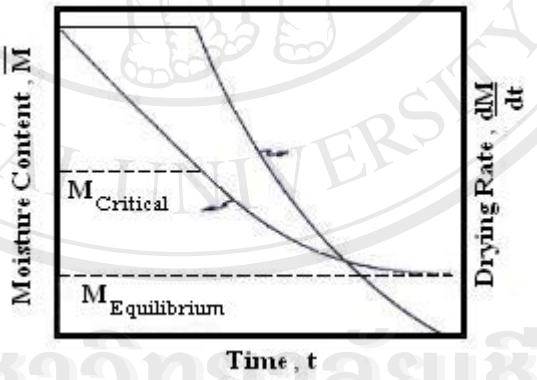
บทที่ 2
หลักการและทฤษฎี

2.1 ความรู้พื้นฐานของการอบแห้ง

ในการอบแห้งวัสดุโดยทั่วไปจะใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางในการอบแห้ง โดยที่การถ่ายเทความร้อนจากอากาศไปยังวัสดุจะเกิดขึ้นพร้อมๆกัน ความร้อนส่วนใหญ่จะถูกไปใช้ในการระเหยน้ำออกจากผิววัสดุ ถ้าผิววัสดุมีปริมาณน้ำอยู่เป็นจำนวนมาก อุณหภูมิและความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิวก็จะคงที่ ซึ่งส่งผลอัตราการอบแห้งคงที่ด้วย ถ้าอุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วของอากาศมีค่าคงที่ เมื่อผิวของวัสดุมีปริมาณน้ำลดลงมากแล้ว อุณหภูมิและความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิวของวัสดุย่อมเปลี่ยนแปลงไป โดยที่อุณหภูมิจะสูงขึ้นและความเข้มข้นไอน้ำจะลดลง ซึ่งส่งผลให้อัตราการอบแห้งลดลง รูปที่ 2.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอัตราการอบแห้งเทียบกับเวลาภายใต้อุณหภูมิ ความชื้นและความเร็วของอากาศคงที่ ความชื้นที่อยู่ระหว่างช่วงอัตราการอบแห้งคงที่และช่วงอัตราการอบแห้งลดลงเรียกว่า “ความชื้นวิกฤต”



รูป 2.1 การอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่และลดลง
ที่มา : Brooker *et al*. (1981)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

วัสดุการเกษตรส่วนใหญ่มักมีโครงสร้างภายในเป็นรูพรุน ซึ่งสามารถแบ่งการอบแห้งได้เป็นสองช่วง คือ ช่วงแรกในขณะที่มีความชื้นสูงอยู่ การถ่ายเทความร้อนและมวลระหว่างวัสดุและอากาศเหมือนกับการถ่ายเทความร้อนและมวลที่เกิดขึ้นที่กระเปาะเปียกของเทอร์โมมิเตอร์ซึ่งการอบแห้งเป็นแบบอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant Drying Rate) ช่วงที่สอง คือ ช่วงที่ความชื้นของ

วัสดุมีค่าต่ำกว่าความชื้นวิกฤต การถ่ายเทความร้อนและมวลไม่เกิดขึ้นเฉพาะที่ผิววัสดุเท่านั้นแต่เกิดขึ้นภายในเนื้อของวัสดุด้วย การเคลื่อนที่ของน้ำจากภายในเนื้อวัสดุมายังผิวช้ากว่าการพาความชื้นจากผิววัสดุไปยังอากาศ ทำให้อัตราการอบแห้งลดลง (Falling Drying Rate)

2.2 สมการจลนศาสตร์การอบแห้ง (Drying Kinetic Equation)

สมการจลนศาสตร์การอบแห้งที่นำมาใช้ในการทำนายพฤติกรรมการลดลงของความชื้นในวัสดุขณะอบแห้งแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบ คือสมการอบแห้งทางทฤษฎี สมการอบแห้งกึ่งทฤษฎี และสมการอบแห้งเอมไพริคัล

2.2.1 สมการจลนศาสตร์ของการอบแห้งทางทฤษฎี (Theoritical Drying Kinetic Equation)

วัสดุทางการเกษตรส่วนใหญ่มีโครงสร้างภายในลักษณะเป็นรูพรุน การเคลื่อนที่ของน้ำอยู่ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง Luikov (1966) ได้เสนอรูปแบบการเคลื่อนที่ของน้ำภายในวัสดุซึ่งอาจเกิดขึ้นในแบบต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของเหลวเนื่องจาก capillary flow เป็นผลมาจากแรงตึงผิว
2. การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของของเหลวเนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น
3. การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของของเหลวเนื่องจากการแพร่ของความชื้นบนผิวของรูพรุนเล็กๆ
4. การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของไอเนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น
5. การเคลื่อนที่ของไอน้ำเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ
6. การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของของเหลวและไอน้ำเนื่องจากความแตกต่างของความดันรวม

สำหรับการอบแห้งผลไม้ส่วนใหญ่อยู่ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ซึ่งการเคลื่อนที่ของน้ำจะอยู่ในรูปของเหลวซึ่งเป็นผลมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้นซึ่งเป็นไปในลักษณะของการแพร่ของน้ำภายในวัสดุซึ่งเป็นไปตามกฎข้อที่2 ของ Fick ซึ่งแสดงดังสมการ 2.1

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla^2 DM \qquad (2.1)$$

เมื่อ M คือ ความชื้น, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

D คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่, m^2/h

t คือ เวลา, h

สำหรับวัสดุทรงกลมที่มีรัศมี r_0 และมีสมมุติฐานว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คงที่ไม่ขึ้นกับความชื้นในวัสดุ ซึ่งสามารถจัดรูปแบบสมการได้ใหม่ ดังสมการ 2.2

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D\left(\frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \frac{2\partial M}{r\partial r}\right) \quad ; \; M = M(r,t) \tag{2.2}$$

ในการแก้ปัญหาสมมุติฐานว่า ความชื้นเริ่มต้นในวัสดุมีค่าเท่ากัน และลมร้อนสัมผัสกับวัสดุทำให้ผิวนอกสุดมีความชื้นเท่ากับความชื้นสมดุล ในขณะที่ไม่มีการแพร่ความชื้นที่จุดศูนย์กลางของวัสดุ ซึ่งจะได้ที่สภาวะเริ่มต้นและขอบเขต

$$M(r,0) = M_{in} \qquad \text{ที่ } t = 0, (0 \leq r \leq R) \tag{2.3}$$

$$M(r_0,t) = M_{eq} \qquad \text{ที่ } t>0 \tag{2.4}$$

$$\frac{\partial M(0,t)}{\partial r} = 0 \qquad \text{ที่ } t>0 \tag{2.5}$$

เมื่อ r คือ รัศมีของทรงกลม, m

r_0 คือ รัศมีภายนอกของทรงกลม, m

M_{in} คือ ความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง

คำตอบของสมการ 2.5 ที่สอดคล้องกับสภาวะเริ่มต้นและขอบเขตตามสมการ2.3 และสมการ2.4 สำหรับวัสดุทรงกลมสามารถเขียน ได้ดังสมการ 2.6

$$\overline{MR} = \left(\frac{6}{\pi^2}\right)\sum_{P=1}^{\infty}\left(\frac{1}{P^2}\right)\exp\left(\frac{-P^2\pi^2}{r_0^2}Dt\right) \tag{2.6}$$

โดย

$$\overline{MR} = \left(\frac{M - M_{eq}}{M_{in} - M_{eq}}\right) \tag{2.7}$$

เมื่อ P คือ จำนวนเต็ม 1,2,3..

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

$\overline{MR}$ คือ อัตราส่วนความชื้นเฉลี่ย

M_{eq} คือ ความชื้นสมดุลของวัสดุ, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง

D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น

สำหรับสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น เป็นการเคลื่อนที่ของน้ำ ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ซึ่งเป็นช่วงที่การถ่ายเทความร้อนและมวลไม่ได้เกิดเฉพาะที่ผิวนอกของวัสดุเท่านั้น แต่เกิดภายในผิวและเนื้อวัสดุด้วย ส่วนในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่นั้นน้ำจะระเหยที่ผิวของวัสดุเท่านั้น ซึ่งที่ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่นี้อัตราการระเหยน้ำต่อพื้นที่จะมีค่าคงที่ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งหรือลดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอบแห้งจะมีผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นมีค่าสูงขึ้น ปัจจัยที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ได้แก่อุณหภูมิของอากาศที่ใช้อบแห้งและความชื้นของวัสดุ ในงานวิจัยนี้ใช้ลำไยทั้งลูกเป็นวัสดุทดสอบ สมการที่ใช้หาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นจะอาศัยการวิเคราะห์จากข้อมูลการทดลอง สำหรับสมการที่ใช้คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของลำไยทั้งลูกในงานวิจัยนี้ เป็นสมการที่พัฒนาขึ้นโดย สารภี ชัญถาวร (2545) ซึ่งมีรูปแบบสมการดังนี้

$$D = 0.127146 \exp\left(\frac{-34463.97}{R(T+273)}\right) \tag{2.8}$$

เมื่อ D คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของลำไยทั้งลูก , m^2/h

T คือ อุณหภูมิอบแห้ง , ^oC

R คือ ค่าคงที่สากลของก๊าซ 8.314 , kJ/kmol.K

2.2.2 สมการจลนศาสตร์ของการอบแห้งกึ่งทฤษฎี (Semi-Theoritical Drying Kinetic Equation)

จากสมการจลนศาสตร์ของการอบแห้งทางทฤษฎีตามสมการ 2.6 ถ้าคงไว้เพียงเทอมแรกจะได้

$$\overline{MR} = \left(\frac{6}{\pi^2}\right)\exp\left(\frac{-D\pi^2 t}{r_0^{\,2}}\right) \tag{2.9}$$

หรือ

$$\overline{MR} = \left(\frac{6}{\pi^2}\right)\exp(-Kt) \tag{2.10}$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

จากสมการ 2.9 และสมการ2.10 จะให้ค่าใกล้กันมากเมื่อเวลาอบแห้งมีค่ามาก และค่าความแตกต่างจะน้อยกว่า 5% ถ้าอัตราส่วนของ $D\pi^2 t/r_0^2$ มีค่ามากกว่า 1.2 เราสามารถสร้างแบบจำลองการอบแห้งให้ง่ายขึ้น โดยการสมมุติว่าอัตราการอบแห้งภายใต้สภาวะคงที่แปรผันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความแตกต่างของความชื้นและความชื้นสมดุลในวัสดุ ซึ่งข้อสมมุติฐานนี้คล้ายกับกฎการเย็นตัวของนิวตัน ซึ่งเป็นตามสมการ 2.11

$$\frac{d\overline{M}}{dt} = -k\left(\overline{M} - M_{eq}\right) \tag{2.11}$$

ซึ่งสภาวะเริ่มต้น $M(0) = M_{in}$ แทนในสมการ 2.11 จะได้คำตอบของสมการ คือ

$$\overline{MR} = -kt \tag{2.12}$$

เมื่อ k คือ ค่าคงที่การอบแห้ง, h^{-1}

T คือ เวลาอบแห้ง, h

ได้มีผู้ทำการวิจัยและสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ของการอบแห้งกับอุณหภูมิของอากาศอบแห้งของวัสดุต่างๆ ดังตาราง 2.1

ตาราง 2.1 สมการความสัมพันธ์ของค่าคงที่การอบแห้งกับอุณหภูมิของอากาศอบแห้งของวัสดุ

วัสดุ	สมการ	ที่มา
ลำไยพันธุ์ดอ	$k = 1.9994*10^{-9}\exp(0.0502T)$ $k=2.3015-0.00615T$	รจนาและรสริน (2540)
เมล็ดข้าวโพด	$k=13.328-1.15RH-8255.9/(1.8T+491.67)$	Westerman et al. (1973)
ถั่วลิสงทั้งฝัก	$k=5.879*10^{-8}\exp[0.04591(T+273)]$	Sittiphong et al (1987)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

2.2.3 สมการจลนศาสตร์ของการอบแห้งเอมไพริคัล(Empirical Drying Kinetic Equation)

สมการจลนศาสตร์ของการอบแห้งเอมไพริคัล เป็นสมการที่สร้างขึ้นจากแนวโน้มข้อมูลการทดลองในช่วงอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วของอากาศอบแห้งหนึ่งๆ ซึ่งใช้ในการอบแห้งได้ดี แต่มีข้อจำกัดในเรื่องเงื่อนไขการอบแห้งที่ต้องการต้องตรงกับสภาวะการทดลอง สำหรับสมการจลนศาสตร์ของการอบแห้งเอมไพริคัลที่นิยมใช้กันคือ สมการของ Page (1949) ซึ่งมีรูปแบบของสมการคือ

$$\overline{MR} = \frac{\overline{M} - M_{eq}}{M_{in} - M_{eq}} = \exp(-pt^{n}) \qquad (2.13)$$

เมื่อ M_{in} คือ ความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง

M_{eq} คือ ความชื้นสมดุลของวัสดุ, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง

p,n คือ ค่าคงที่

ตาราง 2.2 สมการความสัมพันธ์ของค่าคงที่ในสมการของ Page

วัสดุ	สมการ	เงื่อนไข	ที่มา
ข้าวโพดพันธุ์สุวรรณ 1	$P = 4.413\times10^{-3} + 1.637\times10^{-4}T + 1.723\times10^{-2}M_{in} + 2.354\times10^{-2}TM_{in}$ $n = 0.3982 + 7.779\times10^{-4}T - 0.1851M_{in} + 5.258\times10^{-3}TM_{in}$	อุณหภูมิ45-70 °C M_{in} = 18-36%db.	อรุณี และณะ(2533)
มะม่วงหิมพานต์	$P = 0.14 + 3.72\times10^{-4}T - 0.031d$ $n = 0.38 + 6.7\times10^{-3}T$ หมายเหตุ : (d = ความหนา)	อุณหภูมิ45-70 °C M_{in} =18-36% db. ขนาด 2-4 mm	Madanba et al. (1996)

2.3 ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง

Nonhebl and Moss (1971) กล่าวว่าสภาวะการอบแห้งสามารถเปลี่ยนแปลงได้ เนื่องจากการดำเนินงานและการควบคุม สภาวะภายนอกที่สำคัญและมีผลต่ออัตราการอบแห้งวัสดุได้แก่ อุณหภูมิของลมร้อนความเร็วของลมร้อนความชื้นสัมพัทธ์ของลมร้อนและน้ำหนักของวัสดุอบแห้งต่อหน่วยพื้นที่นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นๆเช่นการกวนการแบ่งขนาดของชิ้นวัสดุ

2.3.1 อุณหภูมิของลมร้อน

โดยปกติการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดที่ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิของการอบแห้งจะถูกควบคุมโดยเครื่องควบคุมอุณหภูมิ ในกรณีดังกล่าวถือว่าอุณหภูมิเป็นปัจจัยคงที่ ในกรณีที่มีการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิในขณะอบแห้งจะถือว่าอุณหภูมิมีผลต่ออัตราการอบแห้งเป็นอย่างมาก ในกรณีการอบแห้งวัสดุที่ความเร็วลมร้อนคงที่ อัตราการอบแห้งจะขึ้นอยู่กับผลต่างของอุณหภูมิกระเปาะเปียกกับกระเปาะแห้งของอากาศร้อนเท่านั้น ดังนั้นอัตราการอบแห้งมีค่าสูง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

เมื่ออุณหภูมิกระเปาะแห้งมีค่าสูงและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศมีค่าต่ำสุด ในช่วงของอัตราการอบแห้งคงที่ อัตราการอบแห้งจะขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน และผลต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศแห้งเท่านั้น ส่วนในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงวัสดุอบแห้งมีแนวโน้มจะแห้งเร็วขึ้นถ้าอุณหภูมิในการอบแห้งเพิ่มขึ้น(Borgstrom,1968)

2.3.2 ความเร็วของลมร้อน

ความเร็วของลมร้อนไม่ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของอากาศ อุณหภูมิและการนำอากาศที่ใช้แล้วมาผสมกับอากาศแวดล้อม แม้ว่าการนำอากาศที่ใช้แล้วมาผสมกับอากาศแวดล้อม ทำให้องค์ประกอบและคุณสมบัติของอากาศร้อนเปลี่ยนแปลงไป แต่จะไม่มีผลต่อความเร็วของลมร้อน โดยปกติในการอบแห้งจะควบคุมให้ความเร็วของลมร้อนคงที่ตลอดช่วงของการอบแห้ง ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วของลมร้อน ความเร็วของลมร้อนมีผลต่ออัตราการอบแห้งเนื่องจากความเร็วของลมร้อนจะมีผลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ดังนั้นถ้าปัจจัยอื่น ๆ คงที่การอบแห้งที่ความเร็วลมร้อนสูง จะทำให้อัตราการอบแห้งดีขึ้น (Brennan et al., 1986)

2.3.3 ความชื้นของลมร้อน

ความชื้นจะขึ้นอยู่กับสัดส่วนของอากาศที่ใช้แล้วกับอากาศแวดล้อมและยังขึ้นอยู่กับอัตราการอบแห้งที่เวลาใด ๆ หากลมร้อนมีความชื้นสูงจะทำให้ความสามารถในการดึงน้ำในวัสดุอบแห้งต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของลมร้อนลดลง นั่นคืออัตราการอบแห้งจะลดลงด้วย และในทางทฤษฎีสามารถที่จะควบคุมความชื้นของลมร้อนได้ โดยการควบคุมการผสมของอากาศที่ใช้แล้วกับอากาศแวดล้อม ซึ่งหากเพิ่มการผสมของอากาศที่ใช้แล้วกับอากาศแวดล้อมมากขึ้นเท่าใด อัตราการอบแห้งจะลดลงมากขึ้นเท่านั้น ในทางปฏิบัติแล้วไม่สามารถควบคุมการผสมของอากาศที่ใช้แล้วกับอากาศแวดล้อมได้แน่นอน และวิธีที่นิยมทดลองกันคือ การลองผิดลองถูก หรือหาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้น, อัตราการอบแห้งขณะใดขณะหนึ่งและสัดส่วนของการผสมของอากาศที่ใช้แล้วกับอากาศแวดล้อม โดยการสมดุลมวลสาร (Hield and Josly, 1967)

2.3.4 น้ำหนักของวัสดุต่อหน่วยพื้นที่หรือความหนาของชิ้นวัสดุ

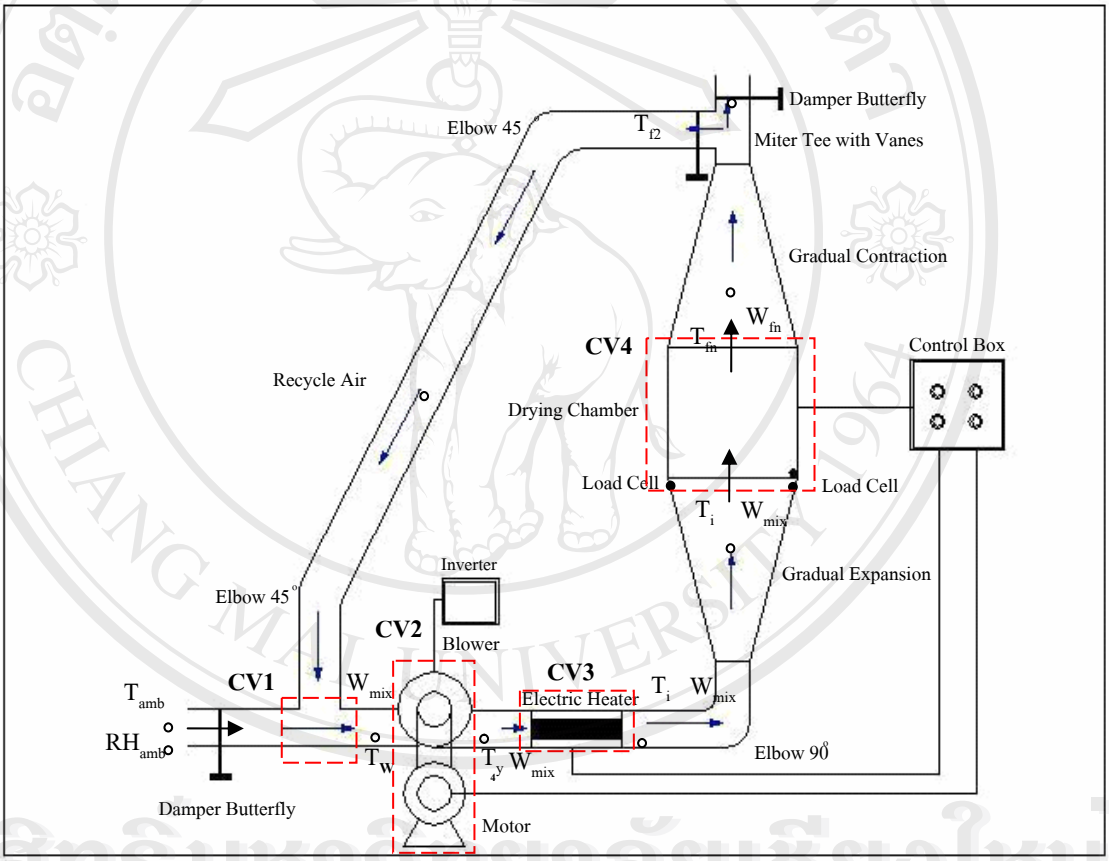
ในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่อัตราการอบแห้งจะขึ้นอยู่กับลักษณะของพื้นผิววัสดุเท่านั้น ดังนั้นความหนาของวัสดุไม่มีอิทธิพลต่ออัตราการอบแห้งในช่วงนี้เลย แต่เมื่อถึงช่วงอัตราการอบแห้งลดลง การแพร่ของน้ำจากภายในสู่พื้นผิวของวัสดุซึ่งเกิดการระเหยจะเป็นตัวควบคุมอัตราการอบแห้ง ในช่วงนี้การเพิ่มความหนาของชั้นวัสดุจะทำให้อัตราการอบแห้งลดลง ดังนั้นต้องกำหนดความหนาของชั้นวัสดุที่เหมาะสมด้วย (Somogyi and Lun, 1986)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

2.3.5 ปัจจัยอื่น ๆ

นอกจากอุณหภูมิของลมร้อน ความเร็วของลมร้อน ความชื้นสัมพัทธ์ และความหนาของชั้นวัสดุอบแห้งแล้ว ยังมีปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลต่อการอบแห้ง เช่น การสลับตำแหน่งของถาดบรรจุวัสดุขณะทำการอบแห้ง ขนาดของชิ้นวัสดุอบแห้ง (Williams, 1976)

2.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้ง



รูป 2.2 ส่วนประกอบของเครื่องอบแห้งเอนกสงค์ในห้องปฏิบัติการ

ในการพัฒนาแบบจำลองการอบแห้งนี้ประกอบด้วย 3 แบบจำลอง คือแบบจำลองการผสมกันของกระแสอากาศชื้น(ปริมาตรควบคุมที่ 1 , CV1) , แบบจำลองความสิ้นเปลืองพลังงาน (ปริมาตรควบคุมที่ 2 และ 3 ,CV2 และ CV3)และแบบจำลองของห้องอบแห้ง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

2.4.1 แบบจำลองการผสมกันของกระแสอากาศชื้น

พิจารณาปริมาตควบคุม1(CV1) เนื่องจากเครื่องอบแห้งแบบตู้ที่มีการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่มีการนำอากาศที่ใช้อบแห้งแล้วกลับมาใช้อีก ทำให้เกิดการผสมกันของกระแสอากาศที่นำกลับมาใช้ใหม่กับอากาศสิ่งแวดล้อม จากรูป 2.2 เมื่อทำการพิจารณาที่ CV1 แล้วใช้สมดุลมวลอากาศแห้งและสมดุลมวลของไอน้ำที่ CV1 ดังสมการ (2.14และ (2.15)

$$\dot{m}_{rc} + \dot{m}_{amb} = \dot{m}_{mix} \tag{2.14}$$

เมื่อ $\dot{m}_{rc}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่นำกลับมาใช้ใหม่ , $kg_{dry\ air}/h$

$\dot{m}_{amb}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศแวดล้อม , $kg_{dry\ air}/h$

$\dot{m}_{mix}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศผสมก่อนเข้าห้องอบแห้ง , $kg_{dry\ air}/h$

$$\dot{m}_{rc}W_f + \dot{m}_{amb}W_{amb} = \dot{m}_{mix}W_{mix} \tag{2.15}$$

เมื่อ W_{amb} คือ อัตราส่วนความชื้นของอากาศแวดล้อม, $kg_{water}/kg_{dry\ air}$

W_f คือ อัตราส่วนความชื้นของอากาศที่ออกจากชั้นอบแห้งชั้น, $kg_{water}/kg_{dry\ air}$

W_{mix} คือ อัตราส่วนความชื้นของอากาศผสม, $kg_{water}/kg_{dry\ air}$

จากสมการ (2.14) และ (2.15) จะได้ว่า

$$W_{mix} = [(1-RC)W_{amb}] + (RCW_f) \tag{2.16}$$

เมื่อ RC คือ สัดส่วนของการนำอากาศที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่

และมีค่าเท่ากับ $\dot{m}_{rc}/\dot{m}_{mix}$

ในทำนองเดียวกันทำสมดุลพลังงานที่CV1 โดยที่คิดว่าไม่มีการสูญเสียความร้อนของอากาศขณะที่อากาศผสมกัน จึงกล่าวได้ว่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของอากาศชื้นเท่ากับศูนย์ และทำสมดุลมวลอากาศแห้งที่CV1 ซึ่งจะได้

$$\begin{aligned}(\dot{m}_{mix}C_aT_{mix}) + (\dot{m}_{mix}W_{mix}h_{fg}) + (\dot{m}_{mix}W_{mix}C_vT_{mix}) = (1-RC)[&(\dot{m}_{mix}C_aT_{amb}) + \\ &(\dot{m}_{mix}W_{amb}h_{fg}) + (\dot{m}_{mix}W_{amb}C_vT_{amb})] \\ &+ RC[(\dot{m}_{mix}C_aT_f) + (\dot{m}_{mix}W_fh_{fg}) \\ &+ (\dot{m}_{mix}W_fC_vT_{fb})\end{aligned} \tag{2.17}$$

เมื่อ T_{mix} คือ อุณหภูมิอากาศผสมหรือเป็นอุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าพัดลม, ^oC

$\dot{m}_{mix}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศผสม, $kg_{dry\ air}/h$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

C_a คือ ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศแห้ง, $kJ/kg_{dry\ air}$ ºC

C_v คือ ความจุความร้อนจำเพาะของไอน้ำ, kJ/kg_{water} ºC

T_f คือ อุณหภูมิอากาศที่ออกจากชั้นอบแห้ง, ºC

W_f คือ อัตราส่วนความชื้นของอากาศที่ออกจากชั้นอบแห้ง, $kg_{water}/kg_{dry\ air}$

2.4.2 แบบจำลองความสิ้นเปลืองพลังงาน

พิจารณาปริมาตรควบคุมที่ 2 และ 3 (CV2 และ CV3) เนื่องจากเครื่องอบแห้งที่ใช้งานวิจัยนี้ใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นแหล่งให้พลังงานแก่พัดลม และพลังงานความร้อนจาก Heater ดังนั้นในแบบจำลองความสิ้นเปลืองพลังงานนี้จึงประกอบไปด้วยแบบจำลองความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า และแบบจำลองความสิ้นเปลืองพลังงานความร้อน

แบบจำลองความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า โดยเมื่อพิจารณาที่ CV2 (Blower) และใช้หลักสมดุลพลังงานที่ CV2 จะได้ว่า

$$W_s + (\dot{m}_{mix} C_a T_{mix}) + (\dot{m}_{mix} W_{mix} h_{fg}) + (\dot{m}_{mix} W_{mix} C_v T_{mix}) = (\dot{m}_{mix} C_a T_y) + (\dot{m}_{mix} W_{mix} h_{fg}) + (\dot{m}_{mix} W_{mix} C_v T_y) \quad (2.18)$$

เมื่อ T_y คือ อุณหภูมิของอากาศที่ออกจากพัดลม, ºC

W_s คือ งานทางไฟฟ้าที่ให้ที่เพลาของพัดลม, kJ/h

$$W_s = \Delta P\,[\dot{m}_{mix}/(1000\rho_a\eta_f)] \quad (2.19)$$

เมื่อ ρ_a คือ ความหนาแน่นของอากาศแห้ง, $kg_{dry\ air}/m^3$

η_f คือ ประสิทธิภาพของพัดลม, เศษส่วน

ΔP คือ ความดันลดของระบบอบแห้ง, Pa

สำหรับความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจากมอเตอร์ของพัดลมคำนวณได้จากสมการ

$$E_{blower} = \frac{W_s}{\eta_m} \quad (2.20)$$

เมื่อ E_{blower} คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าที่ให้มอเตอร์ของพัดลม , kJ / h

η_m คือ ประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้า , เศษส่วน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

2.4.3 แบบจำลองความสิ้นเปลืองพลังงานความร้อน

พิจารณาปริมาตรควบคุมที่3, (CV3) โดยเมื่อพิจารณาที่ CV3 แล้วทำสมดุลพลังงานที่ CV3 จะได้ว่า

$$Q_h + (\dot{m}_{mix} C_a T_y) + (\dot{m}_{mix} W_{mix} h_{fg}) + (\dot{m}_{mix} W_{mix} C_v T_y) = (\dot{m}_{mix} C_a T_i) + (\dot{m}_{mix} W_{mix} h_{fg}) + (\dot{m}_{mix} W_{mix} C_v T_i) \quad (2.21)$$

เมื่อ Q_h คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานความร้อน , kJ/h

T_y คือ อุณหภูมิของอากาศที่ออกจากพัดลม หรือเป็นอุณหภูมิของอากาศที่เข้า Heater, ºC

T_i คือ อุณหภูมิของอากาศที่เข้าชั้นอบแห้ง หรือเป็นอุณหภูมิอบแห้ง,ºC

W_{mix} คือ อัตราส่วนความชื้นของอากาศที่เข้าชั้นอบแห้ง, $kg_{water}/kg_{dry\ air}$

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) ซึ่งเป็นปริมาณของพลังงานที่ใช้ต่อหนึ่งหน่วยมวลของน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุโดยหาได้จากสมการ (2.22)

$$SEC = \frac{(2.6 \sum E_{blower} + \sum Q_h)\Delta t}{(M_{in} - M_f)m_p} \quad (2.22)$$

เมื่อ SEC คือ ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ, kJ/kg_{water}

$\sum E_{blower}$ คือ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้งที่สะสมมาตั้งแต่เริ่มอบจนถึงเวลาใดๆ, kJ/h

$\sum Q_h$ คือ พลังงานความร้อนที่ใช้ในการอบแห้งที่สะสมมาตั้งแต่เริ่มอบจนถึงเวลาใดๆ, kJ/h

Δt คือ ช่วงเวลาสั้นๆ , h

m_p คือ มวลแห้งของวัสดุ, kg

M_f คือ ความชื้นสุดท้าย, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

2.4.4 แบบจำลองการอบแห้ง

พิจารณาปริมาตรควบคุมที่ 4 (CV4) ซึ่งจะประกอบไปด้วยแบบจำลองย่อย 3 แบบจำลองคือ แบบจำลองคุณสมบัติของอากาศชื้นที่ทางเข้าห้องอบแห้ง แบบจำลองที่ชั้นอบแห้งใดๆ และแบบจำลองคุณสมบัติของอากาศที่ทางออกของชั้นอบแห้งใดๆ โดยเมื่อพิจารณาที่ CV4 แล้วทำสมดุลมวลและสมดุลพลังงานดังนี้

พิจารณาปริมาตรควบคุมที่ 4 ของชั้นอบแห้งใดๆ แล้วใช้สมดุลมวลที่ปริมาตรควบคุมของชั้นอบแห้งนั้นๆ จะได้ว่ามวลของน้ำที่เพิ่มขึ้นในอากาศชื้นเท่ากับมวลของน้ำที่ระเหยออก สามารถเขียนได้ดังสมการ (2.23)

$$\Delta t \dot{m}_{mix}(W_{fn} - W_{mix\,n}) = m_{pn}(M_{in} - M_{fn}) \qquad (2.23)$$

เมื่อ W_{fn} คือ อัตราส่วนความชื้นของอากาศที่ออกจากชั้นอบแห้งนั้นๆ, $kg_{water}/kg_{dry\,air}$

m_{pn} คือ มวลแห้งของลำไยในชั้นอบแห้งนั้นๆ (โดยที่ $m_{p\,n} = m_p/2$), $kg_{dry\,solid}$

$W_{mix\,n}$ คือ อัตราส่วนความชื้นของอากาศที่เข้าชั้นอบแห้งนั้นๆ, $kg_{water}/kg_{dry\,air}$

ในทำนองเดียวกันเมื่อทำสมดุลพลังงานที่ปริมาตรควบคุมที่ 4 ของชั้นอบแห้งนั้นๆ โดยที่มีการหุ้มฉนวนที่ผนังห้องอบแห้งอย่างดี ไม่มีการอัดอากาศเข้าที่ห้องอบแห้ง ทำให้ไม่มีการยุบตัวของอากาศ และอุณหภูมิเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์และเครื่องอบแห้งเท่ากับอุณหภูมิอบแห้ง จะได้ว่าผลรวมของการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของลมร้อนแห้งและการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของไอน้ำในลมร้อนมีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังสมการ (2.24)

$$(\dot{m}_{mix} C_a T_{in}) + (\dot{m}_{mix} W_{mix\,n} h_{fg}) + (\dot{m}_{mix} W_{mix\,n} C_v T_{in}) = (\dot{m}_{mix} C_a T_{fn}) + (\dot{m}_{mix} W_{fn} h_{fg}) + (\dot{m}_{mix} W_{fn} C_v T_{fn}) \qquad (2.24)$$

เมื่อ T_{fn} คือ อุณหภูมิของอากาศที่ออกจากชั้นอบแห้งนั้นๆ ,ºC

T_{in} คือ อุณหภูมิของอากาศที่เข้าชั้นอบแห้งนั้นๆ ,ºC

การคำนวณความชื้นเฉลี่ยของลำไยอบแห้งที่เวลาใดๆ หาจากสมการจลนศาสตร์ของการอบแห้งสำหรับวัสดุทรงกลมกลวง ทำการหาอนุพันธ์เทียบกับเวลา และใช้วิธี Finite Difference และได้ความชื้นเฉลี่ยของลำไยทั้งเบดหลังการอบแห้งที่เวลาใดๆสามารถคำนวณได้ดังสมการ (2.25)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

$$M_f = M_i + (M_{in} - M_{eq})(\Delta t)\left(\frac{6}{\pi^2(r_i^2 + r_i r_o + r_o^2)}\right)\left(\frac{-D_{eff}\pi^2}{(r_o - r_i)^2}\right)\left\{\sum_{n=1}^{\infty}\left(r_o \cos n\pi - r_i\right)^2 \exp\left(\frac{-D_{eff} n^2 \pi^2 t}{(r_o - r_i)^2}\right)\right\} \quad (2.25)$$

เมื่อ M_{in} คือ ความชื้นเริ่มต้นของช่วงเวลา Δt ของชั้นอบแห้งนั้นๆ, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved