แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งมะพร้าวขูดด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบด

A Mathematical Model for Batch Drying of Chopped Coconut Using Fluidized bed Dryer

อาณัติ พิลา[1,*], ฐานิตย์ เมธิยานนท์[1] และ สมชาติ โสภณรณฤทธิ์[2]

[1] ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
140 ถนนเชื่อมสัมพันธ์ แขวงกระทุ่มราย เขตหนองจอก กรุงเทพฯ 10530
[2] คณะพลังงาน สิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
91 ถนนประชาอุทิศ แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10400
*ติดต่อ: โทรศัพท์: 0-2988-3655 ต่อ 3113, โทรสาร: 0-2988-3655 ต่อ 3106
*E-mail: arnut_phila@hotmail.com

บทคัดย่อ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดแบบไม่สมดุลทางความร้อนและความชื้นที่ได้สร้างขึ้นนี้อาศัยหลักของการสมดุลมวลสาร สมดุลพลังงาน สมบัติทางกายภาพของมะพร้าวขูด และสมการเอมไพริคัลของการลดลงของความชื้น ในแบบจำลองนี้พิจารณาว่าอากาศที่ไหลในห้องอบแห้งมีการเคลื่อนที่เป็นแบบจุกอัด (Plug flow) ส่วนสมการเชิงอนุพันธ์ที่เกี่ยวข้องได้หาคำตอบโดยวิธีผลต่างสืบเนื่องด้วยระเบียบวิธีแบบแครงน์-นิโคลสัน ซึ่งให้ความแม่นยำสูงและเป็นที่นิยมใช้โดยทั่วไป แบบจำลองที่ได้พัฒนาขึ้นนี้ถูกใช้ในการทำนายอุณหภูมิและความชื้นของผลิตภัณฑ์รวมไปถึงความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ เมื่อนำผลการจำลองมาทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลองพบว่า ผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองกับผลการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งอุณหภูมิ ความชื้นของผลิตภัณฑ์และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่เวลาและตำแหน่งต่างๆ

คำหลัก: การลดลงของความชื้น, การทำนาย, ค่าการแพร่ความชื้นประสิทธิผล, มะพร้าวขูด, แบบไม่สมดุล

Abstract

Mathematical modeling of fluidized bed drying based on transient states of heat and moisture had been developed. The mass and energy conservation, the physical properties of chopped coconut, as well as the empirical equation of moisture reduction were taken into account. In this model, drying air in the chamber was considered as plug flow. The governing partial-differential equations were formed in terms of finite different and solved by Crank-Nicolson method, widely used and with good accuracy. The model was set-up to predict temperature and moisture-content of the product, as well as drying-air humidity. When compared with the experimental results in terms of temperatures, moisture content, and air humidity in various drying times and positions, the simulation results showed the well validations of the model.

Keywords: the reduction of moisture, prediction, effective diffusivity, chopped coconut, not balanced

1. บทนำ

มะพร้าวขูดอบแห้ง (Desiccated Coconut) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแปรรูปจากมะพร้าวอีกประเภทหนึ่ง สามารถที่จะนำไปใช้ในการบริโภคได้หลากหลายรูปแบบ โดยทั่วไปแล้วมะพร้าวขูดอบแห้งมักจะนำไปใช้เป็นส่วนประกอบในการทำเบเกอรี่ ขนมหวาน โดนัท และไอศกรีม ฯลฯ ซึ่งมะพร้าวขูดที่ทำการแปรรูปแล้วยังเป็นสินค้าที่สามารถสร้างรายได้และกำไรได้ในระดับดี แต่ในปัจจุบันอุตสาหกรรมอาหารยังไม่สามารถที่จะผลิตมะพร้าวขูดได้ทันความต้องการของผู้บริโภค [1]

ในปัจจุบันการผลิตมะพร้าวขูดสามารถผลิตได้โดยใช้เครื่องอบแห้งแบบต่างๆ อาทิเช่น เครื่องอบแห้งแบบหมุน และเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด ซึ่งแต่ละวิธีก็จะมีเทคนิคและวิธีการที่แตกต่างกันไป แต่โดยทั่วไปหลักการของกระบวนการอบแห้งจะเป็นวิธีการไล่ความชื้นออกจากวัสดุโดยการระเหย ซึ่งส่วนใหญ่จะอาศัยอากาศเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน อัตราการอบแห้งของผลิตภัณฑ์จะช้าหรือเร็วเพียงใดขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง ประโยชน์ของการอบแห้งจะช่วยทำให้สามารถรักษาผลิตภัณฑ์ไว้ได้นาน ป้องกันการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ซึ่งเป็นสาเหตุของการเน่าเสีย และยังสามารถที่จะเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์ได้อีกด้วย สำหรับเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดนั้น เป็นเครื่องอบแห้งที่สามารถอบแห้งผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นสูงให้ลดลงได้อย่างรวดเร็ว ทั่วถึงและสม่ำเสมอภายในระยะเวลาสั้นๆ เนื่องจากตัวกลางกับผลิตภัณฑ์สามารถสัมผัสกันได้อย่างดี แล้งยังสามารถนำเอาพลังงานความร้อนที่ผ่านกระบวนการอบแห้งแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ลักษณะของเครื่องมีขนาดไม่ใหญ่มากนัก แต่ให้กำลังผลิตสูง ลดปัญหาในการซ่อมแซมและบำรุงรักษา เพราะชิ้นส่วนของเครื่องอบไม่มีการเคลื่อนไหว แต่ผลิตภัณฑ์จะเป็นตัวเคลื่อนที่จากการถูกเป่าดันด้วยลมร้อนแทน

ในการอบแห้งสิ่งสำคัญที่เราจำเป็นต้องทราบ คือ เงื่อนไขสภาวะแบบใดที่จะเหมาะสมที่สุดในการอบแห้ง เราจะใช้ข้อกำหนดเหล่านี้ในการเริ่มต้นที่จะทำการออกแบบเครื่องอบแห้งที่เหมาะสม ในการออกแบบเพื่อให้มีความรวดเร็วยิ่งขึ้นแทนที่จะทำการทดลองแบบลองผิดลองถูกที่สภาวะเงื่อนไขที่ต่างๆ ของการอบแห้ง แต่ในการหาคำตอบของข้อกำหนดนี้สามารถทำได้โดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งมะพร้าว ซึ่งอาศัยหลักการของการถ่ายเทความร้อนและมวล ทฤษฎีทางเทอร์โมไดนามิกส์ ร่วมกับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นที่ได้จากการทดลอง ก็จะมีความถูกต้องและมีความเป็นไปได้มากแม้ว่าจะหาสามารถคำตอบได้ค่อนข้างยาก แต่ในปัจจุบันคอมพิวเตอร์มีการพัฒนาไปค่อนข้างมาก ดังนั้นในการคำนวณหาโดยใช้แบบจำลอง ก็จะสามารถหาคำตอบได้รวดเร็วยิ่งขึ้น

2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้ง

2.1 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการถ่ายเทความร้อนโดยเทคนิคฟลูอิดไดเซชัน

ในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการถ่ายเทความร้อนโดยเทคนิคฟลูอิดไดเซชันด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบงวด มีสมมุติฐานในการพิจารณาดังต่อไปนี้

(1) แบบจำลองเป็นแบบไม่สมดุลความร้อนและความชื้นระหว่างอนุภาคและอากาศ

(2) สมมุติให้อนุภาคภายในเบดคลุกเคล้ากันดี (Well-mixing)

(3) การไหลของอากาศเป็นแบบลูกสูบหรือจุกอุด (Plug Type)

(4) ไม่มีการถ่ายเทความร้อนระหว่างมะพร้าวขูด

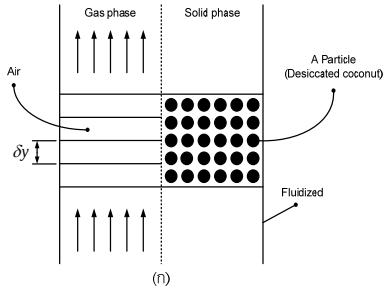
(5) ไม่มีการหดตัวของอนุภาคในระหว่างกระบวนการอบแห้ง

(6) ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศในแนวรัศมี

ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด ถูกพัฒนามาจากสมการอนุรักษ์มวล สมการอนุรักษ์พลังงาน ทฤษฎีทางเทอร์โมไดนามิกส์ และสมการชั้นบางเพื่อใช้ในการทำนายการลดลงของความชื้น

2.2 หลักการของพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของอากาศและอนุภาคภายใต้สภาวะฟลูอิดไดซ์เบด

ในการพิจารณาปริมาตรควบคุมจะทำการแบ่งสถานะของของไหลออกเป็น 2 ส่วน เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ คือ ในส่วนที่เป็นอากาศกับอนุภาค ดังรูปที่ 1 ซึ่งการเคลื่อนที่ของอากาศจะเป็นแบบลูกสูบหรือจุกอุด (Plug Type) ตามสมมุติฐานข้อที่ 3



รูปที่ 1 การแบ่งสถานะของของไหล

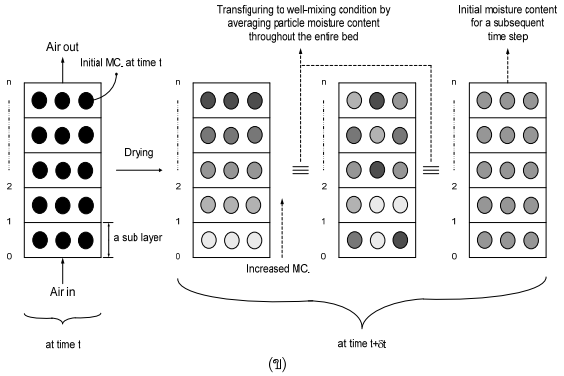
จากรูปที่ 2 แสดงพฤติกรรมของการอบแห้งที่เวลา t ไปยังตำแหน่งที่เวลา $t+\delta t$ โดยในช่วงเวลา δt ความร้อนที่ได้รับจากอากาศจะถูกถ่ายเทไปยังผลิตภัณฑ์ จะสังเกตได้ว่าความชื้นของผลิตภัณฑ์มีค่าลดลง ในชั้นล่างจะมีค่าความชื้นที่น้อยกว่าชั้นบน เนื่องจากอุณหภูมิของอากาศจะมีค่าลดลงไปตามความสูงที่เพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจากการถ่ายเทความร้อนให้กับผลิตภัณฑ์ และจากนั้นจะทำการเฉลี่ยค่าของความชื้นเพื่อที่จะนำไปเป็นค่าความชื้นที่เวลา t ในรอบถัดไป

2.3 สมดุลความชื้นของอนุภาค

ในการวิเคราะห์เฟสที่เป็นอนุภาคจะพิจารณาอิลิเมนต์ขนาดเล็ก (Infinitesimal element) และมีปริมาตรเป็น δV มวลของน้ำที่ระเหยสามารถหาได้จากสมการ

$$\dot{m}_w = -\delta m_{dp}\left(\frac{\partial M}{\partial t}\right) \qquad (1)$$

เมื่อ $\dot{m}_w$ คืออัตราการระเหยของน้ำ (kg/s), m_{dp} คือมวลของมะพร้าวขูดในเบด (kg), M คือความชื้นเฉลี่ยของมะพร้าวขูด (%d.b.)



รูปที่ 2 พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของอากาศและอนุภาคภายใต้สภาวะฟลูอิดไดซ์เบด

2.4 สมดุลความชื้นในอากาศ

พิจารณาสมดุลมวลอากาศแห้งระหว่างตำแหน่งที่ 1 ไปยังตำแหน่งที่ 2 การเปลี่ยนแปลงของความชื้นของอากาศ สามารถหาได้จากสมการ

$$\frac{\partial W}{\partial t} + v_a \frac{\partial W}{\partial y} = -\frac{\partial M}{\partial t}\frac{\delta m_{dp}}{\dot{m}_a \delta t} \qquad (2)$$

เมื่อ W คืออัตราส่วนความชื้น (kg/kg), δy คือชั้นของความสูงตามแนวแกน y (m), δt คือช่วงเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ (s), $\dot{m}_a$ คืออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (kg/s)

2.5 สมดุลพลังงานสำหรับอากาศ

ในการวิเคราะห์เฟสที่เป็นอากาศจะพิจารณาปริมาตรของอากาศขนาดเล็ก ซึ่งเคลื่อนที่ไปตามกระแสอากาศ โดยเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางของการไหลจากตำแหน่งเริ่มต้น (ตำแหน่งที่ 1) ที่เวลา t_1 ไปยังตำแหน่งสุดท้าย (ตำแหน่งที่ 2) ที่เวลา t_2 โดยเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่มีค่าเท่ากับ $t_2 - t_1 = \delta t$

$$\frac{\partial T}{\partial t}+v_a\frac{\partial T}{\partial y}=\frac{-h'A(T-\theta)}{[\dot{m}_a C_a+\dot{m}_a W(t)C_v]\delta t} \quad (3)$$

เมื่อ T คืออุณหภูมิของอากาศ ($^{\circ}$C), v_a คือความเร็วของอากาศที่ไหลภายในเบด (m/s), h' คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (kW/m^{2}K), A คือพื้นที่ที่มีการถ่ายเทความร้อน (m^2), θ คืออุณหภูมิของมะพร้าวขูด ($^{\circ}$C), C_a คือความร้อนจำเพาะของอากาศ (kW/m^{2}K), C_v คือความร้อนจำเพาะของไอน้ำ (kW/m^{2}K)

2.6 สมการสมดุลพลังงานสำหรับอนุภาค

ในการวิเคราะห์เฟสที่เป็นอนุภาคจะพิจารณาอิลิเมนต์ขนาดเล็ก (Infinitesimal element) และมีปริมาตรเป็น δV จากสมการอนุรักษ์พลังงานจะได้ว่า

$$\frac{\partial \theta}{\partial t}=\frac{h'A(T-\theta)}{[\delta m_{dp}C_{dp}+\delta m_{dp}M(t)C_w]}+\frac{\partial M(t)}{\partial t}\frac{(h_v-C_w\theta)}{[C_{dp}+M(t)C_w]} \quad (4)$$

รูปแบบของสมการการอบแห้งชั้นบางที่ได้สามารถที่จะนำไปคำนวณหาค่าการแพร่กระจายความชื้นประสิทธิผล [2] ดังแสดงในสมการดังต่อไปนี้

$$D_{\text{eff}}=0.000802\exp\left(\frac{-3120.247}{T_{abs}}\right) \quad (5)$$

โดยมีสภาวะเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขต ดังนี้

เงื่อนไขสภาวะเริ่มต้น

$$t=0 \quad \begin{cases} M=M_{in} \\ \theta=\theta_{in} \end{cases}$$

เงื่อนไขสภาวะขอบเขต

$$t>0 \quad \begin{cases} W=W_{in} \\ T=T_{in} \\ M_{bed}=\frac{1}{n}\sum_{i=0}^{n}M_i \\ \theta_{bed}=\frac{1}{n}\sum_{i=0}^{n}\theta_i \end{cases}$$

เมื่อ h_v คือความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ (kJ/kg), C_w คือความร้อนจำเพาะของน้ำ (kW/m^{2}K), D_{eff} คือสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (m^2/s), T_{abs} คืออุณหภูมิของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง ($^{\circ}$C), i คือ ชั้นบางในชั้นที่ i

3. ระเบียบวิธีทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการหาคำตอบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งมะพร้าวขูดแบบไม่สมดุล

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้ในการแก้ปัญหาทางวิศวกรรมและวิทยาศาสตร์ โดยส่วนใหญ่แล้วจะประกอบด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ต่างๆ ที่สอดคล้องกัน สมการเชิงอนุพันธ์เหล่านี้โดยปรกติจะอยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่ต่างชนิดกันจำเป็นต้องใช้ระเบียบเชิงตัวเลขที่แตกต่างกันไปด้วย การแก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยเหล่านี้ปรกติแล้วมักจะทำโดย (1) การใช้ระเบียบวิธีทางคณิตศาสตร์ชั้นสูง (Advanced mathematics) เพื่อหาผลเฉลยแม่นตรง (Exact solution) และ (2) การใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อผลเฉลยโดยประมาณ (Approximate solution)

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่อง (Finite Difference Method) ระเบียบวิธีแบบแครงน์-นิโคลสัน สำหรับการสร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้โปรแกรม Microsoft Visual Basic 6.0 สำหรับคอมพิวเตอร์ 32 บิท เนื่องจากเป็นระเบียบวิธีที่นิยมนำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้ง

4. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการดำเนินงานวิจัย

4.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

มะพร้าวที่ใช้ในการทดลองจะถูกนำมาปลอกเปลือกและกะเทาะเปลือกออก แล้วจึงนำส่วนที่เป็นเนื้อมะพร้าวมาล้างในน้ำที่สะอาดเพื่อกำจัดเศษผงและฝุ่นออกเสียก่อน แล้วนำไปแช่น้ำที่ผสมกับสารละลายคลอรีน 50-ppm เป็นเวลา 15 นาที เพื่อฆ่าเชื้อโรคและป้องกันการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ [3]

จากนั้นนำมะพร้าวที่ได้ไปขูดด้วยเครื่องขูดมะพร้าว ซึ่งจะได้ตัวอย่างของมะพร้าวขูดที่มีขนาดไม่สม่ำเสมอกัน ดังนั้นขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของมะพร้าวขูดจึงสามารถหาได้จากการนำตัวอย่างไปคัดแยกขนาดด้วยเครื่อง Sieve Analysis [4]

ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (The mean diameter, d_m) คือ

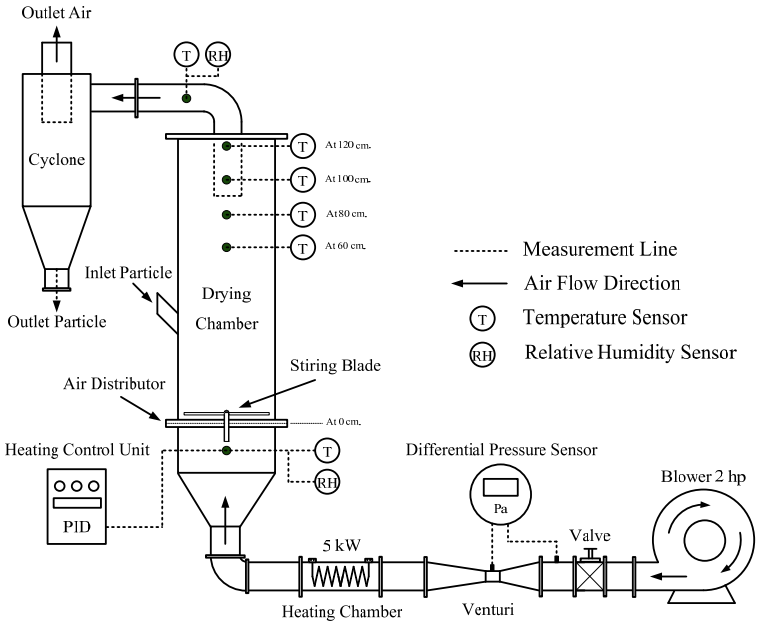
$$d_m = \frac{1}{\sum xi/di} = \frac{1}{0.43815} = 2.2823 \text{ mm.}$$

ความชื้นเริ่มต้นของมะพร้าวขูดที่นำมาทดสอบอยู่ที่ประมาณ 105±15% (dry basis) หาโดยการนำเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 103°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง หรือจนกระทั่งน้ำหนักไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง [5]

5.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

5.2.1 ลักษณะของเครื่องอบแห้ง

เครื่องอบแห้งที่ใช้ในการทดลองถูกออกแบบเพื่อทำการศึกษาพฤติกรรมการอบแห้งมะพร้าวขูดด้วยเทคนิคฟลูอิไดซ์เบดแบบงวด ส่วนประกอบหลักๆ ของเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบด มีดังต่อไปนี้



รูปที่ 3 ไดอะแกรมเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบด

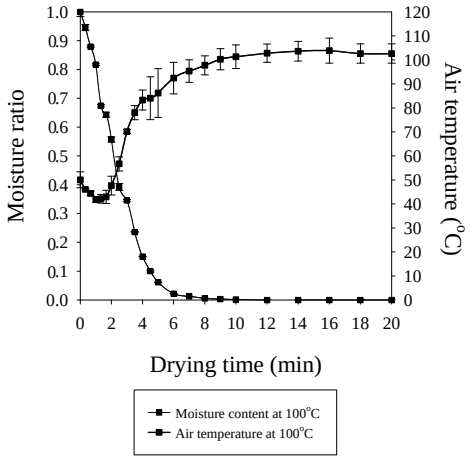
ห้องอบแห้ง ขดลวดความร้อนขนาด 4 kW พัดลมแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางขนาด 1 hp ไซโคลน ชุดเวนจูรี และชุดใบกวน ดังแสดงรูปที่ 3 โดยที่ห้องอบแห้งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10.2 cm สูง 80 cm อุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าห้องอบแห้งจะถูกควบคุมโดยใช้ตัวควบคุมกระแส (Dimmer control) ซึ่งทำการติดตั้งสายวัดอุณหภูมิชนิด K ไว้ด้านล่างของแผ่นกระจายอากาศ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนเข้าและออกจากห้องอบแห้งวัดได้จากจาก Relative Humidity sensor และ Temperature sensor โดยทำการบันทึกค่าทุกๆ 30 วินาทีจนกระทั่งหยุดการทดลอง ความเร็วของอากาศจะถูกกำหนดให้มีค่าคงที่ 2.5±0.1 m/s ทุกๆ เงื่อนไขของการทดลองโดยมีวาล์วเป็นตัวควบคุมอัตราการไหลของอากาศและใช้ชุดเวนจูรีเป็นตัววัดปริมาณการไหลของอากาศ ส่วนไซโคลนมีไว้สำหรับคัดแยกมะพร้าวขูดออกจากกระแสอากาศในส่วนที่เกิดการหลุดลอยออกจากห้องอบแห้ง และชุดใบกวนมีไว้สำหรับป้องกันปัญหาการเกาะตัวของมะพร้าวขูดที่ใช้ในการทดลอง

5.2.2 วิธีการทดลอง

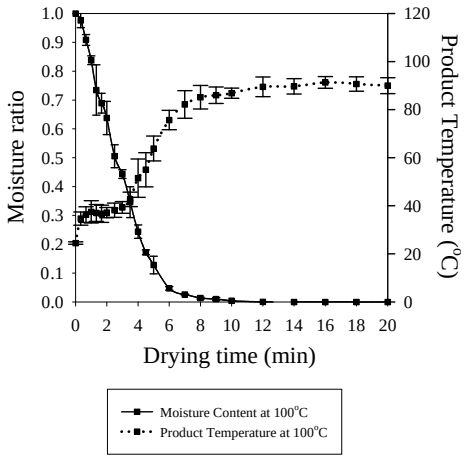
หลังจากนั้นทำการทดลองการอบแห้งมะพร้าวขูดที่เงื่อนไขอุณหภูมิ 100°C ด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบด ทำการเปิดพัดลม ชุดขดลวดความร้อนพร้อมทำการปรับค่าอุณหภูมิและความเร็วลมให้ได้ตามเงื่อนไขของการทดลองอย่างน้อยเป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้ระบบอยู่ในสภาวะคงที่ จากนั้นทำการใส่มวลของมะพร้าวขูด 200±5g ลงในห้องอบแห้ง ทำการเก็บตัวอย่างของมะพร้าวขูดทุกๆ 20 วินาที ในช่วงเวลา 2 นาทีแรก ทุกๆ 30 วินาที ในช่วงเวลา 2-5 นาที ทุกๆ 1 นาที ในช่วงเวลา 5-10 นาที และทุกๆ 2 วินาที ในช่วงเวลา 10-20 นาที แล้วนำตัวอย่างที่ได้บรรจุลงในภาชนะที่ทำการหุ้มฉนวนกันความร้อนอย่างดี เพื่อทำการวัดอุณหภูมิเฉลี่ยของวัสดุทดลอง หลังจากนั้นนำไปใส่ในถุงพลาสติก (Polyethylene bag) ทำการปิดผนึกด้วยความร้อน แล้วนำไปบรรจุลงในกล่องที่มีสารดูดความชื้นบรรจุอยู่ ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้งทุกๆ เงื่อนไขของการทดลอง แล้วนำค่าการลดลงของความชื้นที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย

4. ผลการทดลอง และการวิเคราะห์

4.1 ทดลองหาข้อมูลของความชื้น (ชั้นหนา) โดยใช้เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบด



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของความชื้นอุณหภูมิของอากาศกับระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งที่เงื่อนไขอุณหภูมิ 100°C



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของความชื้นอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์กับระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งที่เงื่อนไขอุณหภูมิของอากาศ 100°C

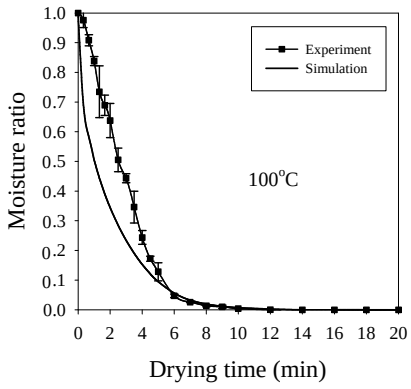
จากรูปที่ 4-5 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความชื้นของมะพร้าวขูดเทียบกับระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งภายใต้เงื่อนไข ความชื้น และความเร็วของกระแสอากาศที่มีค่าคงที่ ที่เงื่อนไขอุณหภูมิ 100°C มะพร้าวซึ่งมีลักษณะโครงสร้างคล้ายๆ กับผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรทั่วๆ ไป ซึ่งผลิตภัณฑ์โดยทั่วไปส่วนใหญ่มักมีโครงสร้างภายในเป็นรูพรุน ผลิตภัณฑ์ที่มีโครงสร้างลักษณะนี้สามารถที่จะแบ่งช่วงของการอบแห้งออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงแรกเป็นช่วงที่มะพร้าวยังมีความชื้นที่บริเวณผิวสูงอยู่ จะสามารถสังเกตในช่วงที่หนึ่งในสองของระยะเวลาในการอบแห้งทั้งหมด การอบแห้งแบบนี้มักเป็นแบบอัตราการอบแห้งคงที่ โดยในช่วงเดียวกันนี้ไอน้ำจะเคลื่อนที่จากบริเวณผิววัสดุไปยังกระแสอากาศ เพราะผิววัสดุที่มีปริมาณน้ำอยู่เป็นจำนวนมาก อุณหภูมิและความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิวก็จะคงที่ด้วย ซึ่งส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและอัตราการอบแห้งคงที่ด้วย จึงส่งผลอุณหภูมิของอากาศและมะพร้าวมีค่าคงที่ และเมื่อความชื้นของมะพร้าวมีความชื้นต่ำลงจนถึงความชื้นวิกฤต (ความชื้นที่ผิววัสดุเริ่มหมดไป) น้ำจากภายในเนื้อวัสดุจะเคลื่อนที่มายังผิวของวัสดุในรูปของของเหลวหรือไอ

น้ำ แล้วจึงระเหยเคลื่อนที่ไปยังกระแสอากาศ อุณหภูมิของวัสดุและอุณหภูมิของอากาศก็จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นด้วยตามความชื้นที่มีค่าลดลง ซึ่งจะสามารถสังเกตได้จากช่วงที่สองของการอบแห้ง หลังจากนั้นความชื้นจะลดลงได้อย่างช้าๆ เพราะว่าในช่วงนี้ความชื้นจะถูกควบคุมโดยโครงสร้างภายในเนื้อของวัสดุ จนกระทั่งเหลือความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 3-5%d.b. (dry basis)

5. เปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้น

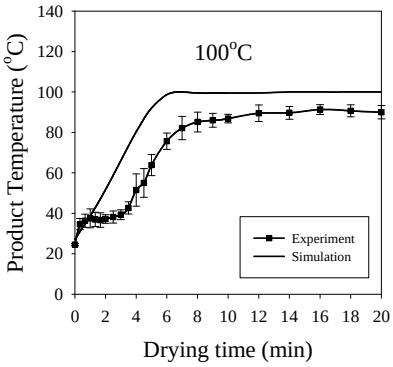
5.1 ความชื้นของมะพร้าว

พิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของมะพร้าวกับระยะเวลาในการอบแห้ง ที่เงื่อนไขอุณหภูมิ 100°C สังเกตได้ว่าผลที่ได้จากแบบจำลองแบบไม่สมดุลกับผลที่ได้จากการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่า ความชื้นที่ได้จากแบบจำลองแบบไม่สมดุลมีค่าต่ำกว่าในช่วงแรก โดยช่วงเวลาดังกล่าวคือ ที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 0-6 นาที ทั้งนี้เนื่องจากช่วงแรกของการอบแห้ง มะพร้าวยังไม่เกิดการฟุ้งกระจาย (ยังเกิดฟลูอิไดซ์เซชั่นไม่สมบูรณ์) และเนื่องจากมะพร้าวมีความชื้นที่ผิวสูงจึงทำให้ปรากฏช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ จึงทำให้ความชื้นที่ได้ในช่วงแรกจากแบบจำลองมีค่าต่ำกว่าผลที่ได้จากการทดลอง



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของความชื้นกับระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งที่เงื่อนไขอุณหภูมิของอากาศ 100°C ที่ได้รับจากแบบจำลองแบบไม่สมดุลกับผลที่ได้จากการทดลอง

หลังจากที่มะพร้าวมีความชื้นลดลง มะพร้าวจะเริ่มเกิดการฟุ้งกระจาย ซึ่งจะสังเกตได้ว่าเส้นกราฟของแบบจำลองและการทดลองจะมีค่าใกล้เคียงกันในช่วงท้าย แต่จะสามารถสังเกตได้ว่าผลที่ได้จากแบบจำลองแบบไม่สมดุลจะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับผลการทดลอง



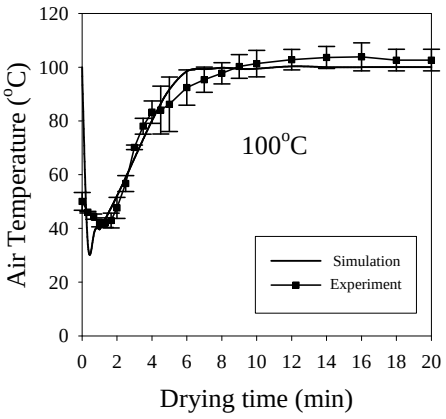
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของมะพร้าวกับระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งที่เงื่อนไขอุณหภูมิของอากาศ 100°C ที่ได้รับจากแบบจำลองแบบไม่สมดุลกับผลที่ได้จากการทดลอง

5.2 อุณหภูมิของมะพร้าว

เมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์อุณหภูมิของมะพร้าวกับระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ดังแสดงในรูปที่ 7 พบว่า อุณหภูมิของมะพร้าวที่ได้รับจากการคำนวณแบบจำลองแบบไม่สมดุลมีค่ามากกว่าผลที่ได้จากการทดลอง ซึ่งสาเหตุใหญ่มาจาก มีการสูญเสียความร้อนในขั้นตอนที่นำตัวอย่างที่ได้จากการอบแห้งมาบรรจุลงในภาชนะที่ทำการหุ้มฉนวนกันความร้อนเพื่อทำการวัดอุณหภูมิเฉลี่ยของวัสดุทดลอง จึงทำให้อุณหภูมิที่ได้จากการทดลองต่ำกว่าค่าที่เป็นจริง

5.3 อุณหภูมิของอากาศ

เมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของอากาศกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ดังรูปที่ 8 พบว่า ผลที่ได้จากแบบจำลองแบบไม่สมดุลสามารถที่จะทำนายผลของอุณหภูมิของอากาศได้อย่างถูกต้องและมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของอากาศกับระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งที่เงื่อนไขอุณหภูมิ 100°C ที่ได้รับจากแบบจำลองแบบไม่สมดุลกับผลที่ได้จากการทดลอง

6. สรุปผลการทดลอง

6.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบไม่สมดุลความร้อนและไม่สมดุลความชื้นที่พัฒนาขึ้น สามารถที่จะทำนายค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์ อุณหภูมิของอากาศ และอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ได้ดี และมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับผลที่ได้จากการทดลอง โดยเฉพาะที่เงื่อนไขของอุณหภูมิอากาศอบแห้งที่ 100°C

6.2 ควรปรับปรุงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นให้มีความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิและค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์ หรือแบ่งค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ กับช่วงอัตราการอบแห้งลดลงแยกออกจากกัน เพราะเมื่อนำมาใช้ในแบบจำลองแบบไม่สมดุลแล้วจะไม่สามารถนำมาใช้ในการทำนายในช่วงแรกของการทดลองหรือช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ได้

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

8. เอกสารอ้างอิง

7.1 บทความจากวารสาร (Journal)

[2] T. Madhiyanon, A. Phila and S. Soponronnarit (2009). Models of fluidized bed drying for thin-layer chopped coconut, Applied Thermal Engineering, vol. 29(14-15), October 2009, pp. 2849-2854.

[3] C. Niamnuy, S. Devahastin, Drying kinetics and quality of coconut dried in a fluidized bed dryer, J. Food Eng. 66 (2005) 267-271.

[4] M. Z. Abdullah, Z. Husain and S. L. Yim Pong, Analysis of Cold flow fluidization test results for various biomass fuels, Biomass & Bioenergy 24 (2003) 487-494.

[5] AOAC, Official Method of Analysis, Washington, 2000, D.C., Association of Official Analytical Chemists, 17th edition.

7.2 เว็บไซต์

[1] ข้อมูลที่เกี่ยวกับมะพร้าว (Coconut), แหล่งที่มา http://web.ku.ac.th/agri/coconut1/coco.html