บทที่ 2
หลักการและทฤษฎี

2.1 ความรู้พื้นฐานการอบแห้ง

ในการอบแห้งวัสดุทั่วๆ ไปนั้นมักใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางในการอบแห้ง ความร้อนจะถ่ายเทจากกระแสอากาศไปยังผิววัสดุ ความร้อนส่วนใหญ่ถูกใช้ในการระเหยน้ำ ในขณะเดียวกันไอน้ำจะเคลื่อนที่จากบริเวณผิววัสดุมายังกระแสอากาศ ถ้าผิววัสดุมีปริมาณน้ำอยู่เป็นจำนวนมาก อุณหภูมิ และความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิวจะคงที่ ซึ่งส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อน และอัตราการอบแห้งคงที่ด้วย ถ้าอุณหภูมิ ความชื้นและความเร็วของกระแสอากาศมีค่าคงที่ เมื่อผิววัสดุมีปริมาณน้ำลดลงมากแล้ว อุณหภูมิและความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิววัสดุย่อมเปลี่ยนแปลงไป โดยอุณหภูมิจะสูงขึ้นและความชื้นจะลดลง ซึ่งส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและอัตราการอบแห้งลดลง ในกระบวนการอบแห้งนั้นตัวแปรที่มีอิทธิพลต่ออัตราการอบแห้งได้แก่ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ และอาจจะมีอิทธิพลของความเร็วลมด้วย โดยเฉพาะช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ หรือช่วงต่อกับช่วงอัตราการอบแห้งคงที่

สำหรับวัสดุการเกษตรส่วนใหญ่มักจะมีโครงสร้างเป็นรูพรุน ซึ่งสามารถแบ่งช่วงอัตราการอบแห้งเป็น 2 ช่วงคือ ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ การถ่ายเทความร้อนและมวลจะเกิดขึ้นที่ผิวนอกของวัสดุเท่านั้น น้ำจะเกาะอยู่ที่ผิวของวัสดุเป็นจำนวนมาก เมื่อเพิ่มความเร็วลมที่ไหลผ่านวัสดุ จะทำให้ฟิลม์อากาศนิ่งมีความหนาลดลง เป็นผลให้ความต้านทานต่อการไหลของความร้อนและมวลลดลงด้วย เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของอากาศอบแห้ง จะทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างผิวของวัสดุและของกระแสอากาศที่ไหลอย่างอิสระมีมากขึ้น เป็นผลให้การถ่ายเทความร้อนและมวลดีขึ้น และเมื่อลดค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอบแห้ง จะเป็นผลให้ความแตกต่างระหว่างอัตราส่วนความชื้นอิ่มตัวที่ผิววัสดุและอัตราส่วนความชื้นของกระแสอากาศที่ไหลอย่างอิสระมีมากขึ้น ทำให้เกิดการถ่ายเทมวลดีขึ้น

ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง การถ่ายเทความร้อนและมวลจะไม่จำกัดอยู่เฉพาะที่ผิวนอกของวัสดุเท่านั้น แต่จะเกิดขึ้นภายในผิวและเนื้อวัสดุด้วย เมื่อเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้ง จะทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิมีมากขึ้น นอกจากนี้ยังมีผลต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นมีค่าเพิ่มขึ้น

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ด้วย (ศิวะ และสมชาติ, 2533) เมื่อลดค่าความชื้นสัมพัทธ์ของการอบแห้ง จะเป็นผลให้เกิดความแตกต่างระหว่างอัตราส่วนความชื้นเพิ่มขึ้นและมีผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิหรือลดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแล้ว จะเป็นผลให้การถ่ายเทความร้อนและมวลดีขึ้น เมื่อเพิ่มความเร็วลมพบว่าความหนาของฟิลม์อากาศนิ่งมีค่าลดลง เป็นผลให้ความต้านทานลดลงเนื่องจากความต้านทานที่ฟิลม์อากาศมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับความต้านทานตัวอื่น ดังนั้นจึงไม่มีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนและมวลมากนัก

2.2 ความชื้นสมดุลของวัสดุ

ความชื้นสมดุลของวัสดุมีความสำคัญต่อการศึกษากระบวนการอบแห้ง เนื่องจากเมื่ออบแห้งวัสดุโดยใช้อากาศที่สภาวะคงที่ (เช่น อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์คงที่) ความชื้นในวัสดุจะต่ำลงเรื่อยๆ จนถึงจุดๆ หนึ่งที่ความชื้นไม่เปลี่ยนแปลงแล้ว ในขณะนั้นความชื้นในวัสดุมีค่าเท่ากับความดันไอของอากาศที่อยู่รอบๆ และอุณหภูมิวัสดุก็เท่ากับอุณหภูมิอากาศที่อยู่รอบๆ ซึ่งเรียกความชื้นขณะนั้นว่า ความชื้นสมดุล ซึ่งได้มีผู้ทำการวิจัยและสร้างรูปแบบสมการความชื้นสมดุล ดังตาราง 2.1

ตาราง2.1 รูปแบบสมการของความชื้นสมดุล

สมการ	รูปแบบ
Brunauer at al. (1939)	$\frac{RH}{(1-RH)M_{eq}}=\frac{1}{CM_m}+\frac{(C-1)RH}{CM_{eq}}$
Oswin (1946)	$M_{eq}=A\left(\frac{RH}{1-RH}\right)^n$
Halsey (1948)	$\ln RH=\exp\left(\frac{-AM_{eq}^B}{R(T+273)}\right)$
Chung & Pfost (1967)	$\ln RH=\frac{-A\exp(-BM_{eq})}{R(T+273)}$
Henderson (1952)	$1-RH=\exp\left[-A(T+273)M_{eq}^B\right]$

เมื่อ M_{in} คือ ความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

T คือ อุณหภูมิอบแห้ง , °C

R คือ ค่าคงที่สากลของแก๊ซมีค่าเท่ากับ 8.314 kJ / mole-K

A,B,C,n คือ ค่าคงที่

สำหรับการคำนวณหาความชื้นสมดุลของลำไยทั้งลูกในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้สมการความชื้นสมดุลของ รจนา และรสริน (2540) ได้ทำการพัฒนาขึ้นสำหรับลำไยทั้งลูก โดยใช้รูปแบบของสมการของ Oswin (1946) เพื่อนำใช้ประกอบการคำนวณในแบบจำลองของการอบแห้งลำไย ซึ่งสมการความชื้นสมดุลดังกล่าวมีรูปแบบดังนี้

$$M_{eq} = \left(2.3015 - 0.00615T_{abs}\right)\left[\frac{RH}{(1-RH)}\right]^{\left(-1.3453+0.00507T_{abs}\right)} \qquad (2.1)$$

เมื่อ RH คือ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (ใช้หน่วยทศนิยม)

T_{abs} คือ อุณหภูมิอบแห้ง , K

M_{eq} คือ ความชื้นสมดุลของวัสดุ, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง

R คือ ค่าคงที่สากลของแก๊สมีค่าเท่ากับ 8.314 kJ / mole-K

2.3 สมการจลนศาสตร์การอบแห้ง (Drying Kinetic Equation)

สมการจลนศาสตร์การอบแห้งที่นำมาใช้ในการทำนายพฤติกรรมการลดลงของความชื้นในวัสดุขณะอบแห้งแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบ คือสมการอบแห้งทางทฤษฎี สมการอบแห้งกึ่งทฤษฎี และสมการอบแห้งเอมไพริคัล

2.3.1 สมการจลนศาสตร์ของการอบแห้งทางทฤษฎี(Theoritical Drying Kinetic Equation)

วัสดุทางการเกษตรส่วนใหญ่มีโครงสร้างภายในลักษณะเป็นรูพรุน การเคลื่อนที่ของน้ำอยู่ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง Luikov (1966) ได้เสนอรูปแบบการเคลื่อนที่ของน้ำภายในวัสดุซึ่งอาจเกิดขึ้นในแบบต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของเหลวเนื่องจาก capillary flow เป็นผลมาจากแรงตึงผิว
2. การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของของเหลวเนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น หรือการแพร่ของความชื้นบนผิวของรูพรุนเล็กๆ
3. การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของไอเนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

4. การเคลื่อนที่ของไอน้ำเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ
5. การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของของเหลวและไอน้ำเนื่องจากความแตกต่างของความดันรวม

สำหรับการอบแห้งผลไม้ส่วนใหญ่อยู่ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Achariyaviriya et.al, 2000) ซึ่งการเคลื่อนที่ของน้ำจะอยู่ในรูปของเหลวซึ่งเป็นผลมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้นซึ่งเป็นไปในลักษณะของการแพร่ของน้ำภายในวัสดุ ซึ่งเป็นไปตามกฎข้อที่ 2 ของ Fick ซึ่งแสดงดังสมการ 2.2

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla^2 DM \qquad (2.2)$$

เมื่อ M คือ ความชื้น, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง
D คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่, m^2/h
t คือ เวลา, h

สำหรับวัสดุทรงกลมที่มีรัศมี r_0 และมีสมมุติฐานว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คงที่ไม่ขึ้นกับความชื้นในวัสดุ ซึ่งสามารถจัดรูปแบบสมการได้ใหม่ ดังสมการ 2.3

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D\left(\frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \frac{2\partial M}{r\partial r}\right) \quad ; \; M = M(r,t) \qquad (2.3)$$

ในการแก้ปัญหาสมมุติฐานว่า ความชื้นเริ่มต้นในวัสดุมีค่าเท่ากัน และลมร้อนสัมผัสกับวัสดุทำให้ผิวนอกสุดมีความชื้นเท่ากับความชื้นสมดุล ในขณะที่ไม่มีการแพร่ความชื้นที่จุดศูนย์กลางของวัสดุ ซึ่งจะได้
ที่สภาวะเริ่มต้นและขอบเขต

$$M(r,0) = M_{in} \qquad \text{ที่ } t = 0, (0 \le r \le R) \qquad (2.4)$$

$$M(r_0,t) = M_{eq} \qquad \text{ที่ } t > 0 \qquad (2.5)$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

$$\frac{\partial M(0,t)}{\partial r}=0 \qquad \text{ที่ } t>0 \tag{2.6}$$

เมื่อ r คือ รัศมีของทรงกลม, m

r_0 คือ รัศมีภายนอกของทรงกลม, m

M_{in} คือ ความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง

คำตอบของสมการ 2.6 ที่สอดคล้องกับสภาวะเริ่มต้นและขอบเขตตามสมการ2.4 และสมการ2.5 สำหรับวัสดุทรงกลมสามารถเขียน ได้ดังสมการ 2.7

$$\overline{MR}=\left(\frac{6}{\pi^2}\right)\sum_{P=1}^{\infty}\left(\frac{1}{P^2}\right)\exp\left(\frac{-P^2\pi^2}{r_0^{\,2}}Dt\right) \tag{2.7}$$

โดย

$$\overline{MR}=\left(\frac{M-M_{eq}}{M_{in}-M_{eq}}\right) \tag{2.8}$$

เมื่อ P คือ จำนวนเต็ม 1,2,3..

$\overline{MR}$ คือ อัตราส่วนความชื้นเฉลี่ย

M_{eq} คือ ความชื้นสมดุลของวัสดุ, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง

D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น

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

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

$$D = 0.127146 \exp\left(\frac{-34463.97}{R(T+273)}\right) \qquad (2.9)$$

เมื่อ D คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของลำไยทั้งลูก , m^2/h

T คือ อุณหภูมิอบแห้ง , °C

2.3.2 สมการจลนศาสตร์ของการอบแห้งกึ่งทฤษฎี (Semi-Theoritical Drying Kinetic Equation)

จากสมการจลนศาสตร์ของการอบแห้งทางทฤษฎีตามสมการ 2.7 ถ้าคงไว้เพียงเทอมแรก จะได้

$$\overline{MR} = \left(\frac{6}{\pi^2}\right)\exp\left(\frac{-D\pi^2 t}{r_0^{\,2}}\right) \qquad (2.10)$$

หรือ

$$\overline{MR} = \left(\frac{6}{\pi^2}\right)\exp(-Kt) \qquad (2.11)$$

จากสมการ 2.10 และสมการ2.11 จะให้ค่าใกล้กันมากเมื่อเวลาอบแห้งมีค่ามาก และค่าความแตกต่างจะน้อยกว่า 5% ถ้าอัตราส่วนของ $D\pi^2 t / r_0^{\,2}$ มีค่ามากกว่า 1.2

เราสามารถสร้างแบบจำลองการอบแห้งให้ง่ายขึ้น โดยการสมมุติว่าอัตราการอบแห้งภายใต้สภาวะคงที่แปรผันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความแตกต่างของความชื้นและความชื้นสมดุลในวัสดุ ซึ่งข้อสมมุติฐานนี้คล้ายกับกฎการเย็นตัวของนิวตัน ซึ่งเป็นตามสมการ 2.12

$$\frac{d\overline{M}}{dt} = -k\left(\overline{M} - M_{eq}\right) \qquad (2.12)$$

ซึ่งสภาวะเริ่มต้น $M(0) = M_{in}$ แทนในสมการ 2.12 จะได้คำตอบของสมการ คือ

$$\overline{MR} = -kt \qquad (2.13)$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

เมื่อ

k คือ ค่าคงที่การอบแห้ง, ชั่วโมง$^{-1}$

t คือ เวลาอบแห้ง, h

ได้มีผู้ทำการวิจัยและสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ของการอบแห้งกับอุณหภูมิของอากาศอบแห้งของวัสดุต่างๆ ดังตาราง 2.2

ตาราง 2.2 สมการความสัมพันธ์ของค่าคงที่การอบแห้งกับอุณหภูมิของอากาศอบแห้งของวัสดุต่างๆ

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)

2.3.3 สมการจลนศาสตร์ของการอบแห้งเอมไพริคัล (Empirical Drying Kinetic Equation)

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

$$\overline{MR} = \frac{\overline{M} - M_{eq}}{M_{in} - M_{eq}} = \exp(-pt^{n}) \qquad (2.14)$$

เมื่อ M_{in} คือ ความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง

M_{eq} คือ ความชื้นสมดุลของวัสดุ, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง

p,n คือค่าคงที่

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 2.3 สมการความสัมพันธ์ของค่าคงที่ในสมการของ Page

วัสดุ	สมการ	เงื่อนไข	ที่มา
ข้าวโพดพันธุ์สุวรรณ 1	$P = 4.413\times10^{-3} + 1.637\times10^{-4}T + 1.723\times10^{-2}M_{in} + 2.354\times10^{-2}TM_{in}$ $n = 0.3982 + 7.779\times10^{-4}T - 0.1851M_{in} + 5.258\times10^{-3}TM_{in}$	อุณหภูมิ 45 -70°C M_{in} = 18-36 db.	อรุณี และคณะ(2533)
มะม่วงหิมพานต์	$P = 0.14 + 3.72\times10^{-4}T - 0.031d$ $n = 0.38 + 6.7\times10^{-3}T$ หมายเหตุ : (d = ความหนา)	อุณหภูมิ 45 -70°C M_{in} =18-36 db. ขนาด 2-4 mm	Madanba et al. (1996)

2.4 สมการอัตราส่วนอุณหภูมิเนื้อลำไย

Pabis and Henderson (1962) สร้างอัตราส่วนอุณหภูมิจากข้อมูลการอบแห้งเมล็ดพืช เพื่อใช้ทำนายอุณหภูมิขณะอบแห้งของเมล็ดพืช ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ในรูปอัตราส่วนอุณหภูมิกับเวลาอบแห้ง ดังรูปแบบสมการ

$$TR = \frac{(T(t) - T_0)}{(T_h - T_0)} = 1 - \exp(-kt^n) \qquad (2.15)$$

เมื่อ TR คือ อัตราส่วนอุณหภูมิเนื้อลำไย

T(t) คือ อุณหภูมิลำไยที่เวลาใดๆ (^0C)

T_0 คือ อุณหภูมิลำไยเริ่มต้น (^0C)

T_h คือ อุณหภูมิห้องอบแห้ง (^0C)

t คือ เวลาอบแห้ง (h)

k,n คือ ค่าคงที่

บัญชา พุทธการ (2547) ได้วิเคราะห์หาสมการอัตราส่วนอุณหภูมิของลิ้นจี่ สร้างสมการความสัมพันธ์ของค่าคงที่ k และn ดังสมการ

k = 1.717121-0.007684T

n = -0.094683+0.003765T

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.5 ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง

Nonhebl and Moss (1971) กล่าวว่าสภาวะการอบแห้งสามารถเปลี่ยนแปลงได้ เนื่องจากการดำเนินงานและการควบคุม สภาวะภายนอกที่สำคัญและมีผลต่ออัตราการอบแห้งวัสดุได้แก่ อุณหภูมิของลมร้อน ความเร็วของลมร้อน ความชื้นสัมพัทธ์ของลมร้อน และน้ำหนักของวัสดุอบแห้งต่อหน่วยพื้นที่ นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่น ๆ เช่นการกวน การแบ่งขนาดของชิ้นวัสดุ

2.5.1 อุณหภูมิของลมร้อน

โดยปกติการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดที่ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิของการอบแห้งจะถูกควบคุมโดยเครื่องควบคุมอุณหภูมิ ในกรณีดังกล่าวถือว่าอุณหภูมิเป็นปัจจัยคงที่ ในกรณีที่มีการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิในขณะอบแห้งจะถือว่าอุณหภูมิมีผลต่ออัตราการอบแห้งเป็นอย่างมาก ในกรณีการอบแห้งวัสดุที่ความเร็วลมร้อนคงที่ อัตราการอบแห้งจะขึ้นอยู่กับผลต่างของอุณหภูมิกระเปาะเปียกกับกระเปาะแห้งของอากาศร้อนเท่านั้น ดังนั้นอัตราการอบแห้งมีค่าสูง เมื่ออุณหภูมิกระเปาะแห้งมีค่าสูงและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศมีค่าต่ำสุด ในช่วงของอัตราการอบแห้งคงที่ อัตราการอบแห้งจะขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน และผลต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศแห้งเท่านั้น ส่วนในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงวัสดุอบแห้งมีแนวโน้มจะแห้งเร็วขึ้นถ้าอุณหภูมิในการอบแห้งเพิ่มขึ้น (Borgstrom, 1968)

2.5.2 ความเร็วของลมร้อน

ความเร็วของลมร้อนไม่ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของอากาศ อุณหภูมิและการนำอากาศที่ใช้แล้วมาผสมกับอากาศแวดล้อม แม้ว่าการนำอากาศที่ใช้แล้วมาผสมกับอากาศแวดล้อมทำให้องค์ประกอบและคุณสมบัติของอากาศร้อนเปลี่ยนแปลงไป แต่จะไม่มีผลต่อความเร็วของลมร้อน โดยปกติในการอบแห้งจะควบคุมให้ความเร็วของลมร้อนคงที่ตลอดช่วงของการอบแห้ง ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วของลมร้อน ความเร็วของลมร้อนมีผลต่ออัตราการอบแห้ง เนื่องจากความเร็วของลมร้อนจะมีผลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ดังนั้นถ้าปัจจัยอื่น ๆ คงที่การอบแห้งที่ความเร็วลมร้อนสูง จะทำให้อัตราการอบแห้งดีขึ้น (Brennan et al., 1986)

2.5.3 ความชื้นของลมร้อน

ความชื้นจะขึ้นอยู่กับสัดส่วนของอากาศที่ใช้แล้วกับอากาศแวดล้อมและยังขึ้นอยู่กับอัตราการอบแห้งที่เวลาใด ๆ หากลมร้อนมีความชื้นสูงจะทำให้ความสามารถในการดึงน้ำในวัสดุอบแห้งต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของลมร้อนลดลง นั่นคืออัตราการอบแห้งจะลดลงด้วย และ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ในทางทฤษฎีสามารถที่จะควบคุมความชื้นของลมร้อนได้ โดยการควบคุมการผสมของอากาศที่ใช้แล้ว กับอากาศแวดล้อม ซึ่งหากเพิ่มการผสมของอากาศที่ใช้แล้วกับอากาศแวดล้อมมากขึ้นเท่าใด อัตราการอบแห้งจะลดลงมากขึ้นเท่านั้น ในทางปฏิบัติแล้วไม่สามารถควบคุมการผสมของอากาศที่ใช้แล้วกับอากาศแวดล้อมได้แน่นอน และวิธีที่นิยมทดลองกันคือ การลองผิดลองถูก หรือหาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้น, อัตราการอบแห้งขณะใดขณะหนึ่งและสัดส่วนของการผสมของอากาศที่ใช้แล้วกับอากาศแวดล้อม โดยการสมดุลมวลสาร (Hield and Josly, 1967)

2.5.4 น้ำหนักของวัสดุต่อหน่วยพื้นที่หรือความหนาของชิ้นวัสดุ

ในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ อัตราการอบแห้งจะขึ้นอยู่กับลักษณะของพื้นผิววัสดุเท่านั้น ดังนั้นความหนาของวัสดุไม่มีอิทธิพลต่ออัตราการอบแห้งในช่วงนี้เลย แต่เมื่อถึงช่วงอัตราการอบแห้งลดลง การแพร่ของน้ำจากภายในสู่พื้นผิวของวัสดุซึ่งเกิดการระเหยจะเป็นตัวควบคุมอัตราการอบแห้ง ในช่วงนี้การเพิ่มความหนาของชั้นวัสดุจะทำให้อัตราการอบแห้งลดลง ดังนั้นในเครื่องอบแห้งแบบถาดจึงจำเป็นต้องกำหนดความหนาของชั้นวัสดุที่เหมาะสมด้วย (Somogyi and Lun, 1986)

2.5.5 ปัจจัยอื่น ๆ

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

2.6 การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจากกระบวนการอบแห้ง

การอบแห้งเป็นกระบวนการที่ซับซ้อนและเกี่ยวข้องทั้งการถ่ายเทมวลสารและการถ่ายเทความร้อน โดยการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเกิดทั้งทางกายภาพและทางโครงสร้าง คุณภาพสุดท้ายที่ได้ของการอบแห้งอาหารส่วนหนึ่งก็ขึ้นกับคุณภาพตอนเริ่มต้น นอกจากนี้ยังขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการอบแห้งด้วย

2.6.1 การหดตัว (Shrinkage)

ระหว่างการอบแห้งนั้น ความชื้นจะมีการเคลื่อนย้ายตัวซึ่งจะทำให้มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในและทำให้เกิดการหดตัวของผลิตภัณฑ์ โดยการหดตัวอาจจะเกิดขึ้นเนื่องจาก 2 เหตุผลคือ อย่างแรก, เนื่องจากเมื่อโครงสร้างที่เคยมีน้ำอยู่น้ำหายไปหรือมีอากาศเข้ามา เนื้อเยื่อไม่สามารถที่จะยึดโครงข่ายของโครงสร้างทั้งหมดไว้ได้ เหตุผลต่อมา, เกิดการ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

พังทลายของโครงสร้างภายนอก กรณีนี้ที่ผิวของผลิตภัณฑ์จะแข็งตัว ซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติการหดตัว ซึ่งในกรณีนี้แม้โครงสร้างภายในของผลิตภัณฑ์จะพังทลาย ปริมาตรส่วนใหญ่อาจเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเท่านั้น

2.6.2 การดูดคืนน้ำ (Rehydration)

การดูดคืนน้ำไม่ใช่ปฏิกิริยาย้อนกลับของการทำแห้ง การเปลี่ยนแปลงด้านลักษณะเนื้อสัมผัส การเคลื่อนที่ของตัวทำละลายและการสูญเสียสารระเหยไม่สามารถเกิดแบบย้อนกลับไปเหมือนเดิมได้ ความร้อนสามารถลดระดับการดูดคืนน้ำของแป้งและความยืดหยุ่นของผนังเซล ทำให้โปรตีนจับตัวกันและลดความสามารถในการอุ้มน้ำ อัตราเร็วและระดับของการดูดคืนน้ำอาจใช้เป็นตัวชี้วัดคุณภาพของอาหารได้ อาหารที่ทำแห้งภายใต้สภาวะที่เหมาะสมมากกว่าจะเกิดความเสียหายน้อยกว่า และดูดคืนน้ำได้เร็วกว่าอาหารที่ทำให้ที่สภาวะเหมาะสมน้อยกว่า (วิไล, 2543)

อัตราการดูดคืนน้ำ (Rehydration ratio) เป็นสัดส่วนระหว่างมวลตัวอย่างที่ดูดคืนน้ำ (mass of rehydration sample) ต่อมวลของตัวอย่างแห้ง (dried mass sample) แสดงได้ดังสมการ 2.16

$$\text{Rehydration ratio} = \frac{b}{a} \qquad (2.16)$$

เมื่อ b คือ มวลตัวอย่างที่ดูดน้ำ,g

a คือ มวลตัวอย่างแห้ง, g

2.6.3 เนื้อสัมผัส (Texture)

อุณหภูมิและอัตราการทำแห้งมีผลอย่างมากต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของอาหาร โดยทั่วไปการทำแห้งโดยรวดเร็วที่อุณหภูมิสูงจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงมากกว่าการทำแห้งที่อุณหภูมิและอัตราการทำแห้งที่ต่ำกว่า ตัวละลายจะเคลื่อนที่จากภายในของอาหารไปที่ผิว ระหว่างที่น้ำจะถูกกำจัดออกในระหว่างการทำแห้ง กลไกและอัตราการเคลื่อนที่มีความจำเพาะสำหรับตัวทำละลายแต่ละชนิดและขึ้นอยู่กับชนิดของอาหารและสภาวะการทำแห้ง การระเหยน้ำทำให้ตัวทำละลายที่ผิวอาหารมีความเข้มข้นมากขึ้น อุณหภูมิที่สูงของอากาศทำให้อาหาร โดยเฉพาะผลไม้ ปลา และเนื้อ เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและทางกายภาพอย่างซับซ้อนที่ผิวหน้าอาหารและทำให้ผิวอาหารแห้งแข็ง หรือที่เรียกว่า การเกิดผิวแห้งแข็ง (Case hardening) ซึ่งเป็นปัจจัยที่จะไปลดอัตราการทำแห้ง และทำให้อาหารที่มีผิวหน้าแห้งแต่ภายในชื้น การควบคุมสภาวะการอบแห้ง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นภายในและที่ผิวของอาหาร จะช่วยลดเหตุการณ์ดังกล่าวได้

2.6.4 สี (Color)

อาหารอบแห้งจะมีคุณสมบัติทั้งทางเคมีและทางกายภาพที่เปลี่ยนแปลงไป สีของอาหารจะเปลี่ยนไป เม็ดสีพวกแคโรทีนอยด์และแอนโธไซยานินจะซีดจางลงถ้าใช้อุณหภูมิสูงและระยะเวลานาน หรือใช้สารบางชนิดในการอบแห้งเพื่อยับยั้งปฏิกิริยาของเอมไซม์ เช่น รมควันด้วยกำมะถัน จะทำให้สีของอาหารซีดจางลง เป็นต้น ซึ่งในการวิเคราะห์คุณภาพของอาหารโดยการวัดสีนั้นก็มีหลายวิธีแต่มีวิธีที่นิยมใช้กัน คือการวัดสีด้วยเครื่องวัดสี ColorQuest 2 Colorrimeter จะวัดค่าสีในระบบฮันเตอร์ (Hunter Lab) โดย

ค่าสี L คือ ค่าความสว่าง มีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 100

a คือ ค่าสีแดง เมื่อ a มีค่าเป็นบวก เป็นค่าสีแดง

เมื่อ a มีค่าเป็นลบ เป็นค่าสีเขียว

b คือ ค่าสีเหลือง เมื่อ b มีค่าเป็นบวก เป็นค่าเหลือง

เมื่อ b มีค่าเป็นลบ เป็นค่าน้ำเงิน

2.6.4.1 สมการจลนศาสตร์ของอัตราการเปลี่ยนแปลงสี

Krokida et al., 1998 ได้สร้างสมการทางคณิตศาตร์ของสมการจลนศาตร์การเปลี่ยนแปลงสี ซึ่งเป็นไปตามสมการ 2.17

$$\frac{(C-C_e)}{(C_0-C_e)}=\exp(-k_c t) \qquad (2.17)$$

เมื่อ C คือ ค่าสี (a, b หรือ L)

C_0 คือ ค่าสีเริ่มต้นก่อนการอบแห้ง

C_e คือ ค่าที่สภาวะสมดุล

t คือ เวลาอบแห้ง (ชั่วโมง)

k_c คือ ค่าคงที่ (ชั่วโมง$^{-1}$)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.6.5 การเกิดสีน้ำตาล (Browning)

การเกิดสีน้ำตาลเนื่องจากความร้อนระหว่างการอบแห้ง (Caramellization) จะเป็นผลของเวลาอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งควบคู่กันไป ถ้าใช้อุณหภูมิสูงและใช้เวลานานจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นสีน้ำตาลเกิดขึ้น ซึ่งสันนิษฐานได้ว่าเกิดการไหม้ของน้ำตาลขึ้น การเกิดสีน้ำตาลจากความร้อนถ้าเกิดสูงขึ้นทำให้รสชาติเปลี่ยนไปและเป็นเหตุให้ปริมาณของวิตามินซีสูญเสียไป และสาเหตุอีกอันหนึ่ง สีน้ำตาลเกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาเคมีที่เรียกว่า เมลลาด(Maillard reaction) ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของกลุ่มพวกอัลดีไฮด์ (Aldehyde) หรือพวก (Ketone) กับสารประกอบอะมิโน ซึ่งก่อให้เกิดสารประกอบที่มีโมเลกุลใหญ่สีน้ำตาลขึ้น

ถึงแม้ว่าการเกิดสีน้ำตาลจากจากปฏิกิริยา เมลลาด (Maillard reaction) จะไม่มาก แต่ก็มีผลต่อการยอมรับของผู้บริโภค เพราะทำให้คุณค่าทางอาหารลดลง สารประกอบที่ให้สีน้ำตาลส่วนใหญ่จะเป็นพวก Unsaturated Polycarboxylic acid และสารประกอบที่มีสีเหล่านี้มักก่อให้เกิดสารระเหยที่มีสมบัติให้กลิ่นคือ Substituted pyrazines ซึ่งจะทำให้กลิ่นผิดปกติ ไม่เป็นที่ยอมรับกับผู้บริโภค (สิงหนาท, 2533)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved