้นอิ่มตัวที่อุณหภูมิเดียวกัน ถ้าอากาศชื้นมากจะมีความชื้นสัมพัทธ์สูง ความชื้นสัมพัทธ์ 100% หมายความว่าอากาศรับความชื้นได้เต็มที่แล้วไม่สามารถรับความชื้นได้อีก [3]

ความชื้นในวัสดุ

ความชื้นในวัสดุเป็นตัวบอกปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในวัสดุ เมื่อเทียบกับมวลของวัสดุชิ้นหรือแห้ง ซึ่งแสดงได้ 2 แบบ คือ

ความชื้นมาตรฐานเปียก

$$M_w = \left(\frac{w-d}{w} \right) \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ M_w คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (%)
 w คือ มวลของวัสดุเปียก (kg)
 d คือ มวลของวัสดุแห้ง (kg)

ความชื้นมาตรฐานแห้ง

$$M_d = \left(\frac{w-d}{d} \right) \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ M_d คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (%)
 w คือ มวลของวัสดุเปียก (kg)
 d คือ มวลของวัสดุแห้ง (kg)

ความชื้นแบบมาตรฐานแห้ง นิยมใช้ในการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งทางทฤษฎี เพราะช่วยให้การคำนวณสะดวกขึ้น เนื่องจากมวลของวัสดุแห้งมีค่าเกือบจะคงที่ในระหว่างการอบแห้ง [3] การทราบการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นการอบแห้งเป็นสิ่งสำคัญในการออกแบบจำลองกระบวนการอบแห้งให้มีความเหมาะสม [4] ที่ผ่านมามีการศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความชื้นการอบแห้งของวัสดุธรรมชาติที่แตกต่างกันจากนักวิจัยหลายกลุ่ม [5-14] นักวิจัยหลายท่านได้ทำการพัฒนาแบบจำลองการอบแห้ง [15-18] ในรูปแบบความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ได้ถูกนำมาใช้เพื่อ

อธิบายอัตราส่วนความชื้นการอบแห้งของวัสดุธรรมชาติ ซึ่งสมการเหล่านี้เน้นเฉพาะปัญหาที่มีความซับซ้อนไม่มากนัก เช่นสมการเอกซโปเนนเชียลอย่างง่ายที่รู้จักกันคือสมการของนิวตัน และสมการดัดแปลงเพื่อให้เหมาะสมกับข้อมูลและเงื่อนไขการทดลองมากขึ้น

จากที่กล่าวมาข้างต้นนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อหาแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งบอระเพ็ดด้วยลมร้อน ซึ่งแบบจำลองหรือสมการการอบแห้งที่สามารถทำนายอัตราส่วนความชื้นได้อย่างแม่นยำนั้นจะเป็นประโยชน์ต่อการวางแผนการอบแห้ง

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 วิธีการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้นำข้อมูลการอบแห้งด้วยลมร้อนที่ได้จากการทดลองมาใช้เป็นฐานข้อมูลแล้วเปรียบเทียบกับผลการทำนายอัตราส่วนความชื้นการอบแห้งด้วยแบบจำลองเอมพิริคัล [19] โดยมีผลิตภัณฑ์ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบคือ บอระเพ็ด ภายใต้อุณหภูมิการอบแห้งคือ อุณหภูมิอบแห้ง 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส และความเร็วลม 1.0, 1.5 และ 2.0 เมตรต่อวินาที ด้วยเครื่องอบแห้งด้วยลมร้อนดังรูปที่ 1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิและความเร็วลมคือ Thermo couple Type-K รุ่น NR-81530 ช่วงการวัดอุณหภูมิ -50 ถึง 500 องศาเซลเซียส และ Anemometer Vane Type บันทึกข้อมูลด้วย SD Card รุ่น AM-4217SD ช่วงการวัดความเร็วลม 0.3 - 35 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ การอบแห้งทำการบันทึกน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ที่ลดลงจนกระทั่งน้ำหนักคงที่ จากนั้นคำนวณหาอัตราส่วนความชื้น โดยการวัดค่าน้ำหนักที่ลดลงของผลิตภัณฑ์จะใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า โหลดเซลล์ (load cell) ยี่ห้อ TRANSCELL รุ่น FAD-5 (rate capacity 10 กิโลกรัม) ที่ติดตั้งไว้กับถาด (Tray) วางผลิตภัณฑ์เพื่อวัดค่าน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ที่ลดลงในทันทีโดยไม่ต้องนำออกมาชั่งเพื่อลดความความคลื่อนจากการวัด เมื่อผลิตภัณฑ์ถูกลมร้อนพัดผ่านจะเกิดการระเหยของน้ำทำให้น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ลดลง และโหลดเซลล์จะทำการวัดค่าและส่งค่ามาที่ Data logger ยี่ห้อ GRAPHTEC รุ่น GL800 (setting accuracy $\pm 0.2\%$ of full scale) ในรูปของแรงดันไฟฟ้าในหน่วยมิลลิโวลต์ (mV) จากนั้นจึงทำการเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้านั้นเป็นน้ำหนักในหน่วยกรัม (g)

ขั้นตอนสุดท้ายคือการนำผลิตภัณฑ์ที่อบจนน้ำหนักคงที่แล้วไปอบในตู้อบหาความชื้นที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมงเพื่อหาความชื้นสุดท้าย

2.2 แบบจำลองเอมพิริคัลของการอบแห้ง

อัตราส่วนความชื้นที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาการอบแห้งสามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ 3 จากนั้นนำข้อมูลอัตราส่วนความชื้นการอบแห้งและเวลาในการอบแห้งไปวิเคราะห์การถดถอย

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

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น

M_t คือ ปริมาณความชื้นที่เวลาใดๆ (% dry basis)

M_e คือ ปริมาณความชื้นสมดุล (% dry basis)

M_i คือ ปริมาณความชื้นเริ่มต้น (% dry basis)

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกแบบจำลองเอมพิริคัลมาทำการวิเคราะห์ทั้งสิ้น 13 แบบจำลองเพื่อทำนายอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้ง (MR) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของเวลาดังแสดงในตารางที่ 1 การวิเคราะห์หาแบบจำลองเอมพิริคัลที่เหมาะสมสำหรับทำนายอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งบอระเพ็ดด้วยลมร้อน โดยในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาถึงอิทธิพลของอุณหภูมิ และความเร็วลมที่ใช้ในการอบแห้ง ดังนั้น $a, b, c, g, h, k, k_1, k_2$ หรือ n ซึ่งเดิมเป็นเพียงค่าคงที่ จึงได้ถูกกำหนดให้เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิอบแห้ง และความเร็วลมที่ใช้ในการอบแห้ง ซึ่งเป็นการปรับในส่วนของค่าคงที่ของสมการเดิมโดยเป็นการอาศัยหลักการถ่ายเทความร้อนและมวล ซึ่งค่าคงที่ของสมการที่ทำการปรับปรุงแล้วจะอยู่ในรูปของสมการเส้นตรง โดยสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 4

$$K = x_0 + x_1T + x_2V + x_3TV \quad (4)$$

เมื่อ K คือ $a, b, c, g, h, k, k_1, k_2$ หรือ n

T คือ อุณหภูมิอบแห้ง (องศาเซลเซียส)

V คือ ความเร็วลม (เมตร/วินาที) x_i

คือ ค่าคงที่ของสมการที่ (4)

ยกตัวอย่างเช่นแบบจำลองของ Newton จะเปลี่ยนรูปจาก $MR = \exp(-kt)$ เป็น $MR = \exp(-(x_0 + x_1 T + x_2 V + x_3 TV)t)$ เป็นต้น

หลังจากนั้นได้ทำการวิเคราะห์หาแบบจำลองเอมพีริคัลที่เหมาะสมด้วยการวิเคราะห์การถดถอย (regression analysis) เพื่อหาค่าตัวแปรของแบบจำลองซึ่งการวิเคราะห์การถดถอยเป็นการวิเคราะห์โดยใช้ข้อมูลจากการทดลองทั้งหมดเป็นข้อมูลป้อนเข้าของซอฟต์แวร์ ทางสถิติที่ช่วยวิเคราะห์การถดถอยด้วยวิธีระเบียบวิธีเชิงตัวเลข โดยใช้ค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยผลรวมความคลาดเคลื่อนทั้งหมด (Root Mean Squared Error, RMSE) และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination, r^2) เป็นต้นวิธีวัดแบบจำลองเอมพีริคัลที่เหมาะสมดังแสดงในสมการที่ 5 และ RMSE คำนวณได้จากสมการที่ 6

$$R^2 = \frac{\left(n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2 \right)^2}{\left(\sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right) \left(\sum_{i=1}^n y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2 \right)} \quad (5)$$

เมื่อ x_i คือ เวลาในการอบแห้ง (นาท)

y_i คือ อัตราส่วนความชื้นการอบแห้ง

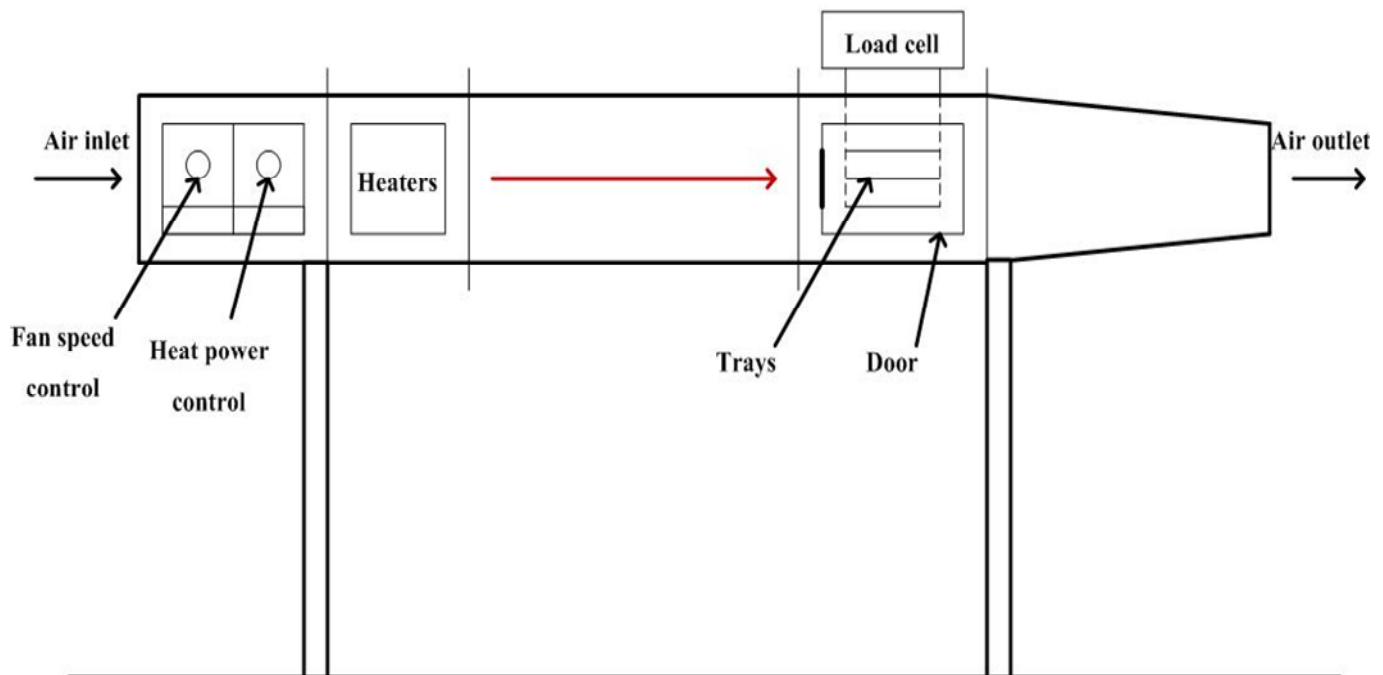
n คือ จำนวนของข้อมูล

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

เมื่อ $MR_{pre,i}$ คือ อัตราส่วนความชื้นที่ทำนายด้วยแบบจำลองเอมพีริคัล

$MR_{exp,i}$ คือ อัตราส่วนความชื้นจากข้อมูลการทดลอง

N คือ จำนวนของข้อมูล



รูปที่ 1 เครื่องอบแห้งด้วยลมร้อน

ตารางที่ 1 แบบจำลองเอมพีริคัลสำหรับการทำนายอัตราส่วนความชื้นการอบแห้ง [20-21]

ลำดับที่	ชื่อแบบจำลอง	แบบจำลอง
1	Newton	$MR = \exp(-kt)$
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$
3	Modified Page I	$MR = \exp(-(kt)^n)$
4	Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$
5	Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$
6	Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$
7	Two term	$MR = a \exp(-k_1t) + b \exp(-k_2t)$
8	Two term exponential	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kat)$
9	Modified Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$
10	Midilli	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$
11	Approximation of diffusion	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$
12	Verma et al.	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-gt)$
13	Logistic	$MR = a / [1 + \exp(kt)]$

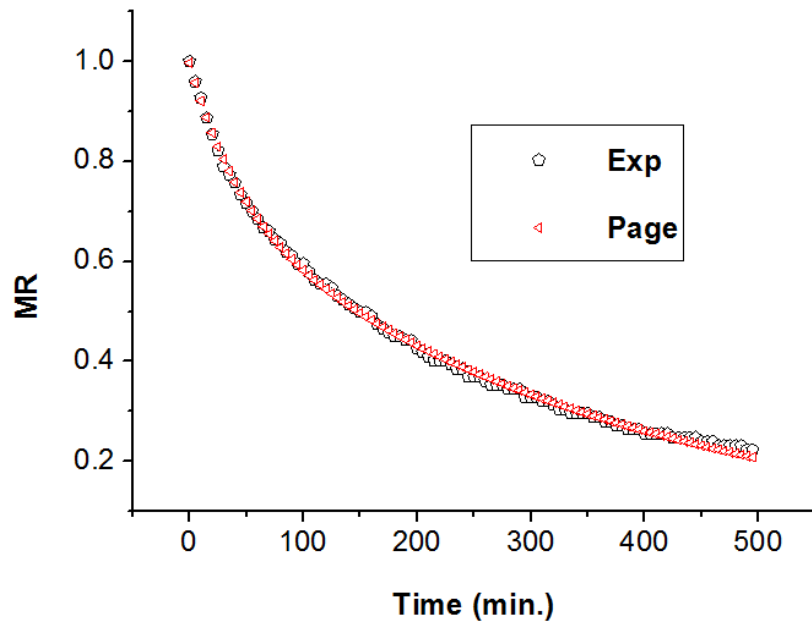
3. ผลการทดลองและวิจารณ์

ผลการวิเคราะห์การถดถอยเพื่อหาแบบจำลองเอมพีริคัลที่เหมาะสมสำหรับการทำนายอัตราส่วนความชื้นการอบแห้งบอระเพ็ดด้วยลมร้อนแสดงอยู่ในรูปค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (r^2) และค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยผลรวมความคลาดเคลื่อนทั้งหมด (RMSE) เมื่อเทียบกับ

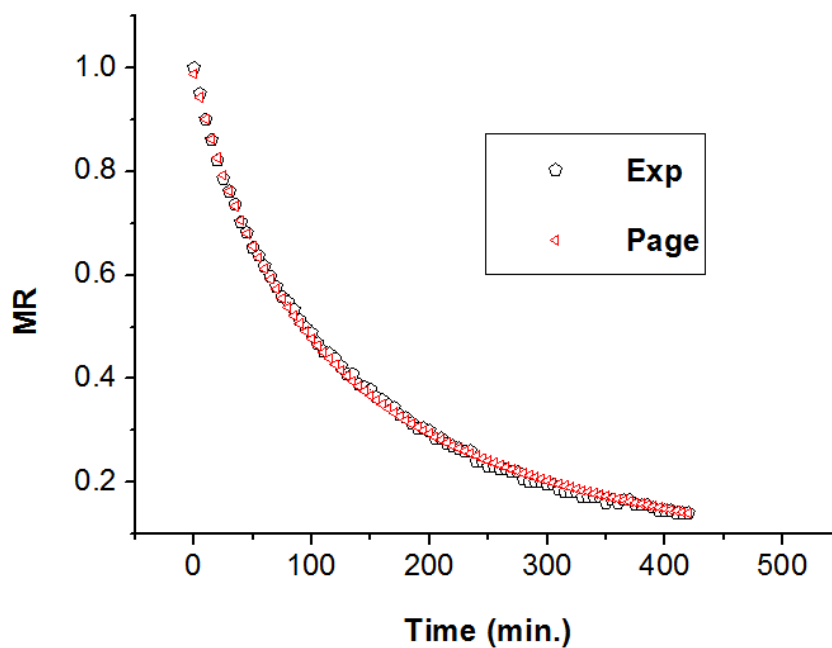
ข้อมูลการทดลองของแบบจำลองเอมพีริคัลทั้ง 13 แบบจำลอง ดังแสดงในตารางที่ 2 และผลการทำนายอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งบอระเพ็ดด้วยลมร้อนได้แสดงไว้ดังรูปที่ 2 และ 3

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองเอมพีริคัลสำหรับการอบแห้งบอระเพ็ดด้วยลมร้อน

บอระเพ็ด		
ชื่อแบบจำลอง	r^2	RMSE
Newton	0.98087	0.03655
Page	0.98634	0.03463
Modified Page I	0.98595	0.03468
Henderson and Pabis	0.98156	0.03525
Wang and Singh	0.95986	0.08334
Logarithmic	0.98316	0.03536
Two term	0.98295	0.03563
Two term exponential	0.98181	0.03495
Modified Henderson and Pabis	0.98474	0.03566
Midilli	0.98335	0.03722
Approximation of diffusion	0.98380	0.03540
Verma et al.	0.98380	0.03538
Logistic	0.97511	0.04299



รูปที่ 2 ผลการทำนายอัตราส่วนความชื้นการอบแห้งบอระเพ็ดที่อุณหภูมิ 60 °C และความเร็วลม 1.0 m/s



รูปที่ 3 ผลการทำนายอัตราส่วนความชื้นการอบแห้งบอระเพ็ดที่อุณหภูมิ 70 °C และความเร็วลม 1.5 m/s

จากตารางที่ 2 และจากรูปที่ 2 และ 3 พบว่าแบบจำลองของ Page มีความเหมาะสมมากที่สุดในการทำนายอัตราส่วนความชื้นการอบแห้งบอระเพ็ดด้วยลมร้อน โดยมีค่า r^2 มากที่สุดเท่ากับ 0.98634 และมีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดโดยมีค่า RMSE เท่ากับ 0.03463 แสดงว่าค่าคงที่ ที่ได้รับการปรับปรุงโดยคำนึงถึงอิทธิพล

ของอุณหภูมิและความเร็วลมในการอบแห้งจากสมการของ Page นั้นมีความสอดคล้องกับผลทดลองการอบแห้งบอระเพ็ดด้วยลมร้อนมากที่สุด

4. บทสรุป

ผลจากการวิเคราะห์หาแบบจำลองการอบแห้งบอระเพ็ดด้วยลมร้อนโดยใช้แบบจำลองเอมพีริคัลพบว่าแบบจำลองเอมพีริคัลสามารถทำนายอัตราส่วนความชื้นได้ดี และแบบจำลองของ Page มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับทำนายอัตราส่วนความชื้นในการอบแห้งบอระเพ็ดด้วยลมร้อนโดยมีค่า r^2 เท่ากับ 0.98634 และ RMSE เท่ากับ 0.03463

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสานและมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่สนับสนุนทุนวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] โครงการอนุรักษ์พันธุ์พืชอันเนื่องมาจากพระราชดำริ สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี. สรรพคุณสมุนไพร 200 ชนิด. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: http://www.rspg.or.th/plants_data/herbs/herbs_200.htm (วันที่ค้นข้อมูล: 11 กันยายน 2554).
- [2] Gogus, F. 1994. The effect of movement of solutes on millard reaction during drying, Ph.D. Thesis, Leeds University, Leeds, U.K.
- [3] สันติ สุตเฉลียว. 2550. การศึกษาการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับสนามไฟฟ้า. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาสารคาม: มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.
- [4] Senadeera, W., Bhandari, B.R., Young, G., Wijesinghe, B. 2003. Influence of shapes of selected vegetable materials on drying kinetics during fluidized bed drying. *Journal of Food Engineering*, 58: 277–283.
- [5] Passamai, V. and Saravia, L. 1977a. Relationship between a solar drying model of red pepper and the kinetics of pure water evaporation I. *Drying Technology*, 15 (5): 1419–1432.
- [6] Passamai, V. and Saravia, L. 1977b. Relationship between a solar drying model of red pepper and the kinetics of pure water evaporation II. *Drying Technology*, 15 (5): 1433–1457.
- [7] Midilli, A., Olgun, H., Ayhan, T. 1999. Experimental studies of mushroom and pollen drying. *International Journal of Energy Research*, 23: 1143–1152.
- [8] Sarsavadia, P.N., Sawhney, R.L., Pangavhane, D.R., Singh, S.P. 1999. Drying behavior of brined onion slices. *Journal of Food Engineering*, 40: 219–226.
- [9] Midilli, A. 2001. Determination of pistachio drying behavior and conditions in a solar drying system. *International Journal of Energy Research*, 23: 1143–1152.
- [10] Azzouz, S., Guizani, A., Jomaa, W., Belghith, A. 2002. Moisture diffusivity and drying kinetic equation of convective drying of grapes. *Journal of Food Engineering*, 55: 323–330.
- [11] Kaymak-Ertekin, F. 2002. Drying and rehydrating kinetics of green and red peppers. *Journal of Food Science*, 67 (1): 168–175.
- [12] Diamante, L.M. and Munro, P.A. 1991. Mathematical modeling of hot air drying of sweet potato slices. *International Journal of Food Science Technology*, 26: 99–109.
- [13] Diamante, L.M. and Munro, P.A. 1993. Mathematical modeling of thin layer solar drying of sweet potato slices. *Solar Energy*, 51: 271–276.
- [14] Ratti, C. and Mujumdar, A.S. 1997. Solar drying of foods: modeling and numerical simulation. *Solar Energy*, 60: 151–157.
- [15] Baughman, D.R. and Liu, Y.A. 1995. *Neural Networks in Bio-Processing and Chemical Engineering*. Academic Press, New York, USA.
- [16] Erenturk, K., Erenturk, S., and Tabil, L.G. 2004.

comparative study for the estimation of dynamical drying behavior of *Echinacea angustifolia* : regression analysis and neural network. Computers and Electronic in Agriculture, 45: 71–90.

- [17] Hernandez-Perez, J.A., Garcia-Alvarado, M.A., Trystram, G., and Heyd, B. 2004. Neural networks for the heat and mass transfer prediction during drying of cassava and mango. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 5: 57-64.
- [18] Kerr, W.L., Kerdpi boon, S., Devahastin, S. 2006. Neural network prediction of physical property changes of dried carrot as a function of fractal dimension and moisture content. Food Research International, 39: 1110–1118.
- [19] ปฏิวัติ วรามิตร, นันทวัฒน์ วีระยุทธ และอำไพศักดิ์ ที่บุญมา. 2553. การทำนายพฤติกรรมการอบแห้ง โดยใช้แบบจำลองเอมพีรีคัลและแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม. การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย. 5-7 พฤษภาคม 2553, เพชรบุรี, ประเทศไทย.
- [20] ปฏิวัติ วรามิตร. 2554. การทำนายพฤติกรรมการอบแห้งโดยใช้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. อุบลราชธานี: มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.
- [21] ปฏิวัติ วรามิตร, นันทวัฒน์ วีระยุทธ และอำไพศักดิ์ ที่บุญมา. 2553. การเปรียบเทียบแบบจำลองการอบแห้งด้วยลมร้อนระหว่างแบบจำลองเอมพีรีคัลและแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม. วารสารวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ. ปีที่ 3, ฉบับที่ 1: 60-68.