



สมการอบแห้งแบบชั้นบางของแครอทโดยใช้เครื่องอบแห้งสุญญากาศร่วมกับปั๊มความร้อน

รตินันท์ เหลือมพล*

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

*ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08-4030-7600 อีเมล: Luampon@gmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2018.01.013

รับเมื่อ 6 มีนาคม 2560 ตอรับเมื่อ 21 กรกฎาคม 2560 เผยแพร่ออนไลน์ 12 มกราคม 2561

© 2018 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมการอบแห้งแบบชั้นบางสำหรับการอบแห้งแครอทโดยใช้เครื่องอบแห้งสุญญากาศร่วมกับปั๊มความร้อน เพื่อนำสมการที่ได้ไปทำนายค่าอัตราส่วนความชื้น ในการทดลองใช้แครอทมีหนาประมาณ 0.5 cm เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 3 cm มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 10.11 d.b. สภาวะที่ใช้ในการอบแห้งคือ ใช้อุณหภูมิคงที่ 60 °C และใช้ความดัน 0.2, 0.5 และ 0.7 bar ความเร็วอากาศ 1.2 m/s ทำการอบแห้งจนน้ำหนักของแครอทไม่เปลี่ยนแปลงจึงหยุดกระบวนการอบแห้ง ระหว่างกระบวนการอบแห้งจะบันทึกค่าน้ำหนักทุก 5 นาที จากการทดลองพบว่าปริมาณความชื้นและอัตราส่วนความชื้นจะลดลงเมื่อเวลาการอบแห้งเพิ่มขึ้น และเมื่อใช้ความดันในการอบแห้งต่ำจะใช้เวลาในการอบแห้งเร็วที่สุด โดยสภาวะที่มีอัตราการอบแห้งสูงสุดคือ อุณหภูมิ 60 °C ความดัน 0.2 bar ใช้เวลาในการอบแห้งเร็วที่สุดประมาณ 330 นาที และจากการวิเคราะห์สมการการอบแห้งแบบชั้นบางโดยใช้วิธีการคำนวณแบบถดถอยไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear Regression) พบว่าสมการของ Midilli สามารถทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นได้สอดคล้องกับผลการทดลองมากที่สุด สำหรับการอบแห้งแครอทที่อุณหภูมิ 60 °C ความดัน 0.2 และ 0.7 bar โดยใช้เครื่องอบแห้งสุญญากาศร่วมกับปั๊มความร้อน

คำสำคัญ: สมการอบแห้งแบบชั้นบาง, เครื่องอบแห้งสุญญากาศ, เครื่องอบแห้งปั๊มความร้อน, การอบแห้งแครอท

การอ้างอิงบทความ: รตินันท์ เหลือมพล, “สมการอบแห้งแบบชั้นบางของแครอทโดยใช้เครื่องอบแห้งสุญญากาศร่วมกับปั๊มความร้อน,” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 28, ฉบับที่ 1, หน้า 147-155, ม.ค.-มี.ค. 2561.

Thin Layer Drying Model of Carrot Using a Heat Pump Vacuum Dryer

Ratinun Luampon*

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima, Thailand

*Corresponding Author, Tel. 08-4030-7600, E-mail: Luampon@gmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2018.01.013

Received 6 March 2017; Accepted 21 July 2017; Published online: 12 January 2018

© 2018 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This thesis article was purposed to study the thin layer drying model of carrot by using a heat pump vacuum dryer for predicting the moisture ratio of drying product. In experiment, carrot was sliced at size as; thickness 0.5 cm, diameter 3 cm, initial moisture content 10.11 d.b. It was dried with constant temperature at 60°C, drying pressure at 0.2, 0.5 and 0.7 bar, hot air velocity constant at 1.2 m/s and collected mass of drying product at interval 5 minute. The drying process was finished when mass of carrot slices was constant. From experimental result, moisture content and moisture ratio was decreased with increased drying time, drying time was decreased with decreased drying pressure. At drying condition with temperature 60°C, drying pressure 0.2 bar, moisture content was rapidly decreased and drying time was fastest about 330 minutes. The results analysis of thin layer drying models by using non-linear regression method it was found that, the Midilli model was good agreement with experimental data for carrot slices drying at temperature 60°C and drying pressure 0.2, 0.7 bar by using a heat pump vacuum dryer.

Keywords: Thin Layer Dying Model, Vacuum Dryer, Heat Pump Dryer, Carrot Drying.

Please cite this article as: R. Luampon, "Thin layer drying model of carrot using a heat pump vacuum dryer," *The Journal of KMUTNB*, vol. 28, no. 1, pp. 147–155, Jan.–Mar. 2018 (in Thai).

1. บทนำ

การเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรมีหลายวิธี เช่น การตากแห้ง การอบแห้ง การดอง เป็นต้น แต่วิธีที่ประชาชนส่วนใหญ่ใช้คือการตากแห้งโดยใช้แสงแดดเพราะลงทุนน้อยแต่ต้องใช้ระยะเวลาในการตากแห้งนาน สำหรับประเทศไทยในระดับอุตสาหกรรม การอบแห้งส่วนใหญ่จะใช้เครื่องอบแห้งแบบลมร้อน และใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นแหล่งให้ความร้อน โดยเครื่องอบแห้งแบบนี้มีประสิทธิภาพการใช้พลังงานต่ำ เนื่องจากไม่มีการนำความร้อนของอากาศที่ออกจากเครื่องอบแห้งกลับมาใช้ใหม่ (Heat Recovery) นอกจากนี้การใช้งานและการบำรุงรักษาค่อนข้างยาก อีกทั้งยังเกิดคราบเขม่าจากการเผาไหม้และลมร้อนที่ได้จากการเผาไหม้อาจไม่สะอาด จึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาอบแห้งกับผลิตภัณฑ์บางชนิด เมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งสูงเกินไปจะทำให้สารประโยชน์ในผลิตภัณฑ์อบแห้งนั้นสูญหายได้ หรือทำให้ผลิตภัณฑ์ไม่น่ารับประทาน โดยมีวิธีการอบแห้งอีกวิธีหนึ่งที่น่าสนใจคือ การอบแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศ ซึ่งเป็นกระบวนการอบแห้งวิธีหนึ่งที่มีอัตราการอบแห้งสูง เพราะเป็นกระบวนการอบแห้งที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ ส่งผลให้ความดันไอน้ำในอากาศลดลง ผลต่างระหว่างความดันไอน้ำที่ผลิตภัณฑ์กับอากาศจึงมีมากขึ้น ทำให้อัตราการถ่ายเทน้ำจากภายในมาที่ผิวของผลิตภัณฑ์เกิดขึ้นได้ง่าย [1] ผลิตภัณฑ์อบแห้งที่ได้จึงมีสี รสชาติ กลิ่น และคุณสมบัติประโยชน์ใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์สดเพราะการทำงานของเอนไซม์ที่เป็นต้นเหตุที่ทำให้สีและรสชาติเปลี่ยนแปลงไม่เกิดขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิในการอบแห้งต่ำ ปริมาณออกซิเจนน้อย และใช้เวลาในการอบแห้งเร็ว นอกจากนี้รูปร่างของผลิตภัณฑ์แห้งที่ได้ยังเปลี่ยนแปลงน้อยเมื่อเทียบกับการอบแห้งแบบลมร้อนทั่วไป [2] แหล่งความร้อนที่นำมาใช้ในห้องอบแห้งในสภาวะสุญญากาศมีหลายรูปแบบ เช่น ขดลวดความร้อนเคลื่อนไม่โครเวฟ ไอน้ำร้อน และปั๊มความร้อน ซึ่งแต่ละรูปแบบมีข้อดีและข้อเสียต่างกันยกตัวอย่าง เช่น เคลื่อนไม่โครเวฟมีความสามารถในการทะลุทะลวงสูงและโมเลกุลของน้ำสามารถดูดซับพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟได้ดี ทำให้มีอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นเพราะผลิตภัณฑ์มีรูพรุนมากขึ้น แต่มีข้อเสียคือ มีการกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟบน

ผลิตภัณฑ์น้อย ปัจจุบันการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรด้วยเครื่องอบแห้งปั๊มความร้อนกำลังเป็นที่นิยมมากขึ้น เนื่องจากเป็นการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพและผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอบแห้งจัดอยู่ในเกณฑ์ที่ดี ซึ่งส่วนใหญ่การอบแห้งวิธีนี้จะใช้ในการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตร อุณหภูมิการอบแห้งอยู่ในช่วงประมาณ 55–70°C [3] ดังนั้นปั๊มความร้อนจึงเป็นอุปกรณ์ที่ถูกนำมาใช้ให้ความร้อนแก่เครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศ เพราะสามารถใช้พลังงานความร้อนทั้งที่อยู่ในรูปความร้อนสัมผัสและความร้อนแฝงสามารถลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการอบแห้งให้ลดต่ำลงได้ [4] เหมาะสำหรับกรอบแห้งผลิตภัณฑ์ที่มีความไวต่อความร้อนสูง [5] นอกจากนี้ความเย็นที่ได้จากคอยล์เย็นของปั๊มความร้อนยังสามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์อื่นได้อีก เช่น ระบบทำความเย็นในอาคารและระบบหล่อเย็นปั๊มสุญญากาศ

สำหรับการศึกษาการทำนายปริมาณความชื้นภายในวัสดุอบแห้ง ปรากฏมาก [6] ได้ทำการศึกษาและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามมิติในการจำลองการถ่ายเทความร้อนและมวลสารระหว่างกระบวนการอบแห้งข้าวกล้อง โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าแบบจำลองสามารถทำนายความชื้นในข้าวกล้องอย่างแม่นยำและช่วยให้เกิดความเข้าใจกระบวนการถ่ายเทมวลในส่วนของการเยื่อหุ้มและเนื้อข้าวได้เป็นอย่างดี

ดังนั้นการอบแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศโดยใช้ความร้อนจากปั๊มความร้อนจึงเป็นการรวมข้อดีของระบบสุญญากาศและปั๊มความร้อนเข้าด้วยกัน กลไกการอบแห้งจึงมีความซับซ้อนมากกว่าการอบแห้งแบบลมร้อนที่ความดันบรรยากาศปกติ ดังนั้นการศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลต่างๆ สำหรับการอบแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศจึงมีความสำคัญที่ต้องศึกษาเพื่อให้เข้าใจเพิ่มมากขึ้น เพื่อนำไปเป็นข้อมูลในการวิเคราะห์และการออกแบบกระบวนการอบแห้ง รวมถึงการออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งระบบสุญญากาศ โดยสมการอบแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศยังมีข้อมูลในการศึกษาวิจัยน้อย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาสมการอบแห้งโดยใช้สมการแบบชั้นบาง เพื่อนำสมการที่คำนวณได้ไปใช้ในการทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นสำหรับการ

อบแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศ โดยในการอบแห้งนี้ใช้แครอทเป็นวัสดุในการทดลอง

โดยที่

- MR = อัตราส่วนความชื้น
- M = ความชื้นขณะเวลา t (% , d.b.)
- M_e = ความชื้นสมดุล (% , d.b.)
- M_0 = ความชื้นเริ่มต้น (% , d.b.)

2. สมการการอบแห้งแบบชั้นบาง

ในการทดสอบการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรแบบชั้นบาง มีการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายปรากฏการณ์ของความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราส่วนความชื้นของผลิตภัณฑ์กับระยะเวลาการอบแห้งในหลายรูปด้วยกัน เช่น สมการ Two-term Model สมการของ Henderson และ Pabis Model หรือสมการของ Lewis Model เป็นต้น โดยอัตราส่วนความชื้นของผลิตภัณฑ์สามารถหาได้จากสมการที่ (1) ดังนั้นกราฟแสดงอัตราส่วนความชื้นของผลิตภัณฑ์อบแห้งจะมีลักษณะแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับรูปแบบของสมการดังแสดงในตารางที่ 1

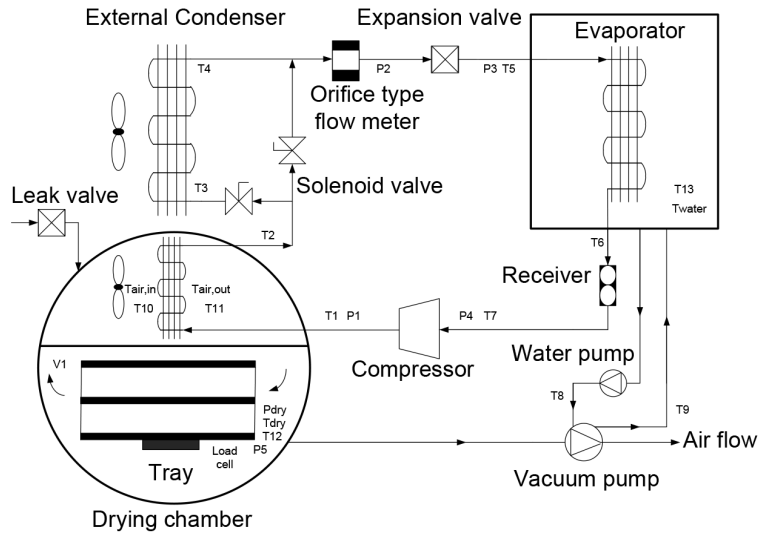
$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} \quad (1)$$

สำหรับในการทดลองนี้เป็นการหาสมการการอบแห้งแบบชั้นบางและจะทำการอบแห้งจนกว่าน้ำหนักของวัสดุคงที่ จึงกำหนดให้ค่าความชื้นสมดุลมีค่าเท่ากับศูนย์ [7]

การวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาสมการการอบแห้งแบบชั้นบางจะใช้วิธีการวิเคราะห์แบบ Non-linear Regression และนำค่าอัตราส่วนความชื้นที่ทำนายได้ของแต่ละสมการไปเปรียบเทียบกับผลการทดลอง โดยใช้ค่าความสัมพันธ์ทางสถิติเป็นเกณฑ์ในการเลือกสมการที่เหมาะสมสำหรับการทำนายการอบแห้ง สมการที่มีค่า Correlation Coefficient (R^2) มากที่สุด ค่า Reduced Chi-square (χ^2) และ Root Mean Square Error (RMSE) น้อยที่สุดจะเป็นสมการที่เหมาะสม

ตารางที่ 1 รูปแบบสมการการอบแห้งแบบชั้นบาง

Name	Model	References
1. Lewis	$MR = \exp(-kt)$	Bruce [8]
2. Page	$MR = \exp(-kt^n)$	Page [9]
3. Modified Page	$MR = \exp(-kt)^n$	White [10]
4. Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	Henderson and Pabis [11]
5. Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$	Togrul and Pehlivan [12]
6. Two-term Model	$MR = a \exp(-k_1t) + b \exp(-k_2t)$	Henderson [13]
7. Approximation of Diffusion	$MR = a \exp(-kt) + (1-a)\exp(-k a t)$	Yaldiz <i>et al.</i> [14]
8. Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	Wang and Singh [15]
9. Simplified Fick's Diffusion	$MR = a \exp(-c(t/L^2))$	Diamante and Munro [16]
10. Modified Page Equation-II	$MR = \exp(-c(t/L^2)^n)$	Diamante and Munro [16]
11. Midilli	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	Midilli <i>et al.</i> [17]



รูปที่ 1 ส่วนประกอบและหลักการทำงานของเครื่องอบแห้ง

สำหรับนำไปทำนายการอบแห้งนี้ ค่าความสัมพันธ์ทางสถิติ แสดงได้ดังต่อไปนี้

1. Correlation Coefficient (R^2)
2. Reduced Chi-square (χ^2)

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - z}$$

3. Root Mean Square Error (RMSE)

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

โดยที่

- i = จำนวนของค่าที่ MR ที่ได้จากการสมการ
- N = จำนวนของค่าที่ได้จากการบันทึกจากการทดลอง
- z = จำนวนของค่าคงที่ของแต่ละสมการ

3. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

3.1 วัสดุและอุปกรณ์

เครื่องอบแห้งสุญญากาศมีปั๊มความร้อนขนาด 5.2 kW เป็นอุปกรณ์สร้างความร้อนและมีปั๊มสุญญากาศแบบ Liquid Ring ขนาด 1.2 kW เป็นอุปกรณ์ควบคุมความดันในห้องอบแห้ง โดยมีปั๊มน้ำขนาด 100 W ทำหน้าที่จ่ายน้ำหล่อเย็น

ให้กับปั๊มสุญญากาศเพื่อป้องกันการเสียหายที่จะเกิดขึ้นแก่ปั๊มสุญญากาศ โดยมีถังน้ำหล่อเย็นขนาด 1x1x0.3 m เป็นแหล่งเก็บน้ำเย็นที่ได้จากความร้อนของฮีวโปเรเตอร์ของปั๊มความร้อน การวัดอุณหภูมิจะใช้เทอร์โมคอปเปิล Type-K ถูกสอบเทียบด้วยวิธี Grant Water Bath (Grant Instruments, Cambridge, UK) ซึ่งมีความแม่นยำ $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ($5-90^\circ\text{C}$) และเชื่อมต่อเข้ากับเครื่องเก็บข้อมูล (Data Logger) Model CX-23 (Cambell Scientific Inc, UT, USA) การวัดความดันของสารความเย็นจะใช้ Bourdon Pressure Gauges ถูกสอบเทียบความแม่นยำจากโรงงานผลิต มีความแม่นยำ $\pm 0.1\%$ และมีถาดอบแห้งทำมาจากตะแกรงอะลูมิเนียมขนาด 60x30 cm จำนวน 3 ชั้น มีเครื่องชั่งน้ำหนัก (Load Cell) วางที่ด้านใต้ของถาดอบแห้งเพื่อวัดน้ำหนักวัสดุอบแห้งและเชื่อมต่อเข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูล (Data Logger) โดยสารทำความเย็นของเครื่องปั๊มความร้อนคือ R-22 แสดงได้ดังรูปที่ 1

3.2 ขั้นตอนการทำงานของเครื่องอบแห้ง

ในการทดลองปั๊มความร้อนจะเริ่มทำงานเพื่อสร้างความร้อนให้กับห้องอบแห้ง หลังจากได้อุณหภูมิตามต้องการแล้วปั๊มสุญญากาศจะเริ่มทำงานเพื่อควบคุมความดันใน

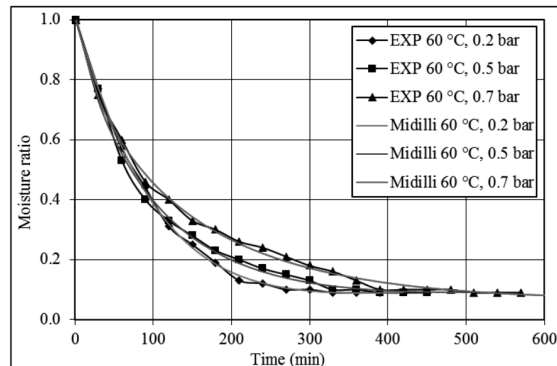
ห้องอบแห้ง สำหรับการรักษาอุณหภูมิในห้องอบแห้งจะใช้ วาล์วโซเลนอยด์ (Solenoid Valve) เป็นอุปกรณ์เปิดปิด การไหลของสารทำความเย็น เมื่ออุณหภูมิในห้องอบแห้ง ถึงค่าที่ตั้งไว้วาล์วโซเลนอยด์จะเปิดให้สารทำความเย็น ไหลไปสู่เครื่องควบแน่นด้านนอกห้องอบแห้ง (External Condenser) เพื่อช่วยในการระบายความร้อนออกจากห้องอบแห้ง ส่วนความดันในห้องอบแห้ง ปั๊มสุญญากาศจะทำงาน ตลอดเวลาแต่จะมีวาล์วควบคุมให้อากาศภายนอกไหลเข้าไป สู่ห้องอบแห้งเพื่อรักษาภาวะสุญญากาศให้ได้ตามเงื่อนไข การทดลอง ความเย็นที่ได้จากปั๊มความร้อนจะนำไปผลิต น้ำเย็นเพื่อใช้ในการหล่อเย็นปั๊มสุญญากาศ

3.3 วิธีการวิจัย

คัดเลือกแครอทจากแหล่งเดียวกัน นำมาหั่นเป็นแว่น ความหนาประมาณ 0.5 cm เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 3 cm คัดเลือกเอาเฉพาะชิ้นที่มีขนาดใกล้เคียงกัน นำไปล้างด้วย น้ำสะอาด รอให้สะเด็ดน้ำเพื่อรอเข้าตู้อบแห้ง หลังจากเตรียม ตัวอย่างเสร็จจะนำแครอทที่หั่นเป็นแว่นที่มีขนาดใกล้เคียงกัน วางบนถาดอบแห้ง มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 10.11 d.b. ทำการอบแห้งจนน้ำหนักของแครอทไม่เปลี่ยนแปลงจึง หยุดกระบวนการอบแห้ง ระหว่างกระบวนการอบแห้งจะบันทึก ค่าน้ำหนักทุก 5 นาที โดยสภาวะที่ใช้ในการอบแห้งคือ ใช้อุณหภูมิคงที่ 60°C และใช้ความดัน 0.2, 0.5 และ 0.7 bar ความเร็วอากาศ 1.2 m/s เนื่องจากที่อุณหภูมิ 60°C เป็นอุณหภูมิสูงสุดที่เครื่องอบแห้งนี้ทำได้ และที่อุณหภูมิ 60°C ความดัน 0.2 bar จุดเดือดของน้ำจะมีค่าเท่ากับ อุณหภูมิ 100°C ที่ความดันบรรยากาศปกติ

4. ผลการทดลองและอภิปรายผล

จากการทดลองอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิกคงที่ 60°C และ ใช้ความดัน 0.2, 0.5 และ 0.7 bar ความเร็วอากาศ 1.2 m/s บันทึกน้ำหนักของวัสดุอบแห้งทุก 5 นาที จนกว่าน้ำหนักคงที่ พบว่าปริมาณความชื้นและอัตราส่วนความชื้นจะลดลง เมื่อเวลาการอบแห้งเพิ่มขึ้น และเมื่อใช้ความดันในการอบแห้งต่ำ จะใช้เวลาในการอบแห้งเร็วที่สุด โดยสภาวะที่ปริมาณ ความชื้นลดลงเร็วที่สุดคือ อุณหภูมิ 60°C ความดัน 0.2 bar



รูปที่ 2 การเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลองเทียบกับค่าที่ได้จากสมการ Midilli

ใช้เวลาในการอบแห้งประมาณ 330 นาที กราฟแสดง อัตราส่วนความชื้นของแต่ละการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 2

เมื่อนำผลที่ได้จากการทดลองไปหาสมการการอบแห้ง แบบชั้นบาง โดยใช้สมการในตารางที่ 1 มาวิเคราะห์หาค่า อัตราส่วนความชื้น (MR) กับเวลาการอบแห้ง (t) โดยใช้วิธี Non-linear Regression และนำค่าอัตราส่วนความชื้นที่ ทำนายได้ของแต่ละสมการไปเปรียบเทียบกับผลการทดลอง โดยใช้ค่าความสัมพันธ์ทางสถิติเป็นเกณฑ์ในการเลือกสมการ ที่เหมาะสมสำหรับการทำนายการอบแห้งนี้ จากนั้นนำผล ที่ได้ไปเขียนกราฟเพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง โดย สมการที่มีค่า Correlation Coefficient (R^2) มากที่สุด ค่า Reduced Chi-square (χ^2) และ Root Mean Square Error (RMSE) น้อยที่สุดจะเป็นสมการที่เหมาะสมสำหรับ นำไปทำนายการอบแห้งนี้ ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 2

จากตารางที่ 2 เป็นผลที่ได้จากการวิเคราะห์หาค่าความสัมพันธ์ทางสถิติของสมการแบบชั้นบางทั้ง 11 สมการ ซึ่ง ได้จากการนำผลการคำนวณค่าระหว่างอัตราส่วนความชื้น ที่ได้จากการทดลอง (MR, Experiment) มาเปรียบเทียบกับ ค่าที่ทำนายได้จากสมการแบบชั้นบาง (MR, Predict) และ ใช้วิธีการวิเคราะห์แบบถดถอยไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear Regression) เพื่อหาค่าคงที่ของแต่ละสมการ

พบว่าที่อุณหภูมิ 60°C ความดัน 0.2 และ 0.7 bar สมการของ Midilli ให้ค่า R^2 , χ^2 , RMSE ดีที่สุด แต่ที่ ความดัน 0.5 bar สมการของ Two-term Model จะมีค่า



ตารางที่ 2 ค่าความสัมพันธ์ทางสถิติของสมการออบแห้งแบบชั้นบางทั้ง 11 สมการ

Model	Correlation	60°C 0.2 bar	60°C 0.5 bar	60°C 0.7 bar
Lewis Lewis	R^2	0.99060	0.98169	0.98280
	χ^2	0.00108	0.00259	0.00278
	RMSE	0.03180	0.04942	0.05149
Page	R^2	0.99030	0.98890	0.99520
	χ^2	0.00091	0.00085	0.00033
	RMSE	0.02815	0.02755	0.01737
Modified Page	R^2	0.99050	0.98170	0.98280
	χ^2	0.00117	0.00275	0.00293
	RMSE	0.03180	0.04942	0.05149
Henderson and Pabis	R^2	0.99010	0.97490	0.97320
	χ^2	0.00116	0.00245	0.00212
	RMSE	0.03173	0.04668	0.04375
Logarithmic	R^2	0.99760	0.99630	0.99280
	χ^2	0.00023	0.00028	0.00049
	RMSE	0.01351	0.01536	0.02050
Two-term Model	R^2	0.99540	0.99730	0.99710
	χ^2	0.00188	0.00022	0.00021
	RMSE	0.03709	0.01305	0.01309
Approximation of Diffusion	R^2	0.98930	0.98860	0.99180
	χ^2	0.00112	0.00112	0.00095
	RMSE	0.03122	0.03158	0.02933
Wang and Singh	R^2	0.97400	0.93350	0.94000
	χ^2	0.00322	0.00802	0.00767
	RMSE	0.05285	0.08444	0.08329
Simplified Fick's Diffusion	R^2	0.99010	0.97490	0.97310
	χ^2	0.00126	0.00262	0.00223
	RMSE	0.03173	0.04668	0.04375
Modified Page Equation-II	R^2	0.99550	0.98890	0.99520
	χ^2	0.00099	0.00091	0.00035
	RMSE	0.02815	0.02755	0.01737
Midilli	R^2	0.99930	0.99650	0.99760
	χ^2	0.00007	0.00029	0.00017
	RMSE	0.00699	0.01490	0.01183

R^2 , χ^2 , RMSE ดีกว่าสมการอื่น ดังนั้นในการศึกษานี้จึงได้เลือกสมการของ Midilli เป็นสมการที่สามารถอธิบายแนวโน้มของการอบแห้งแครอทได้ดีที่สุด และเมื่อนำค่าอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทำนายของสมการ Midilli ไปเขียนเส้นโค้งการอบแห้ง สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2 จากนั้นจะนำรูปแบบของสมการ Midilli มาเขียนเป็นสมการเพื่อใช้ในการทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นที่อยู่ในฟังก์ชันของความดัน โดยใช้วิธีการ

คำนวณแบบถดถอยพหุ (Multiple Regression)

จากตารางที่ 3 เป็นตารางแสดงค่าคงที่ในสมการ Midilli ที่ความดันต่างกัน เมื่อนำค่าคงที่แต่ละค่าของสมการ Midilli มาเขียนให้เป็นสมการที่อยู่ในฟังก์ชันของความดัน โดยใช้วิธีการคำนวณแบบถดถอยพหุ ผลที่ได้จากการคำนวณจะเป็นสมการออบแห้งแบบชั้นบางสำหรับใช้คำนวณหาค่าอัตราส่วนความชื้นในการอบแห้งแครอทที่อุณหภูมิ 60°C

ตารางที่ 3 ค่าคงที่การอบแห้งของสมการ Midilli ที่ความดันต่างกัน

Model	Condition	a	b	k	n
Midilli	60°C 0.2 bar	1.005041	0.000196	0.006687	1.088625
	60°C 0.5 bar	1.028318	0.000142	0.018569	0.863558
	60°C 0.7 bar	1.027301	0.000068	0.024572	0.763750

ความดัน 0.2–0.7 bar โดยรูปแบบของสมการและค่าคงที่ที่ได้พัฒนาขึ้นแสดงได้ดังสมการที่ (2)

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

โดยที่

$$a = -0.1653P^2 + 0.1933P + 0.973$$

$$b = -0.00002P + 0.0003$$

$$k = 0.0361P - 0.0002$$

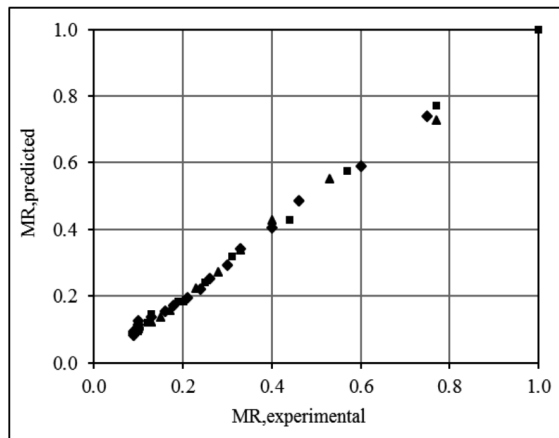
$$n = -0.6577P + 1.2122$$

$$P = \text{ความดันอบแห้ง (bar)}$$

เมื่อนำสมการ Midilli ที่อยู่ในฟังก์ชันของความดัน [สมการที่ (2)] มาแทนค่าด้วยความดันที่ใช้ในการทดลองจริงคือ 0.2, 0.5 และ 0.7 bar เพื่อหาค่าอัตราส่วนความชื้นที่สมการสามารถทำนายได้ แล้วนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองเพื่อแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างผลการทำนายและผลการทดลอง จะสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3 โดยรูปแบบของสมการ Midilli ที่พัฒนาขึ้นมีค่า $R^2 = 0.997$ เมื่อเทียบกับผลการทดลอง

5. สรุป

จากการศึกษาการอบแห้งแครอทด้วยเครื่องอบแห้งสุญญากาศโดยใช้ความร้อนจากปั๊มความร้อน พบว่าปริมาณความชื้นและอัตราส่วนความชื้นจะลดลงเมื่อเวลาการอบแห้งเพิ่มขึ้น และเมื่อใช้ความดันในการอบแห้งต่ำจะใช้เวลาในการอบแห้งเร็ว สภาวะที่ปริมาณความชื้นลดลงเร็วที่สุดคือ อุณหภูมิ 60°C ความดัน 0.2 bar และจากการวิเคราะห์สมการการอบแห้งแบบชั้นบางทั้ง 11 สมการ โดยใช้วิธีการวิเคราะห์แบบถดถอยไม่เป็นเชิงเส้น เพื่อหาค่าคงที่ของแต่ละ



รูปที่ 3 การเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทำนายของสมการ Midilli [สมการที่ (2)] และผลที่ได้จากการทดลอง อุณหภูมิ 60°C ความดัน 0.2, 0.5 และ 0.7 bar

สมการ จากนั้นนำผลที่ได้จากการทำนายของแต่ละสมการไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลอง พบว่าสมการของ Midilli สามารถอธิบายลักษณะแนวโน้มการอบแห้งแครอทได้ดีที่สุด และจากการวิเคราะห์แบบถดถอยพหุพหุทำให้ได้สมการของ Midilli ที่พัฒนาขึ้นอยู่ในรูปฟังก์ชันของความดันอบแห้ง โดยสมการที่พัฒนาขึ้นมีค่า $R^2 = 0.997$ เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลอง

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ขอขอบพระคุณการสนับสนุนจากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยขอนแก่น และสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน สำหรับสถานที่และอุปกรณ์ในการทำวิจัย



เอกสารอ้างอิง

- [1] A. P. Camila, K. Chandan, C. Fernanda, and M. A. Karim, "Heat and mass transfer modeling of the osmo-convective drying of yacon roots (*Smallanthus sonchifolius*)," *Applied Thermal Engineering*, vol. 63, pp. 23–32, 2014.
- [2] I. Alibas, "Energy consumption & colour characteristics of nettle leaves during microwave vacuum & convective drying," *Biosystems Engineering*, vol. 96, pp. 495–502, 2007.
- [3] A. Artnasaew, S.Theerakulpisut, and C. Benjapiyaporn, "Development of a vacuum heat pump dryer for drying chilli," *Biosystem Engineering*, vol. 105, pp. 130–138, 2010.
- [4] S. Soponronnarit, S. Wetchacama, and T. Kanphukdee, "Seed drying using a heat pump," *International Energy Journal*, vol. 1, pp. 97–102, 2001.
- [5] G. Vazquez, F. Chenlo, R. Moreria, and E. Cruz, "Grape drying in a pilot plant with a heat pump," *Drying Technology: An International Journal*, vol. 15, pp. 899–92, 1997.
- [6] P. Prakotmak, "Modeling heat and mass transfer in drying of single-kernel brown rice," *Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok*, vol. 24, no. 3, pp. 634–643, 2014 (in Thai).
- [7] N. A. Akgun and I. Doymaz, "Modeling of olive cake thin-layer drying process," *Journal of Food Engineering*, vol. 68, pp. 455–461, 2005.
- [8] D. M. Bruce, "Exposed-layer barley drying, three models fitted to New data up to 150°C," *Journal of Agricultural Engineering Research*, vol. 32, pp. 337–347, 1985.
- [9] G. E. Page, "Factors influencing the maximum rate so of air drying shelled corn in thin layers," M.S. thesis. Department of Mechanical Engineering, Purdue University, Purdue, USA, 1949.
- [10] G. M. White, I. J. Ross, and R. Ponekert, "Fully exposed drying of popcorn," *Transactions of the ASAE*, vol. 24, pp. 466–468, 1981.
- [11] S. M. Henderson and S. Pabis, "Grain drying theory. II. Temperature effects on drying coefficients," *Journal of Agricultural Engineering Research*, vol.6, pp.169–174, 1961.
- [12] I. T. Togrul and D. Pehlivan, "Mathematical modeling of solar Drying of apricots in thin layers," *Journal of Food Engineering*, vol. 55, pp. 209–216, 2002.
- [13] S. M. Henderson, "Progress in developing the thin layer drying equation," *Transactions of ASAC*, vol. 17, pp. 1167–1172, 1974.
- [14] O. Yaldiz, C. Ertekin, and H.I. Uzun, "Mathematical modeling of Thin layer solar drying of sultana grapes," *Energy*, vol. 26, pp. 457–465, 2001.
- [15] C. Y. Wang and R. P. Singh, "Use of variable equilibrium moisture content in modeling rice drying," *Transactions of American Society of Agricultural Engineers*, vol. 11, pp. 668–672, 1978.
- [16] L. M. Diamante and P. A. Munro, "Mathematical modeling of hot air drying of sweet potato slices," *International Journal of Food Science and Technology*, vol. 26, pp. 99–108, 1991.
- [17] A. Midilli, H. Kucuk, and Z. Yapar, "A new model for single layer drying," *Drying Technology*, vol. 20, no. 7, pp. 1503–1513, 2002.

