

สมการการถ่ายเทความร้อนและความชื้นของการอบแห้ง ภายใต้สภาวะสุญญากาศ

Heat and Moisture Transfer Equations for a Vacuum Drying

รตินันท์ เหลือมพล (Ratinun Luampon)^{1*} สิริธร สุภาคาร (Sirithon Supakarn)*
ดร.สมนึกธีระกุลพิศุทธิ์ (Dr.Somnuk Theerakulpisut)** ดร.อภิชาติ อัจฉนาเสียว (Dr.Apichart Artnaseaw)***

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับสมการการอบแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศ โดยใช้สมการดิฟเฟอเรนเชียลอันดับ 3 สมการมาอธิบายเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลภายในวัสดุอบแห้ง และใช้ทฤษฎีทางไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์มาแก้สมการ แล้วใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์มาช่วยในการคำนวณและทำนายผลสำหรับวัสดุอบแห้งที่ใช้ในการศึกษานี้ประกอบไปด้วย แครอท กัลย และข่า มาทำการอบแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศโดยใช้ความร้อนจากเครื่องสูบลมร้อน จากนั้นจะนำเอาผลการทำนายที่ได้จากสมการไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองเพื่อตรวจสอบความถูกต้อง กำหนดให้วัสดุอบแห้งมีลักษณะเป็นรูปแบบทรงกระบอกสั้นและมีการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลในรูปแบบ 2 มิติ จากผลการทดลองอบแห้งวัสดุทั้ง 3 ชนิดพบว่าเมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูง ความดันอบแห้งต่ำ จะมีอัตราการอบแห้งสูง ใช้เวลาในการอบแห้งน้อย และพบว่าสมการที่ใช้ในการคำนวณให้ผลการทำนายปริมาณความชื้นมีแนวโน้มสอดคล้องกับผลการทดลองอบแห้งได้เป็นอย่างดี ($R\text{-Square} > 0.95$ และ Stand Error มีค่าเข้าใกล้ศูนย์) โดยความดันที่ใช้ในการอบแห้งมีอิทธิพลต่ออัตราการอบแห้งมากกว่าอุณหภูมิอบแห้ง

ABSTRACT

This thesis deals with a drying model under vacuum. The drying model consists of three differential equations describing heat and mass transfer of the drying product. The finite-difference technique was used to solve the three equations simultaneously. The drying model was coded into a computer program which was used to simulate the drying of three different agricultural products including carrot, banana and galangal under vacuum with the heat being supplied by the heat pump. Actual drying experiments of the products were conducted for the purpose of verifying the drying model. The drying product was assumed in short cylinder and two dimensions heat and mass transfer. Both experimental and simulation results of carrot, banana and galangal drying showed that higher drying

¹ Correspondent author: luampon_R@hotmail.com

* นักศึกษา หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

** รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

*** ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

temperature and lower drying pressure increased the drying rate resulting in shorter drying time. It was also found that the finite-difference drying model predicted drying results with good accuracy. In most cases, the R-square value was greater than 0.95 and the standard error approached zero. Furthermore, it was discovered that the drying pressure was more influential on drying than the drying temperature.

คำสำคัญ: แครอท กัลย ข่า การถ่ายเทความร้อน การถ่ายโอนความชื้น เครื่องอบแห้งสุญญากาศ

Keywords: Carrot, Banana, Galangal, Heat transfer, Moisture transfer, Vacuum dryer

บทนำ

การอบแห้งในสภาวะสุญญากาศเป็นกระบวนการอบแห้งวิธีหนึ่งที่ทำให้มีอัตราการอบแห้งสูง เพราะในกระบวนการอบแห้งที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศส่งผลให้ความดันไอน้ำในอากาศลดลง ผลต่างระหว่างความดันไอน้ำที่ผลิตภัณฑ์กับอากาศจึงมีมากขึ้น ทำให้อัตราการถ่ายเทน้ำจากภายในมาที่ผิวของผลิตภัณฑ์เกิดขึ้นได้ง่าย [1] ผลิตภัณฑ์อบแห้งที่ได้จึงมีสี รสชาติ กลิ่น และคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์สดเพราะการทำงานของเอนไซม์ที่เป็นต้นเหตุทำให้สีและรสชาติเปลี่ยนแปลงไม่เกิดขึ้นได้ เนื่องจากอุณหภูมิในการอบแห้งต่ำ ปริมาณออกซิเจนน้อยและใช้เวลาไม่นาน นอกจากนี้รูปร่างของผลิตภัณฑ์แห้งที่ได้อังเปลี่ยนแปลงน้อยเมื่อเทียบกับการอบแห้งแบบลมร้อนทั่วไป [2] แหล่งความร้อนที่นำมาใช้ในหีบอบแห้งในสภาวะสุญญากาศมีหลายรูปแบบ เช่น ลวดความร้อนไฟฟ้า คลีนไมโครเวฟ ไอน้ำร้อน และเครื่องสูบลมร้อน ซึ่งแต่ละรูปแบบมีข้อดีและข้อเสียต่างกันยกตัวอย่าง เช่น คลีนไมโครเวฟมีความสามารถในการทะลุทะลวงสูงและโมเลกุลของน้ำสามารถดูดซับพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟได้ดี ทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นเพราะผลิตภัณฑ์มีรูปทรงมากขึ้น แต่มีข้อเสียคือ การกระจายของคลื่นไมโครเวฟบนผลิตภัณฑ์มีน้อย โดยเฉพาะที่จุดอับต่างๆ นอกจากนี้ยังมีอันตรายที่เกิดจากคลื่นไมโครเวฟอีกด้วย [3] สำหรับการอบแห้งแบบลมร้อนเป็นการอบแห้งที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย แต่การอบแห้งด้วยวิธี

นี้จะใช้เวลาในการอบแห้งนาน ใช้อุณหภูมิที่สูงและอัตราการอบแห้งต่ำ ซึ่งจะส่งผลเสียต่อวัสดุอบแห้ง [4] อย่างเช่น สูญเสียสารอาหาร คุณภาพลดลง [5] ปัจจุบันการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรด้วยเครื่องอบแห้งสูบลมร้อนกำลังเป็นที่นิยมมากขึ้น เนื่องจากการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอบแห้งจัดอยู่ในเกณฑ์ที่ดี [6] ซึ่งส่วนใหญ่การอบแห้งวิธีนี้จะใช้ในการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตร เช่น ผัก ผลไม้ สมุนไพรบางชนิด อุณหภูมิการอบแห้งอยู่ในช่วงประมาณ 55 - 70 °C เครื่องสูบลมร้อนจึงเป็นอุปกรณ์ที่ถูกนำมาใช้ให้ความร้อนแก่เครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศ เนื่องจากเครื่องสูบลมร้อนมีความสามารถในการประหยัดพลังงานสูง เพราะสามารถใช้พลังงานความร้อนทั้งที่อยู่ในรูปความร้อนสัมผัสและความร้อนแฝง สามารถลดความชื้นของอากาศที่ใช้ในการอบแห้งให้ลดต่ำลงได้ [7] มีผลทำให้สามารถทำการอบแห้งภายใต้อุณหภูมิต่ำได้ เหมาะสำหรับอบแห้งผลิตภัณฑ์ที่มีความไวต่อความร้อนสูง [8] นอกจากนี้ความเย็นที่ได้จากคอยล์เย็นของเครื่องสูบลมร้อน ยังสามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์อื่นได้อีก เช่น ระบบทำความเย็นในอาคารและระบบหล่อเย็นปั๊มสุญญากาศ ดังนั้นการรวมเอาข้อดีของการอบแห้งหลายๆ วิธีเข้าด้วยกันจะช่วยทำให้เวลาการอบแห้งน้อยลงและช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการอบแห้งได้ [9]

การศึกษากระบวนการอบแห้งเป็นสิ่งสำคัญที่ใช้ในการทำนายการอบแห้งโดย Luo et al. ได้

ทำการอบแห้งแครอทเพื่อศึกษาคุณลักษณะการอบแห้งและศึกษาสมการอบแห้งสำหรับเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับความถี่เหนือเสียงจากผลการทดลองพบว่าสมการของ Page สามารถใช้ทำนายปริมาณความชื้นในวัสดุอบแห้งได้ดีที่สุดและอัตราการอบแห้งจะสูงเมื่อเพิ่มกำลังและความถี่ของเครื่องกำเนิดเสียง [10] โดยการใช้ความถี่เหนือเสียงร่วมกับการอบแห้งวิธีอื่นจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพและคุณภาพของวัสดุอบแห้งได้ [11] ในการอบแห้งกล้วยโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบไมโครเวฟ การทำนายปริมาณความชื้นด้วยสมการอบแห้งแบบชั้นบางพบว่าสมการของ Wang and Singh สามารถทำนายปริมาณความชื้นของกล้วยได้เป็นอย่างดี [4]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จะศึกษากระบวนการอบแห้งของผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรโดยใช้การอบแห้งระบบสุญญากาศที่ใช้ความร้อนจากเครื่องสูบลมความร้อน โดยใช้สมการการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลมาทำนายปริมาณความชื้นภายในวัสดุอบแห้ง จากนั้นจะนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของผลการทำนาย

ผลงานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1. สมการการถ่ายเทความร้อนและ ความชื้นของวัสดุอบแห้ง

การทำสุญญากาศสำหรับการอบแห้ง ความชื้นจะเคลื่อนที่จากภายในไปยังผิว และการระเหยของความชื้นจากผิวไปสู่ห้องสุญญากาศ การเคลื่อนของความชื้นระหว่างการทำสุญญากาศประกอบด้วย การแพร่ของน้ำอิสระ (Free Water) ในรูปของเหลว ภายในและการแพร่ไอน้ำผ่านรูพรุนของผลิตภัณฑ์อบแห้ง ดังนั้นในระหว่างการทำสุญญากาศการแพร่ในรูปของเหลวสมมุติว่าเกิดขึ้นน้อยมาก ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะคิดเฉพาะการแพร่ในรูปของไอน้ำผ่านรูพรุนของวัสดุอบแห้ง สำหรับการวิเคราะห์การแพร่ในรูปของไอน้ำ ที่ความดันคงที่ค่าหนึ่งจะมีอุณหภูมิค่าหนึ่งซึ่งจะเป็นจุดเดือดของน้ำ โดยการเคลื่อนที่

ของไอน้ำจะเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิหน้าของวัสดุอบแห้งสูงกว่าอุณหภูมิน้ำอิ่มตัวที่อยู่ในห้องสุญญากาศ หรือความดันของไอน้ำที่ผิวของผลิตภัณฑ์อบแห้งมีค่ามากกว่าความดันในห้องอบแห้ง ($P_{ws} > P_{vc}$) ก่อนเริ่มกระบวนการทำสุญญากาศถ้าการกระจายตัวของอุณหภูมิในวัสดุอบแห้งไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งก้อน การระเหยจะเกิดขึ้นเป็นอันดับแรกที่ตำแหน่งอุณหภูมิสูงสุดในวัสดุอบแห้งและการเดือดจะเคลื่อนไปยังตำแหน่งที่อุณหภูมิต่ำกว่า อีกกรณีหนึ่งถ้าวัสดุอบแห้งมีอุณหภูมิเริ่มต้นสม่ำเสมอทั่วทั้งก้อน การเดือดจะเกิดขึ้นอันดับแรกบนผิวและจะเคลื่อนมาทางด้านในวัสดุอบแห้ง [12] ในการคำนวณปริมาณความชื้นภายในวัสดุอบแห้งจะใช้ข้อสมมุติฐานการวิเคราะห์ทางไฟไนต์ดิฟเฟอเรนเชียลนี้ [13]

- 1) การถ่ายเทความร้อนและความชื้นจะพิจารณาเป็นแบบ 2 มิติ ในแนวแกน $r-z$
- 2) การอบแห้งแบบสุญญากาศอุณหภูมิและความดันภายในห้องอบแห้งมีการกระจายตัวแบบสม่ำเสมอและคงที่ตลอดเวลา
- 3) คุณสมบัติต่างๆ ของวัสดุอบแห้งมีค่าไม่คงที่ เช่น C_p , K_T
- 4) สมการสำหรับการถ่ายเทความร้อนและความชื้น พิจารณาเป็นแบบสภาวะไม่คงตัว
- 5) ความร้อนที่เกิดขึ้นภายในวัสดุอบแห้งน้อยมาก
- 6) การหดตัวของวัสดุอบแห้งมีค่าน้อยมาก

การถ่ายเทเชิงมวล

เมื่อวัสดุอบแห้งอยู่ในห้องอบแห้งสุญญากาศ การถ่ายเทของไอน้ำในผลิตภัณฑ์อบแห้งจะเกิดขึ้นเมื่อความดันของไอน้ำที่ผิวของผลิตภัณฑ์อบแห้งมีค่ามากกว่าความดันในห้องอบแห้ง ($P_{ws} > P_{vc}$) โดยจะเกิดการถ่ายเทไอน้ำผ่านชั้นเนื้อเยื่อของวัสดุอบแห้ง ซึ่งกำหนดให้วัสดุมีรูปร่างแบบทรงกระบอกสั้น สมการการกระจายตัวของความดันไอน้ำสามารถแสดงได้ดังนี้ [12]

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{k_m}{\alpha_p} \left(\frac{\partial^2 P}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

$$\text{สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล } k_m = \rho_v \frac{d^2}{32\mu}$$

โดยกำหนดให้ $\alpha_p = \frac{\omega}{\rho_v R_v T}$

ถ้ากำหนดให้น้ำเป็นแก๊สจินตภาพ ความหนาแน่นจะหาได้จาก $\rho_v = \frac{PM_w}{RT_k}$

การคำนวณการกระจายตัวของความชื้นในวัสดุอบแห้งจะใช้สมการของ Fick's second law of mass transfer ซึ่งแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไอน้ำสำหรับวัสดุอบแห้งทุกชนิดหาได้จากสมการที่ 3 โดยค่า D จะขึ้นอยู่กับค่าความพรุน (ω) ของวัสดุอบแห้งเป็นหลัก ซึ่งค่า ω จะใช้ในขั้นตอนการคำนวณหาค่า P ในสมการที่ 1 [14]

$$D = 1.87 \times 10^{-10} \left(\frac{T_f + 273}{P} \right)^{2.072} \quad (3)$$

$$\text{โดยที่ } T_f = \frac{T_{i,j} + T_d}{2}$$

การถ่ายเทเชิงความร้อน

สมการการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นภายในวัสดุอบแห้งจะใช้หลักการการนำความร้อน โดยวัสดุอบแห้งจะได้รับความร้อนจากอากาศที่ไหลเวียนในห้องอบแห้งที่มีการถ่ายเทความร้อนแบบการพาความร้อนโดยธรรมชาติซึ่งจะแสดงได้ดังสมการนี้

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_T \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (4)$$

$$\text{โดยกำหนดให้ คือ } \alpha_T \text{ คือ } \frac{k_T}{\rho C_p}$$

การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของอากาศ (ht) จะแบ่งการคำนวณได้ 2 กรณีตามลักษณะรูปทรงของวัสดุอบแห้งคือ จะเกิดการถ่ายเทความร้อนที่ผิวด้านบนและเกิดการถ่ายเทความร้อนที่ผิวด้านข้าง โดยผิวด้านบนของวัสดุอบแห้งมีลักษณะรูปทรงแบบแผ่นกลม (Circular Disk) ส่วนผิวด้านข้างของวัสดุอบแห้งมีลักษณะรูปทรงแบบทรงกระบอกตั้ง (Vertical cylinder) กำหนดให้เกิดการถ่ายเทความร้อนแบบการพาความร้อนโดยธรรมชาติเนื่องจากภายใต้สภาวะสุญญากาศ อากาศภายในห้องอบแห้งจะมีความหนาแน่นน้อย จึงทำให้อากาศมีการไหลเวียนช้า ดังนั้นจะสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นได้ดังสมการต่อไปนี้

ผิวด้านบนของวัสดุอบแห้ง [15]

$$h_t = 0.54 (Gr_D Pr)^{1/4} \left(\frac{k_a}{L_D} \right) \text{ สำหรับ } 10^5 > Gr_D Pr > 2 \times 10^7 \quad (5)$$

$$h_t = 0.14 (Gr_D Pr)^{1/3} \left(\frac{k_a}{L_D} \right) \text{ สำหรับ } 2 \times 10^7 > Gr_D Pr > 3 \times 10^{10} \quad (6)$$

ผิวด้านข้างของวัสดุอบแห้ง [15]

$$h_t = 0.59 (Gr_c Pr)^{1/4} \left(\frac{k_a}{L} \right) \text{ สำหรับ } 10^4 < Gr_c Pr < 10^9 \quad (7)$$

$$h_t = 0.10 (Gr_c Pr)^{1/3} \left(\frac{k_a}{L} \right) \text{ สำหรับ } 10^9 < Gr_c Pr < 10^{13} \quad (8)$$

$$Gr_D = \frac{g \beta (T_s - T_d) L_D^3}{\nu^2} \quad (9)$$

$$Gr_c = \frac{g \beta (T_s - T_d) L^3}{\nu^2} \quad (10)$$

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k_a} \quad (11)$$

$$L_D = 0.9d \quad (12)$$

2. กระบวนการคำนวณ

ค่าคุณสมบัติต่างๆ ของอากาศสามารถหาได้จาก [1,14,17] สำหรับการแก้สมการหาค่าตัวแปรต่างๆ จะใช้การประมาณค่าด้วยวิธีทางไฟไนท์ดิฟเฟอเรนซ์ (Unsteady explicit method) โดยวิธีการแล้วจำเป็นต้องกำหนดค่าขอบเขตเงื่อนไข

ขึ้นมา (แสดงในภาพที่ 2) เพื่อที่จะสามารถนำไปคำนวณค่าในโหนดใกล้เคียงกันได้ [16] เมื่อมองวัสดุอบแห้งในแนวด้านข้างจะทำให้มีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า เพื่อลดระยะเวลาในการคำนวณจึงแบ่งชิ้นงานออกเป็น 4 ชั้นตามแกนสมมาตร โดยมีแกนสมมาตรคือ แกนด้านซ้ายและแกนด้านล่าง (ภาพที่ 1) การแบ่งโหนดจะทำการแบ่งในแนว r-z โดยในแนวแกน r จะเริ่มที่ r=0 ถึง r=n และในแนวแกน z จะเริ่มที่ z=0 ถึง z=m ในการคำนวณที่เวลาเริ่มต้น (t=0) การกำหนดขอบเขตเงื่อนไขและเงื่อนไขเริ่มต้นจะทำให้สามารถคำนวณค่าในแต่ละโหนดได้ จากนั้นเมื่อเวลาเปลี่ยนไปค่าที่ได้ในแต่ละโหนดจากการคำนวณครั้งที่แล้วจะ

นำไปใช้คำนวณในรอบต่อไปเรื่อยๆ โดยค่าความดัน P และค่าอุณหภูมิ T ที่ได้ในแต่ละรอบการคำนวณจะนำไปแทนค่าในสมการที่ 3 เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไอน้ำ (D) จากนั้นจะนำค่า D ที่ได้ไปคำนวณหาค่าปริมาณความชื้นในสมการที่ 2 จนกว่าจะสิ้นสุดกระบวนการคำนวณ ขั้นตอนการคำนวณแสดงได้ในภาพที่ 3

การหาค่าเฉลี่ยของปริมาณความชื้นในวัสดุอบแห้งที่เกิดจากการรวมค่าที่ได้จากการคำนวณในตำแหน่งของโหนดต่างๆ สามารถหาค่าโดยใช้เทคนิคการอินทิกรัลเชิงตัวเลข โดยใช้วิธี Simpson Method สามารถหาได้ตั้งสมการที่ 13

$$\bar{M} = \frac{2\Delta j}{3M_c^2} M_{i,j}^{i+1} \left[\begin{aligned} & (M_{i,0} + M_{i,j}) + 4(M_{i,2} + M_{i,4} + M_{i,6} + \dots + M_{i,j-1}) \\ & + 2(M_{i,1} + M_{i,3} + M_{i,5} + \dots + M_{i,j-2}) \end{aligned} \right] \quad (13)$$

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

1. เครื่องอบแห้งระบบสุญญากาศโดยใช้ความร้อนจากเครื่องสูบลมความร้อน

เครื่องอบแห้งระบบสุญญากาศที่ใช้ความร้อนจากเครื่องสูบลมความร้อนจะนำมาใช้ในการอบแห้งในงานวิจัยนี้ ภาพแสดงอุปกรณ์ต่างๆ แสดงดังภาพที่ 4 ซึ่งประกอบไปด้วยห้องอบแห้งรูปทรงกระบอกทำด้วยเหล็กหุ้มด้วยฉนวน ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 เมตร และความยาว 1.2 เมตร โดยมีเครื่องสูบลมความร้อนขนาด 5.2 กิโลวัตต์ เป็นอุปกรณ์สร้างความร้อนให้แก่ห้องอบแห้งและมีปั๊มสุญญากาศแบบวงแหวน (liquid ring) ขนาด 1.2 กิโลวัตต์ เป็นอุปกรณ์ควบคุมความดันในห้องอบแห้ง โดยมีปั๊มน้ำขนาด 100 วัตต์ ทำหน้าที่จ่ายน้ำหล่อเย็นให้กับปั๊มสุญญากาศ เพื่อป้องกันการเสียหายที่จะเกิดขึ้นแก่ปั๊มสุญญากาศภายในห้องอบแห้งจะประกอบไปด้วยคอยล์อบแห้งทำมาจากท่อทองแดงและครีปสแตนเลส และถาดอบแห้งทำมาจากตะแกรงอลูมิเนียมขนาด 30 x 60 ตารางเซนติเมตร จำนวน 3 ชั้น มีโหลดเซลล์ (Load

cell) วางที่ด้านใต้ของถาดอบแห้งเพื่อวัดน้ำหนักวัสดุอบแห้ง ส่วนถึงน้ำเย็นทำมาจากสแตนเลสขนาด 1 x 1 x 0.3 ลูกบาศก์เมตร โดยมีคอยล์เย็นทำมาจากท่อทองแดงเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร ขนาดความยาวทั้งหมด 6 เมตร เชไขในถังน้ำเพื่อทำน้ำเย็นให้แก่ปั๊มสุญญากาศ สารทำความเย็นของเครื่องสูบลมความร้อน คือ R-22

2. วิธีการทดลอง

ในการทดลองเพื่อศึกษาค่าตัวแปรต่างๆ เครื่องสูบลมความร้อนจะเริ่มทำงานเพื่อสร้างความร้อนให้กับห้องอบแห้ง หลังจากได้อุณหภูมิตามต้องการแล้วปั๊มสุญญากาศจะเริ่มทำงานเพื่อควบคุมความดันในห้องอบแห้ง สำหรับการรักษาอุณหภูมิในห้องอบแห้งจะใช้วาล์วโซเลนอยด์ (Solenoid valve) เป็นตัวเปิดปิดการไหลของสารทำความเย็น เมื่ออุณหภูมิในห้องอบแห้งถึงค่าที่ตั้งไว้ วาล์วโซเลนอยด์ (Solenoid valve) จะเปิดให้สารทำความเย็นไหลไปสู่คอยล์ร้อนด้านนอก (External Condenser)

เพื่อช่วยในการระบายความร้อนทิ้ง จากการดึงความร้อนออกจากน้ำในถังน้ำเย็น ส่วนความดันในห้องอบแห้ง บั๊มสุญญากาศจะทำงานตลอดเวลาแต่จะมีวาล์วเปิดให้อากาศภายนอกไหลเข้าไปสู่ห้องอบแห้งเพื่อรักษาภาวะสุญญากาศให้ได้ตามเงื่อนไขการทดลอง โดยสภาวะที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสและ 55 องศาเซลเซียส ใช้ความดัน 0.2 บาร์ และที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ใช้ความดัน 0.2 บาร์ 0.5 บาร์ และ 0.7 บาร์ ความเร็วลม 0.5 m/s ทุกการทดลอง ผลการทดลองของทุกสภาวะที่ได้จะถูกเก็บเข้าไปในเครื่องเก็บข้อมูลเพื่อนำผลการทดลองนี้ไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

สำหรับวัสดุอบแห้งที่ใช้ในทดลองเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการทำนายปริมาณความชื้นจะใช้แครอท ข่าและกล้วยที่หั่นเป็นแว่น โดยทำการเลือกขนาดให้ใกล้เคียงกันที่สุดทุกชิ้น ซึ่งมีขนาดความหนาประมาณ 0.5 เซนติเมตรและเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 เซนติเมตร จากนั้นนำไปวางบนตะแกรงสำหรับอบแห้งจำนวน 3 ชั้น น้ำหนักเริ่มต้นของวัสดุอบแห้ง 1 กิโลกรัม เท่ากันทุกการทดลอง แล้วทำการอบแห้งตามสภาวะเงื่อนไขที่ได้กำหนดไว้จนกว่าน้ำหนักของวัสดุอบแห้งไม่เปลี่ยนแปลง ในระหว่างการอบแห้งจะทำการบันทึกผลการทดลองเข้าไปในเครื่องเก็บข้อมูลตลอดเวลาจนสิ้นสุดกระบวนการอบแห้ง ข้อมูลที่ทำการบันทึกประกอบไปด้วย น้ำหนักของวัสดุขณะอบแห้ง อุณหภูมิอากาศอบแห้ง และความดันภายในห้องอบแห้ง สำหรับคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุอบแห้งแสดงไว้ในตารางที่ 1

ผลการวิจัย

จากการทดลองพบว่าเมื่ออุณหภูมิอบแห้งเพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นและเมื่อความดันภายในห้องอบแห้งลดลงทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นเช่นกัน จากกราฟอบแห้งพบว่าอัตรา

การอบแห้งจะสูงเมื่อเวลาอบแห้งประมาณ 1-2 ชั่วโมงแรกและจะลดลงเรื่อย ๆ เมื่อเวลาการอบแห้งเพิ่มขึ้น โดยที่สภาวะอบแห้งอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความดัน 0.2 บาร์ มีอัตราการอบแห้งเร็วที่สุด ซึ่งใช้เวลาอบแห้ง 300 นาที สำหรับการอบแห้งแครอทเร็วกว่าการอบแห้งที่สภาวะอื่นอย่างน้อย 20 %

ในการทดลองจะทำการอบแห้งแครอทจนน้ำหนักไม่เปลี่ยนแปลงจึงถือว่าสิ้นสุดการอบแห้ง เมื่อนำผลการทดลองอบแห้งไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทำนายจากสมการจะพบว่าสมการการทำนายปริมาณความชื้นในวัสดุอบแห้งมีความคลาดเคลื่อนสามารถแสดงได้ในตารางที่ 2 โดยสมการที่ใช้ในการศึกษานี้สามารถอธิบายพฤติกรรมการอบแห้งของแครอทและสามารถใช้ทำนายปริมาณความชื้นในแครอทได้เป็นอย่างดี ซึ่งผลที่ได้จากการทำนายมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางแนวโน้มเดียวกันกับผลการทดลอง ($R\text{-Square} > 0.95$ และ Stand Error มีค่าเข้าใกล้ศูนย์) แสดงได้ในภาพที่ 5 และ 6 เมื่อนำสมการที่ได้ไปประยุกต์ใช้กับการอบแห้งวัสดุชนิดอื่น กำหนดให้วัสดุอบแห้งที่ใช้คือ กล้วยและข่า เนื่องจากวัสดุอบแห้งชนิดนี้สามารถกำหนดขนาดให้ใกล้เคียงกับแครอทได้และสามารถทำการอบแห้งได้ใกล้เคียงตามสมมุติฐานมากที่สุด แล้วทำการอบแห้งที่สภาวะอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความดัน 0.2 บาร์ โดยกำหนดการอบแห้งวัสดุทั้งสองชนิดนี้มีวิธีการอบแห้งแบบเดียวกับการอบแห้งแครอท ผลการทดลองแสดงได้ดังภาพที่ 7 และ 8 จากผลการทดลองพบว่าสมการที่ใช้สามารถทำนายปริมาณความชื้นและสามารถอธิบายพฤติกรรมการอบแห้งของวัสดุอบแห้งชนิดอื่นได้และให้ความสัมพันธ์ไปในทิศทางแนวโน้มเดียวกันกับผลการทดลอง ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายของการอบแห้งกล้วยและข่าแสดงได้ในตารางที่ 2 สำหรับข้อมูลผลการอบแห้งโดยรวมแสดงได้ดังตารางที่ 4

สมการที่ใช้ในการศึกษานี้สามารถนำมาทำนายลักษณะการกระจายตัวของความชื้นในวัสดุ

อบแห้งได้ โดยการทดลองทำนายการกระจายตัวของความชื้นจะใช้เงื่อนไขทดลองเดียวกันกับการอบแห้งและวัสดุอบแห้งที่ใช้ในการศึกษาคือ แครอท โดยในบทความนี้จะนำเสนอการกระจายตัวของความชื้นเฉพาะโหนดที่อยู่ในแนวแกน r และนำเสนอเฉพาะความชื้นที่แกนกลางและที่ผิวของแครอทที่เวลา 1 ชั่วโมง และ 5 ชั่วโมงเท่านั้น การทำนายแต่ละเงื่อนไขมีลักษณะแตกต่างกันออกไปดังแสดงในตารางที่ 3 การทำนายการกระจายตัวของความชื้นในวัสดุอบแห้งพบว่าความดันมีผลต่อการกระจายตัวของความชื้นในวัสดุอบแห้งมากกว่าอุณหภูมิอบแห้ง เช่น ที่เงื่อนไขอบแห้ง 60 องศาเซลเซียส ความดัน 0.2 บาร์ ที่เวลา 1 ชั่วโมง ความชื้นที่แกนกลาง (node 1) ของวัสดุอบแห้งมีค่าเท่ากับ 6.57 db. ความชื้นที่ผิววัสดุเท่ากับ 1.03 db. และที่เงื่อนไขอบแห้ง 50 องศาเซลเซียส ความดัน 0.2 บาร์ ที่เวลา 1 ชั่วโมง ความชื้นที่จุดกลางของวัสดุอบแห้งมีค่าเท่ากับ 6.77 db. ความชื้นที่ผิววัสดุเท่ากับ 1.07 db. โดยค่าที่ได้จากทั้งสองเงื่อนไขนี้ปริมาณความชื้นที่จุดกลางและที่ผิวแตกต่างกันประมาณ 3.0 % และ 3.7 % ตามลำดับ แต่เมื่อนำไปเทียบกับการอบแห้งที่สภาวะความดันแตกต่างกัน เช่น ที่สภาวะเงื่อนไขอบแห้ง 60 องศาเซลเซียส ความดัน 0.7 บาร์ ที่เวลา 1 ชั่วโมง ความชื้นที่จุดกลางของวัสดุอบแห้งมีค่าเท่ากับ 9.57 db. ความชื้นที่ผิววัสดุเท่ากับ 1.96 db. เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับเงื่อนไขอบแห้ง 60 องศาเซลเซียส ความดัน 0.2 บาร์ พบว่ามีค่าปริมาณความชื้นที่จุดกลางและที่ผิวแตกต่างกันสูงถึง 31.3 % และ 47.4 % ตามลำดับ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าความดันมีผลต่อปริมาณความชื้นและระยะเวลาการอบแห้งมากกว่าอุณหภูมิอบแห้ง

สรุปผลการวิจัย

การศึกษาสมการที่ใช้ในการทำนายปริมาณความชื้นของวัสดุอบแห้งชนิดต่างๆ โดยใช้หลักการถ่ายเทความร้อน การถ่ายเทมวลและทฤษฎีทางไฟไนท์อีลีเมนต์มาวิเคราะห์เกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลง

ปริมาณความชื้นในวัสดุอบแห้ง โดยใช้วัสดุอบแห้ง 3 ชนิดคือ แครอท ก้อยและข้าว ผลที่ได้จากการทำนายจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงเพื่อตรวจสอบความถูกต้อง จากการทดลองพบว่าเมื่ออุณหภูมิอบแห้งเพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นและเมื่อความดันภายในห้องอบแห้งลดลง ทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยที่สภาวะเงื่อนไขอบแห้ง 60 องศาเซลเซียส ความดัน 0.2 บาร์ จะมีอัตราการอบแห้งเร็วที่สุดและใช้เวลาอบแห้งน้อยที่สุด

สำหรับสมการที่ใช้ในการทำนายปริมาณความชื้น ผลที่ทำนายได้มีแนวโน้มสอดคล้องกับผลการทดลองอบแห้ง (R-Square > 0.95 และ Stand Error มีค่าเข้าใกล้ศูนย์) ซึ่งสามารถอธิบายพฤติกรรมของการอบแห้งของการอบแห้งแครอทได้ เมื่อนำสมการไปใช้ทำนายปริมาณความชื้นของการอบแห้งวัสดุชนิดอื่น โดยใช้วัสดุอบแห้งคือ ก้อยและข้าว พบว่าสมการที่ใช้ในการทำนายสามารถทำนายปริมาณความชื้นของวัสดุอบแห้งชนิดอื่นได้เช่นกัน และให้ความสัมพันธ์ไปในทิศทางแนวโน้มเดียวกันกับผลการทดลองเช่นเดียวกับการอบแห้งแครอท และยังพบว่าความดันที่ใช้ในการอบแห้งเป็นตัวแปรสำคัญในการอบแห้ง

สำหรับในงานวิจัยนี้เป็นการอบแห้งที่สภาวะสุญญากาศ ค่าคุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติทางความร้อนและค่าความชื้นสมดุลของวัสดุอบแห้งชนิดต่างๆ เป็นค่าที่ได้จากการทดลองที่สภาวะบรรยากาศปกติ ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อหาค่าที่ใช้สำหรับการอบแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศ ซึ่งจะช่วยให้การทำนายปริมาณความชื้นมีความแม่นยำมากขึ้น และเพื่อเป็นทางเลือกสำหรับการอบแห้ง ควรมีการศึกษาคุณภาพของวัสดุอบแห้งหลังจากทำการอบแห้ง

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยขอนแก่นและสถานจัดการและอนุรักษ์พลังงานมหาวิทยาลัยขอนแก่น (EMCO) ที่สนับสนุนทุนในการวิจัยเอื้อเพื่อสถานที่และอุปกรณ์การทดลองในการทำวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

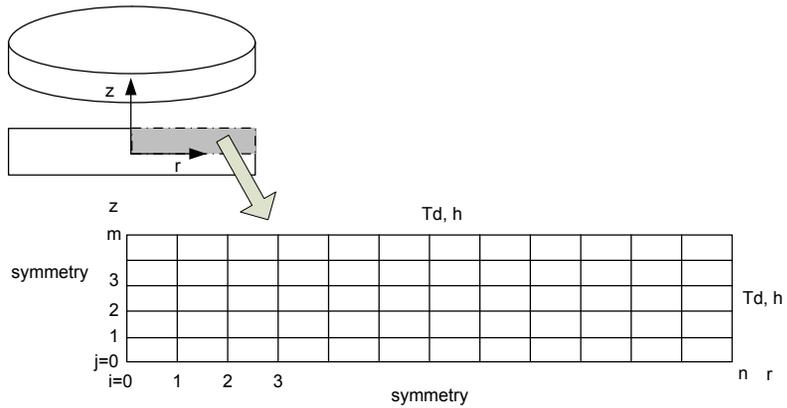
- Holkboer DH. Vacuum technology and space simulation. USA: Boston Technical Publishers; 1967.
- Alibas I. Energy consumption & colour characteristics of nettle leaves during microwave vacuum & convective drying. *J Agr Eng Res.* 2007; 96: 495-502.
- Abe T, Afzal TM. Thin-layer infrared radiation drying of rough rice. *J Agr Eng Res.* 1997; 67: 289-297.
- Omolola AO, Jideani AIO, Kapila PF. Modeling microwave drying kinetics and moisture diffusivity of Mabonde banana variety. *Int J Agric & Biol Eng.* 2014; 7(6): 107-113.
- Pekke MA, Pan ZL, Atungulu GG, Smith G, Thompson JF. Drying characteristics and quality of bananas under infrared radiation heating. *Int J Agric & Biol Eng.* 2013; 6(3): 58-70.
- Artnasaew A, Theerakulpisut S, Benjapi-yaporn C. Development of a vacuum heat pump dryer for drying chilli. *Biosyst Eng.* 2010; 105: 130-138.
- Soponronnarit S, Wetchacama S, Kanphukdee T. Seed drying using a heat pump. *Int Energ J.* 2001; 1: 97-102.
- Vazquez G, Chenlo F, Moreria R, Cruz E. Grape drying in a pilot plant with a heat pump. *Dry Technol.* 1997; 15: 899-920.
- Hande AR, Swami SB, Thakor NJ. Effect of drying methods and packaging materials on quality parameters of stored kokum rind. *Int J Agric & Biol Eng.* 2014; 7(4): 114-126.
- Luo D, Liu J, Liu Y, Ren G. Drying characteristics and mathematical model of ultrasound assisted hot-air drying of carrots. *Int J Agric & Biol Eng.* 2015; 8(4): 124-132.
- Duan X, Liu W, Ren GY, Liu WC, Liu YH. Comparative study on the effects and efficiencies of three sublimation drying methods for mushrooms. *Int J Agric & Biol Eng.* 2015; 8(1): 92-99.
- Siau JF. Transport process in wood. New York: Springer-Verlag; 1984.
- Camila AP, Chandan K, Fernanda DC, Karim MA. Heat and mass transfer modeling of the osmo-convective drying of yacon roots (*Smallanthus sonchifolius*). *Appl Therm Eng.* 2014; 63: 23-32.
- Cengel YA. Heat and Mass Transfer - A Practical Approach. 3rd edition. USA: McGraw-Hill; 2006.
- McAdam WH. Heat transmission. 3rd edition. USA: McGraw-Hill; 1954.
- Hussain MM, Dincer I. Two-dimensional heat and moisture transfer analysis of a cylindrical moist object subjected to drying: A finite-difference approach. *Int J Heat Mass Trans.* 2003; 46: 4033-4039.

17. Kadoya K, Matsunaga N, Nagashima A. Viscosity and thermal conductivity of dry air in the gaseous phase. *J Phys Chem Ref Data*. 1985; 14(4): 948-969.
18. Sweat VE, Rao MA, Rizvi SSH. *Thermal Properties of Foods*. 2nd edition. New York: Marcel Dekker; 1995.
19. Guohong L, Junruo C, Meihong L, Xinxin W. Shrinkage, porosity and density behaviour during convective drying of bio-porous material. *Procedia Eng*. 2012; 31: 634-640.
20. Zhengyong Y, Sousa-Gallagher MJ, Fernanda AR, Oliveira FA. Shrinkage and porosity of banana, pineapple and mango slices during air-drying. *J Food Eng*. 2008; 84: 430-440.
21. Serpil S, Servet GS. *Physical properties of foods*. New York: Springer-Verlag; 2006.

อักษรย่อ

C_p = ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (J/kg.K)
 D = สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของน้ำ (m²/s)
 d = เส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุอบแห้ง (m)
 g = ค่าแรงโน้มถ่วงโลก, 9.81 m²/s
 $Gr_D = Gr_c$ = Grashof number
 h_m = สัมประสิทธิ์การระเหย = 8.4×10^{-7} kg/(Pa.s.m²)
 h_i = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (W/m²K)
 k_a = ค่าการนำความร้อนของอากาศ (W/m K)
 k_T = ค่าการนำความร้อนวัสดุอบแห้ง (W/m K)
 L, L_D = ระยะทางการเกิดการถ่ายเทความร้อน (m)
 M = ปริมาณความชื้น (db.)
 M_c = ความยาวในแนวแกนที่ทำการหาค่าเฉลี่ย (m)
 M_w = Molecular weight (g/mol)
 P = ความดัน (Pa)
 P_{vc} = ความดันในห้องอบแห้ง (Pa)
 Pr = Prandtl number

R, R_v = ค่าคงที่ของแก๊ส = 8.314 J/(mol K)
 t = เวลา (min)
 T = อุณหภูมิ (°C)
 T_K = อุณหภูมิ (K)
 T_d = อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง (°C)
 T_s = อุณหภูมิที่ผิวของวัสดุอบแห้ง (K)
 α_p = ค่าคงที่สำหรับสมการถ่ายเทมวล
 α_T = ค่าคงที่สำหรับสมการถ่ายเทความร้อน
 β = สัมประสิทธิ์ทางความร้อน (K⁻¹) = $\frac{1}{T}$
 ω = ค่าความพรุน (%)
 ρ = ค่าความหนาแน่นของวัสดุอบแห้ง (kg/m³)
 ρ_v = ค่าความหนาแน่นของไอน้ำ (kg/m³)
 μ = Dynamic viscosity (Pa.s)
 ν = Kinematic viscosity (m²/s)
 Δi = ระยะระหว่างโหนดในแนวแกน r (m)
 Δj = ระยะระหว่างโหนดในแนวแกน z (m)



ภาพที่ 1 แสดงการแบ่งโหนดบนวัสดุอบแห้ง

$$\frac{\partial P(r, m, t)}{\partial z} = P_{vc} \quad -D \frac{\partial M(r, m, t)}{\partial z} = h_m (M_f - M) \quad -k_r \frac{\partial T(r, m, 0)}{\partial z} = h_t (T_s - T_{vc})$$

Symmetry

$$\frac{\partial P(0, z, t)}{\partial r} = 0$$

$$\frac{\partial M(0, z, t)}{\partial r} = 0$$

$$\frac{\partial T(0, z, t)}{\partial r} = 0$$

$$P(r, z, 0) = P_{sat,0}$$

$$M(r, z, 0) = M_0$$

$$T(r, z, 0) = T_0$$

$$\frac{\partial P(n, z, t)}{\partial r} = P_{vc}$$

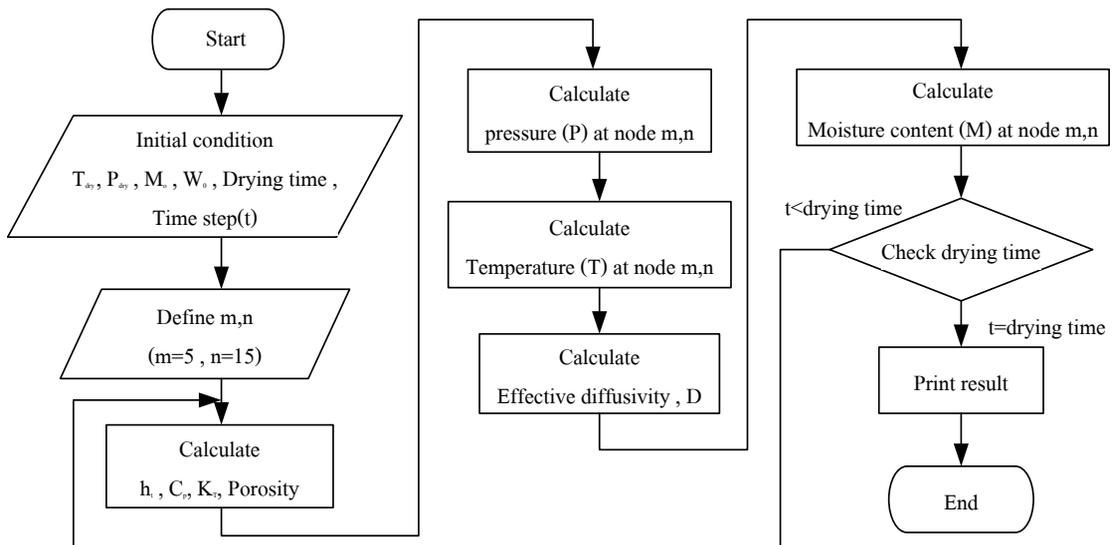
$$-D \frac{\partial M(n, z, t)}{\partial r} = h_m (M_f - M)$$

$$-k_r \frac{\partial T(n, z, 0)}{\partial r} = h_t (T_s - T_{vc})$$

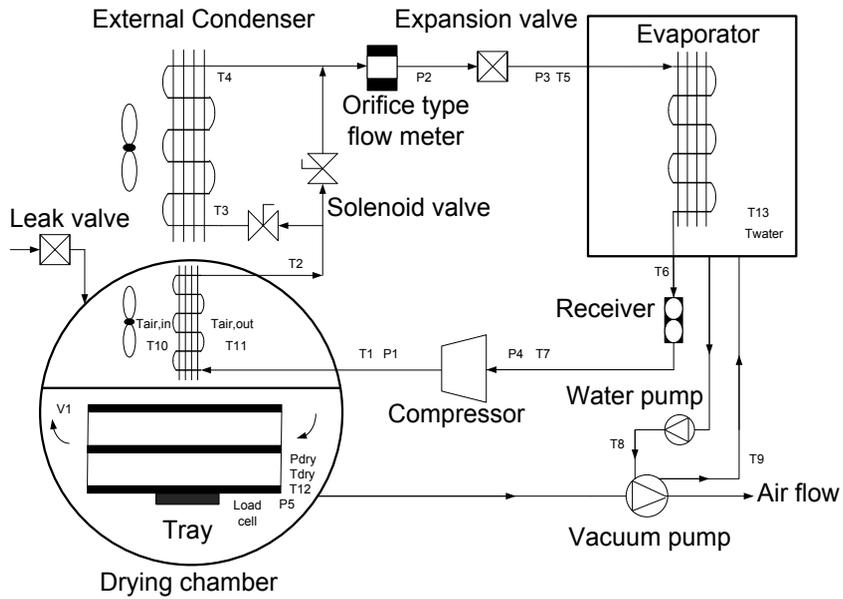
$$\frac{\partial P(r, 0, t)}{\partial z} = 0 \quad \frac{\partial M(r, 0, t)}{\partial z} = 0 \quad \frac{\partial T(r, 0, t)}{\partial z} = 0$$

Symmetry

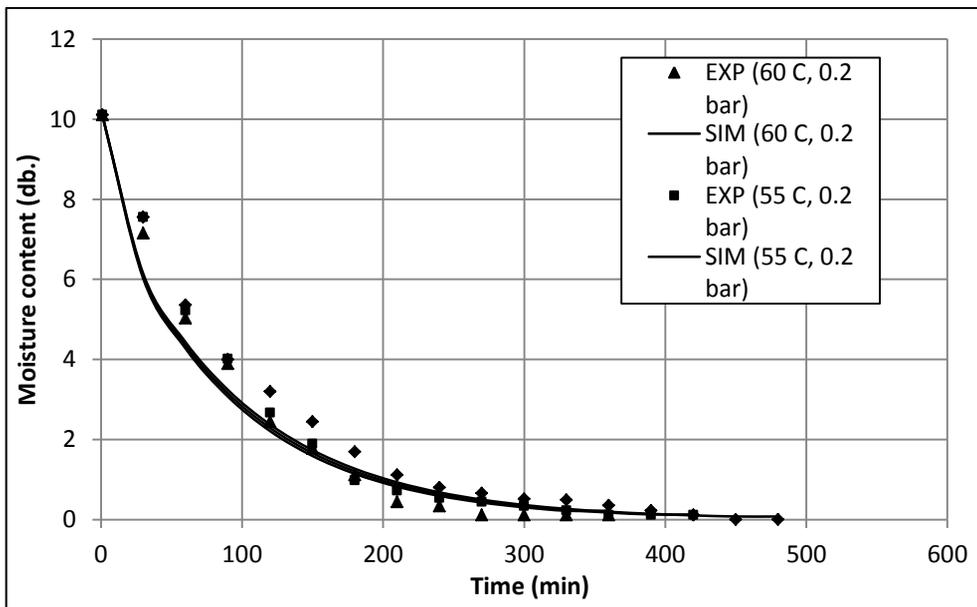
ภาพที่ 2 ขอบเขตเงื่อนไขที่ใช้ในการคำนวณ



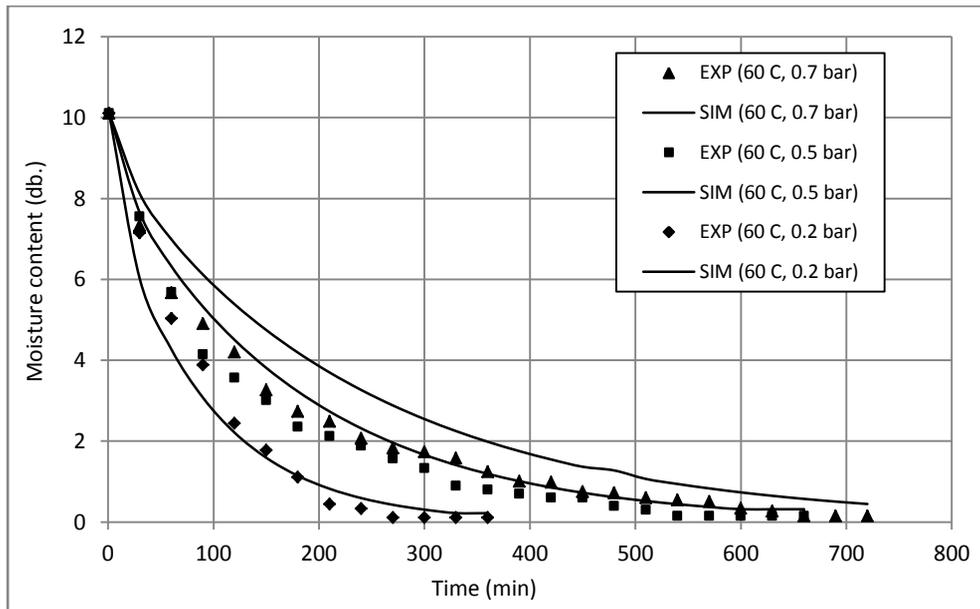
ภาพที่ 3 ขั้นตอนการคำนวณ



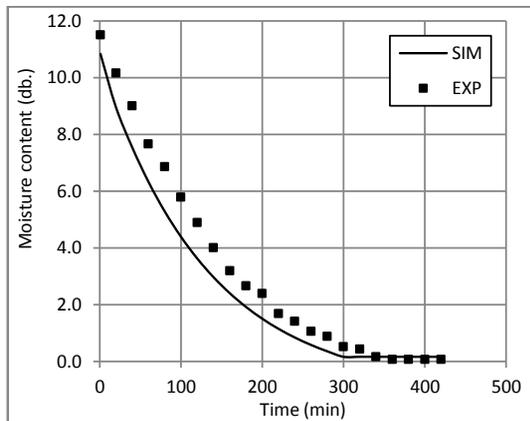
ภาพที่ 4 ส่วนประกอบและหลักการทำงานของเครื่องอบแห้ง



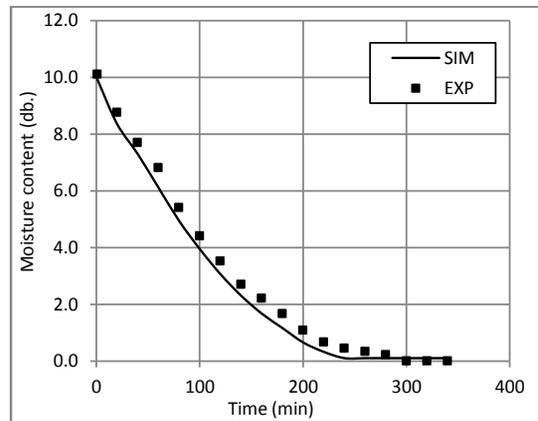
ภาพที่ 5 การเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการทำนายปริมาณความชื้นและผลการทดลองที่อุณหภูมิอบแห้งต่างกัน



ภาพที่ 6 การเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการทำนายปริมาณความชื้นและผลการทดลองที่ความดันอบแห้งต่างกัน



ภาพที่ 7 การเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทำนายปริมาณความชื้นและผลการทดลอง (กล้วยอบแห้งที่ 60 องศาเซลเซียส ความดัน 0.2 บาร์)



ภาพที่ 8 การเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทำนายปริมาณความชื้นและผลการทดลอง (ข้าวอบแห้งที่ 60 องศาเซลเซียส ความดัน 0.2 บาร์)

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางความร้อนของแครอท กกล้วย และข้าว

Drying product	C_p (kJ/kg K)	K_T (W/m °C)	ω (%)
แครอท	1.40+3.22M [18]	0.148+0.493M [18]	26 [19]
กล้วย	1.675+0.025M [18]	0.253+0.57M [18]	6 [20]
ข้าว	1.58+0.038M [18]	0.278+0.621M [18]	7 [21]

ตารางที่ 2 ค่าความคลาดเคลื่อนของปริมาณความชื้นในวัสดุอบแห้งระหว่างค่าที่ทำนายได้และผลการทดลอง

Product	Drying condition	R Square	Standard Error
แครอท	60 °C 0.2 bar	0.974	0.56
	60 °C 0.5 bar	0.987	0.30
	60 °C 0.7 bar	0.977	0.39
	55 °C 0.2 bar	0.964	0.60
	50 °C 0.2 bar	0.972	0.49
กล้วย	60 °C 0.2 bar	0.988	0.35
ข้าว	60 °C 0.2 bar	0.995	0.21

ตารางที่ 3 การทำนายปริมาณความชื้นที่แกนกลางและผิวของแครอทที่เวลาต่างกัน

Drying condition	Initial moisture content		Moisture content at 1 hr.		Moisture content at 5 hr.	
	Center (db.)	Surface (db.)	Center (db.)	Surface (db.)	Center (db.)	Surface (db.)
60 °C 0.2 bar	10.11	10.00	6.57	1.03	0.47	0.07
60 °C 0.5 bar	10.11	10.07	9.01	1.67	2.44	0.41
60 °C 0.7 bar	10.11	10.08	9.57	1.96	3.70	0.64
55 °C 0.2 bar	10.11	10.00	6.67	1.05	0.51	0.08
50 °C 0.2 bar	10.11	10.00	6.77	1.07	0.56	0.09

ตารางที่ 4 แสดงข้อมูลโดยรวมของผลการอบแห้งสำหรับวัสดุอบแห้งชนิดต่างๆ

Product	Drying Condition	Initial moisture content (db.)	Final moisture content (db.)	Drying time (min)
แครอท	60 °C 0.2 bar	10.11	0.11	300
	60 °C 0.5 bar	10.11	0.15	450
	60 °C 0.7 bar	10.11	0.15	480
	55 °C 0.2 bar	10.11	0.11	360
	50 °C 0.2 bar	10.11	0.11	420
กล้วย	60 °C 0.2 bar	11.50	0.07	420
ข้าว	60 °C 0.2 bar	10.23	0.22	340