บทที่ 2

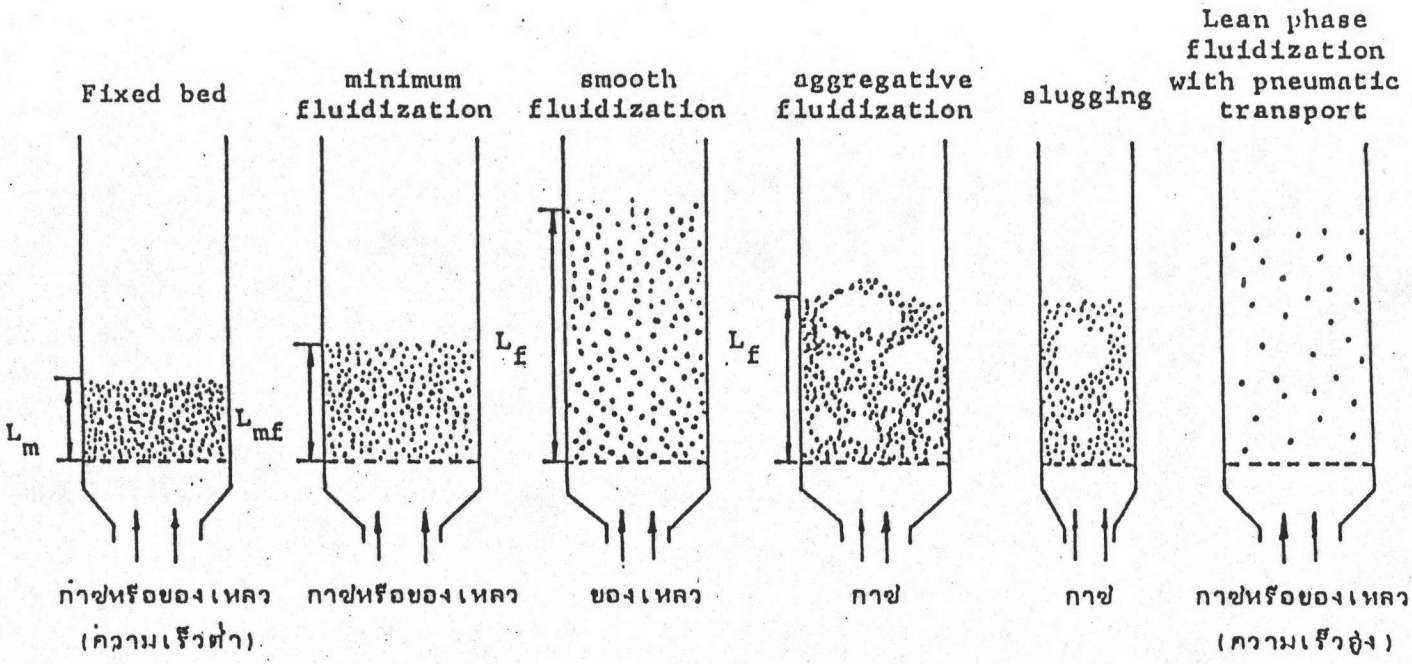
วารสารปริทรรศน์

2.1 ลักษณะทั่วไปของฟลูอิดไดซ์เบด (4)

ฟลูอิดไดซ์เซชั่นเป็นปฏิบัติการอย่างหนึ่งที่ของแข็งเปลี่ยนสภาพเป็นลักษณะคล้ายของไหลอันเนื่องมาจากการประทะกับกาซหรือของเหลว

เมื่อผ่านของไหลไปยังกลุ่มอนุภาคของแข็งหรือเบด (bed) ซึ่งบรรจุในคอลัมน์ดังรูปที่ 2-1 จะพบว่าที่ความเร็วของไหลต่ำ ๆ อนุภาคของแข็งจะไม่ขยับตัว ซึ่งลักษณะเช่นนี้เรียกว่า เบดนิ่ง (fixed bed) แต่เมื่อค่อย ๆ เพิ่มความเร็วของของไหลขึ้น กลุ่มอนุภาคของแข็งจะเริ่มขยับตัว มีการจัดตัวอย่างเป็นระเบียบ และเมื่อเพิ่มความเร็วของของไหลขึ้นอีก อนุภาคของแข็งจะแยกออกจากกันและลอยตัวอย่างอิสระ ที่จุดนี้ แรงพยุงอนุภาคของแข็งเนื่องจากของไหล จะสมดุลย์กับน้ำหนักของอนุภาคของแข็ง ลักษณะเช่นนี้เรียกว่า เบดเริ่มฟลูอิดไดซ์ (incipiently fluidized bed) หลังจากเบดเริ่มฟลูอิดไดซ์แล้ว ถ้าเพิ่มความเร็วของของไหลขึ้นอีกจะทำให้เบดขยายตัวเพิ่มขึ้นโดยทั่วไป ในกรณีที่ของไหลเป็นของเหลว ลักษณะการขยายตัวของเบดจะสม่ำเสมอ (particulately fluidized bed) แต่เมื่อของไหลเป็นกาซมักจะเกิดการรวมตัวเป็นฟองกาซขึ้นภายในเบด (aggregative fluidized bed) ทำให้อนุภาคของแข็งเคลื่อนที่อย่างวุ่นวาย

การขยายตัวของเบดในช่วงแรกจะเห็นว่าอนุภาคของแข็งยังอยู่ชิดกันจนดูเหมือนว่า อนุภาคของแข็งเหล่านี้จับตัวเป็นกลุ่มก้อน ซึ่งลักษณะเบดเช่นนี้เรียกว่า ฟลูอิดไดซ์เบดแบบหนาแน่น (dense-phase fluidized bed) และถ้าเพิ่มความเร็วของของไหลขึ้นไป จนกระทั่งอนุภาคของแข็งถูกของไหลพาออกจากคอลัมน์ได้ ลักษณะเบดเช่นนี้จะเรียกว่า ฟลูอิดไดซ์เบดแบบเจือจาง (diluted-phase fluidized bed) และสามารถนำลักษณะเช่นนี้ไปใช้ใน



รูปที่ 2-1 ลักษณะต่าง ๆ ของฟลูอิดไดซ์เบด

การขนส่งของแข็งได้ เรียกว่า การขนส่งด้วยลม (pneumatic transport)

2.1.1 ความเร็วต่ำสุดของของไหลที่ทำให้เบดเกิดฟลูอิดไดซ์เชชั่น

ในขณะที่อนุภาคของแข็งเริ่มลอยตัวเป็นอิสระ อนุภาคของแข็งจะอยู่ในสภาวะ ของแรงสองแรง ที่กระทำกับอนุภาคของแข็งอย่างสมดุลกัน แรงทั้งสองคือแรงที่เกิดจากน้ำหนักของอนุภาคของแข็งเอง และแรงพยุงจากของไหล (แรงเสียดทานรวมกับแรงต้านของของไหล) เขียนเป็นความสัมพันธ์ได้คือ

แรงพยุง (แรงเสียดทาน + แรงต้าน) = น้ำหนักของอนุภาคของแข็ง

ความแตกต่างของความดันในพื้นที่ภาคตัดขวางของเบด	x	พื้นที่ภาคตัดขวางของคอลัมน์	=	ปริมาตรของเบด	x	ส่วนของอนุภาคของแข็งในเบด	x	ความถ่วงจำเพาะของอนุภาคของแข็ง

ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$(\Delta P)(A_t) = W = (A_t L_{mf})(1-e_{mf})\left[\frac{(\rho_s-\rho_g)g}{g_c}\right] \qquad (2\text{-}1)$$

จัดสมการ (2-1) ใหม่ได้เป็น

$$\frac{\Delta P}{L_{mf}} = (1-e_{mf})(\rho_s-\rho_g)\frac{g}{g_c} \qquad (2\text{-}2)$$

Ergun ได้แสดงถึงความแตกต่างของความดัน (pressure drop) ที่เกิดขึ้นเนื่องจากของไหลไหลผ่านเบด ณ จุดเริ่มฟลูอิดไดซ์เชชั่น

$$\frac{\Delta P}{L_{mf}} g_c = \frac{150(1-e_{mf})\mu u_{mf}}{e_{mf}^3(\phi_s d_p)^2} + \frac{1.75(1-e_{mf})\rho_g u_{mf}^2}{e_{mf}^3 \phi_s d_p} \quad (2-3)$$

จากสมการ (2-2) และ (2-3) นำมารวมกันจะได้

$$\frac{1.75}{\phi_s e_{mf}^3}\left[\frac{d_p u_{mf}\rho_g}{\mu}\right]^2 + \frac{150(1-e_{mf})}{\phi_s^2 e_{mf}^3}\left[\frac{d_p u_{mf}\rho_g}{\mu}\right] = \frac{d_p^3 \rho_g(\rho_s-\rho_g)g}{\mu^2} \quad (2-4)$$

จากสมการ (2-4) สามารถคำนวณหาความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เบดเกิดฟลูอิดไดซ์เซชั่น(u_{mf})ได้ถ้าทราบคุณสมบัติทางกายภาพอื่นๆ ของอนุภาคของแข็งและของไหล

สำหรับอนุภาคของแข็งขนาดเล็กและการไหลมีค่า Re (Reynold number) ต่ำความแตกต่างของความดันส่วนใหญ่เกิดจากความหนืดของของไหล เราสามารถตัดเทอมแรกของสมการ (2-4) ออกได้และสมการ (2-4) จะเหลือเพียง

$$u_{mf} = \frac{(\phi_s d_p)^2(\rho_s-\rho_g)g e_{mf}^3}{150\mu(1-e_{mf})} \qquad Re_p < 20 \quad (2-5)$$

สำหรับอนุภาคขนาดใหญ่ และค่า Re_p สูงเราสามารถตัดเทอมที่สองของสมการ (2-4) และจะได้ว่า

$$u_{mf}^2 = \frac{\phi_s d_p(\rho_s-\rho_g)g e_{mf}^3}{1.75\rho_g} \qquad Re_p > 1000 \quad (2-6)$$

ในกรณีทั่ว ๆ ไป เมื่อไม่ทราบค่า e_{mf} และ ϕ_s Wen และ Yu เสนอว่า

$$\frac{1}{\phi_s e_{mf}^3} = 14 \quad \text{และ} \quad \frac{1-e_{mf}}{\phi_s^2 e_{mf}^3} = 11 \quad (2-7)$$

ซึ่งเมื่อนำไปแทนค่าในสมการ (2-4) จะได้ว่า

$$\frac{d_p u_{mf} \rho_f}{\mu} = \left[(33.7)^2 + \frac{0.0408 d_p^3 \rho_f (\rho_s - \rho_f) g}{\mu^2} \right]^{1/2} - 33.7 \qquad (2\text{-}8)$$

ดังนั้น สำหรับอนุภาคขนาดเล็ก

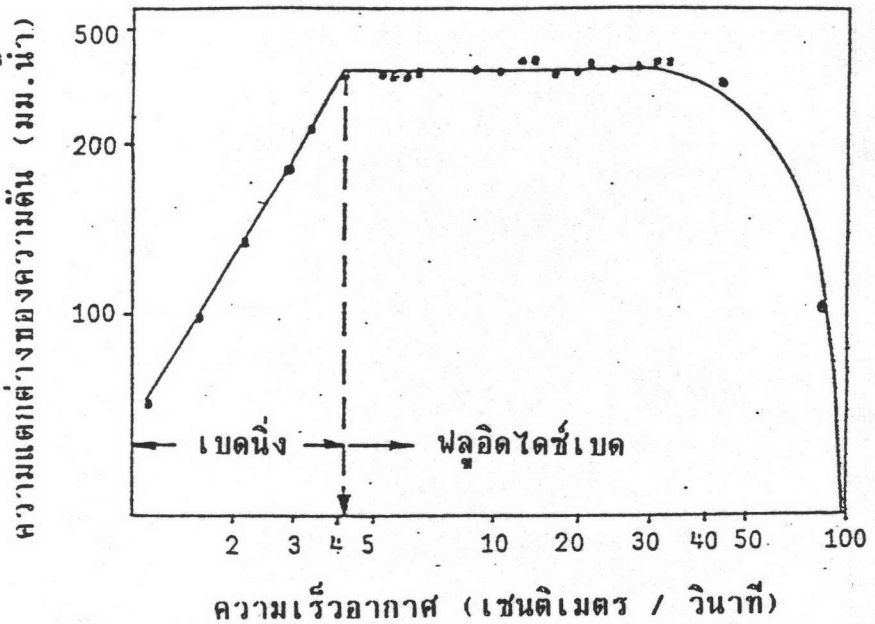
$$u_{mf} = \frac{d_p^2 (\rho_s - \rho_f) g}{1650 \mu} \qquad Re_p < 20 \qquad (2\text{-}9)$$

และสำหรับอนุภาคขนาดใหญ่

$$u_{mf}^2 = \frac{d_p^2 (\rho_s - \rho_f) g}{24.5 \rho_f} \qquad Re_p > 1000 \qquad (2\text{-}10)$$

2.1.2 ความแตกต่างของความดันในฟลูอิดไดซ์เบด

เมื่อพิจารณาสมการ (2-3) จะพบว่าความแตกต่างของความดันขึ้นอยู่กับความเร็วของของไหล เมื่อค่าความหนืดและขนาดของของแข็งมีค่าคงที่ รูปที่ 2-2 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของของไหลที่ไหลผ่านเบดที่เป็นของแข็ง และความแตกต่างของความดันของเบดโดยพบว่าที่ความเร็วของของไหลต่ำ ๆ ความแตกต่างของความดันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเร็ว ความแตกต่างของความดันจะเพิ่มขึ้นตามความเร็วที่เพิ่มขึ้นจนถึงจุดหนึ่งความแตกต่างของความดันสูงสุด หลังจากนั้นถ้าหากเพิ่มความเร็วของการไหลมากขึ้น เบดซึ่งแต่เดิมอยู่กับที่ (fixed bed) ก็จะเริ่มขยับตัว ความเร็วของของไหลตอนนี้เรียกว่า ความเร็วต่ำสุดของของไหลที่ทำให้เบดเริ่มฟลูอิดไดซ์ และสัดส่วนช่องว่างของเบดขณะนี้ คือ e_{mf} และเมื่อความเร็วของของไหลเพิ่มขึ้นไปเรื่อย ๆ สัดส่วนช่องว่างก็จะเปลี่ยนไปเป็น e_f แต่ค่าความแตกต่างของความดันจะคงที่อยู่เสมอ และจะลดต่ำลงเมื่อของแข็งเริ่มถูกของไหลพาออกจากคอลัมน์ไป ความเร็ว ณ จุดนี้เรียกว่า ความเร็วตกอิสระของอนุภาค



รูปที่ 2-2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของความดันกับความเร็วของอากาศ

2.1.3 ความเร็วตกอิสระของอนุภาค

ในฟลูอิดไดซ์เบด เมื่อของไหลมีความเร็วเพิ่มขึ้นจนถึงจุดหนึ่ง อนุภาคของแข็งจะเริ่มถูกพาออกไปจากคอลัมน์ ความเร็วที่จุดนี้จะประมาณค่าได้ จากความเร็วตกอิสระของอนุภาคซึ่งหาค่าได้จาก

$$u_t = \left[\frac{4gd_p(\rho_s-\rho_f)}{3\rho_f Cd} \right]^{1/2} \qquad (2\text{-}11)$$

เมื่อ Cd เป็นค่าสัมประสิทธิ์ซึ่งหาค่าได้จากการทดลอง

ในการหาค่า ความเร็วตกอิสระของอนุภาค เมื่ออนุภาคเป็นทรงกลม จะพบว่า

$Cd = 24 / Re_p$ $\quad Re_p < 0.4$

$Cd = 10 / Re_p^{1/2}$ $\quad 0.4 < Re_p < 500$

$Cd = 0.43$ $\quad 500 < Re_p < 200000$

จะพบว่าเมื่อนำค่า Cd ในช่วง Re_p ต่างๆ ไปแทนในสมการ (2-11) จะได้ว่า

$$u_t = \frac{gd_p^2(\rho_s-\rho_f)}{18\mu} \qquad (2\text{-}12.1)$$

$$u_t = \left[\frac{4g^2(\rho_s-\rho_f)^2}{225\ \rho_f u}\right]^{1/3} d_p \qquad (2\text{-}12.2)$$

$$u_t = \left[\frac{3.1gd_p(\rho_s-\rho_f)}{\rho_f}\right]^{1/2} \qquad (2\text{-}12.3)$$

นอกจากนี้ค่า U_t ยังหาได้จากรูปที่ 2-3 ซึ่งหาได้ทั้งอนุภาคที่เป็นทรงกลมและไม่ใช่ทรงกลมเมื่อ

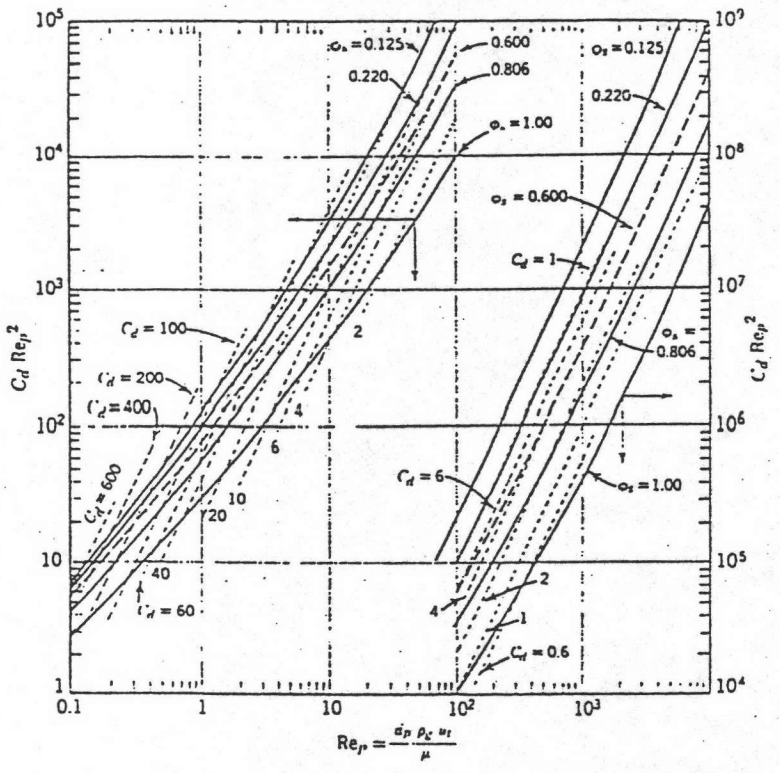
$$Re_p = \frac{d_p\rho_f u_t}{\mu} \qquad (2\text{-}13)$$

และ $$CdRe_p^2 = \frac{4gd_p^3\rho_f(\rho_s-\rho_f)}{3\mu^2} \qquad (2\text{-}14)$$

เนื่องจากขนาดของอนุภาคมีความสัมพันธ์กับความเร็วตกอิสระของอนุภาค ดังนั้นเพื่อป้องกันการหลุดออกจากคอลัมน์ของอนุภาค ค่าความเร็วตกอิสระจะคำนวณจากขนาดของอนุภาคที่เล็กที่สุด ในขณะที่ค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์เซชั่น จะคำนวณจากขนาดโดยเฉลี่ยของอนุภาค ดังนั้นในการหาอัตราส่วนของความเร็วตกอิสระของอนุภาคทรงกลมและความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์เซชั่น จะได้ว่า เมื่ออนุภาคมีขนาดเล็ก ,Re_p<0.4

$$\frac{u_t}{u_{mf}} = \frac{g(\rho_s-\rho)_f d_p^2}{18\mu} \Big/ \frac{d_p^2(\rho_s-\rho_f)g}{1650\mu} = 91.6$$

เมื่ออนุภาคมีขนาดใหญ่ , Re_p > 1000



รูปที่ 2-3 กราฟหาค่าความเร็วตกอิสระ (terminal velocity)

016905

$$\frac{u_t}{u_{mf}} = \left[\frac{3.1g(\rho_s-\rho_g)d_p}{\rho_g}\right]^{1/2} / \frac{d_p(\rho_s-\rho_g)g}{24.5\rho_g} = 8.72$$

2.2 การอบแห้ง (5,6)

การอบแห้ง หมายถึง การนำเอาน้ำหรือของเหลวออกจากวัตถุต่างๆ ซึ่งภายหลังการอบแห้งวัตถุนั้นจะมีปริมาณความชื้นลดลงมาอยู่ในระดับที่ต้องการ ในการอบแห้งจะมีสองกระบวนการที่เข้ามาเกี่ยวข้องคือ การถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวล การถ่ายเทความร้อนจะเกิดที่วัตถุเพื่อใช้ในการระเหยน้ำหรือของเหลวในวัตถุให้เป็นไอ และถ่ายเทออกจากวัตถุซึ่งทำให้เกิดการถ่ายเทมวลขึ้น

ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งได้แก่

1. การกระจายของความชื้นหรือพื้นที่ผิวของวัตถุ ถ้าวัตถุที่อบแห้งมีพื้นที่ผิวมากจะทำให้แห้งได้เร็วกว่าวัตถุที่มีพื้นที่ผิวน้อย

2. ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างตัวกลางที่ให้ความร้อนและวัตถุที่จะอบแห้ง ซึ่งความแตกต่างของอุณหภูมิจะเป็นอัตราส่วนหยาบๆ กับอัตราการอบแห้ง

3. การกวนหรือการเคลื่อนที่ของวัตถุที่จะอบแห้ง มีผลทำให้อัตราการอบแห้งเร็วขึ้น

4. ขนาดของวัตถุ วัตถุที่มีขนาดเล็กย่อมอบแห้งได้เร็วกว่าวัตถุชนิดเดียวกันขนาดใหญ่ เนื่องมาจาก การแพร่ของความชื้นจากภายในของวัตถุไปยังพื้นผิว

5. โครงสร้างของวัตถุ วัตถุที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนภายในย่อมอบแห้งได้เร็วกว่าวัตถุที่มีความหนาแน่นมาก

2.2.1 หลักการอบแห้ง

ในการอบแห้งข้าวโพด ซึ่งมีลักษณะเป็นไฮโกรสโคปิค (Hygroscopic material) จะสามารถแบ่งช่วงการอบแห้งได้เป็น 2 ช่วง คือ

1. ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (constant rate period) ในช่วงนี้ อัตราการอบแห้งจะไม่ขึ้นกับปริมาณความชื้นของวัตถุ โดยผิวของวัตถุจะอยู่ในสภาพเปียกตลอดเวลา เพราะว่าการเคลื่อนที่ของความชื้นในวัตถุมายังผิวมีความเร็วมากกว่าการระเหยของความชื้นที่ผิววัตถุ(7) และอุณหภูมิที่ผิวของวัตถุจะเท่ากับอุณหภูมิของกระเปาะเปียก (wet bulb temperature) อัตราการอบแห้งในช่วงนี้จะขึ้นกับสภาพแวดล้อมภายนอก(8,9) ได้แก่

- อุณหภูมิของอากาศ
- ความชื้นของอากาศ
- ความเร็วของอากาศ
- อื่นๆ

ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่จะสิ้นสุดลงที่จุดวิกฤต (Critical point) ซึ่งค่าความชื้นที่จุดนี้เรียกว่า ค่าความชื้นวิกฤต (Critical moisture content) โดยมีค่าขึ้นกับชนิดของวัตถุ(7) ความหนาของวัตถุ และอัตราการอบแห้ง(10)

ในกรณีที่การถ่ายเทความร้อนเป็นแบบการพาความร้อน (convection) จากอากาศร้อนเพียงอย่างเดียว จะหาอัตราการอบแห้งได้จาก(7)

$$\frac{dw}{dt} = \frac{-hA\ (Ta - Tw)}{\Delta h_v} \qquad (2\text{-}15)$$

เมื่อ $\frac{dw}{dt}$ = อัตราการอบแห้ง, kg/s

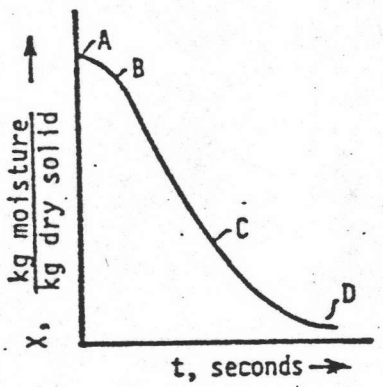
w = น้ำหนักวัตถุที่อบแห้ง, kg

h = สัมประสิทธิ์การพาความร้อน, $W/(^{\circ}C \cdot m^2)$

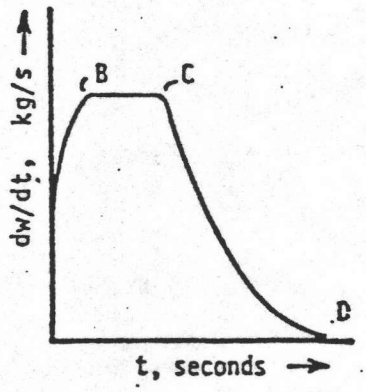
A = พื้นที่ผิวสำหรับการถ่ายเทมวลและความร้อน, m^2

$Ta - Tw$ = ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างอุณหภูมิกระเปาะแห้งและอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศ, c หรือ k

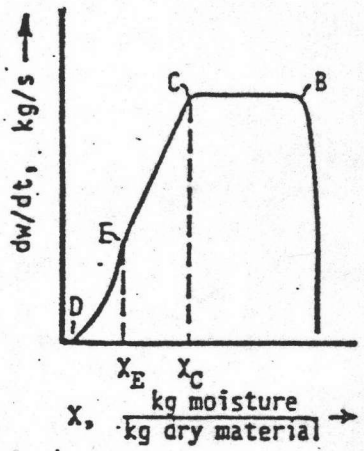
Δh_v = เอนทาลปีของการระเหยที่อุณหภูมิกระเปาะเปียก ,J/kg



รูปที่ 2-4 ปริมาณความชื้นเป็นฟังก์ชั่นของเวลาที่ใช้อบแห้ง



รูปที่ 2-5 อัตราการอบแห้งเป็นฟังก์ชั่นของเวลาที่ใช้อบแห้ง



รูปที่ 2-6 อัตราการอบแห้งเป็นฟังก์ชั่นของปริมาณความชื้น

จากรูป A - B แสดงถึงช่วงการอุ่นวัตถุ (warm up)

B - C แสดงถึงช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant rate period)

C - E แสดงถึงช่วงแรกของอัตราการอบแห้งลดลง (First phase of falling rate period)

E - D แสดงถึงช่วงหลังของอัตราการอบแห้งลดลง (Second phase of falling rate period)

เวลาที่ใช้ในการอบแห้งจะหาได้จาก

$$t_c = \frac{(W_o - W_c)\,\Delta h_v}{hA\,(Ta - Tw)} \qquad (2\text{-}16)$$

เมื่อ W_o = น้ำหนักวัตถุเริ่มต้น

W_c = น้ำหนักวัตถุที่จุดความชื้นวิกฤต

2. ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling rate period) ในช่วงนี้สามารถแบ่งได้(8,9,11) เป็นสองช่วงย่อยคือ

ก. ช่วงแรกของอัตราการอบแห้งลดลง (First phase of falling rate period) ช่วงนี้เกิดจากการลดลงของพื้นที่ผิวที่เปียกของวัตถุ อัตราการอบแห้งในช่วงนี้มักเป็นเส้นตรง โดยเป็นฟังก์ชั่นของความชื้น (X)

$$-\frac{dw}{dt} = aX + b$$

$$-\frac{dw}{dt} = a\,(X - X^*) \qquad (2\text{-}17)$$

$$\therefore \quad b = -aX^*$$

เมื่อ X^* = ความชื้นของวัตถุที่สมดุลกับอากาศ (kg water / kg dry material)

เนื่องจากว่าจุดเริ่มของช่วงนี้คือ X_c และสิ้นสุดที่ X_E

$$\therefore \quad -\frac{dw}{dt} = \frac{hA\,(Ta - Tw)}{\Delta h_v} = a\,(X_c - X^*)$$

$$a = \frac{hA\,(Ta - Tw)}{\Delta h_v (Xc - X^*)}$$

$$\therefore \quad -\frac{dw}{dt} = \frac{hA\,(Ta - Tw)}{\Delta h_v} \cdot \frac{(X - X^*)}{(X_c - X^*)} \qquad (2\text{-}18)$$

จาก $dw = W_s dX$

เมื่อ W_s = มวลของวัตถุแห้ง, kg

อินทิเกรตสมการ (2-18) จาก X_E ถึง X_c จะได้

$$t_{f1} = \frac{W_s\,\Delta h_v\,(X_c - X^*)}{hA(Ta-Tw)} \ln \frac{X_c - X^*}{X_E - X^*} \qquad (2\text{-}19)$$

ซึ่งมีข้อควรระวังคือในที่นี้ให้ X^* เป็นค่าคงที่ ซึ่งโดยทั่วไป ค่า X^* จะขึ้นอยู่กับ

1. อุณหภูมิและความชื้นของอากาศ
2. อุณหภูมิที่ผิวของวัตถุ

ข. ช่วงหลังของอัตราการอบแห้งลดลง (Second phase of falling rate period) ช่วงนี้การเคลื่อนที่ของความชื้นภายในวัตถุจะเป็นตัวควบคุมอัตราการอบแห้ง ซึ่งช่วงนี้จะเริ่มต้นที่จุด X_E โดยค่าความชื้นที่จุดนี้เรียกว่า tertiary moisture content(8)

การเคลื่อนที่ของความชื้นภายในวัตถุได้มีการเสนอไว้หลายประการด้วยกัน (7,11,12,13) คือ

1. การไหลเนื่องจากการแพร่ในของแข็งเนื้อเดียวกัน
2. การไหลแบบแคปปิลารี่ (Capillary flow)
3. การไหลเนื่องจากการหดตัวและความแตกต่างของความดัน
4. การไหลเนื่องจาก vaporization - condensation
5. การไหลเนื่องจาก irreversible thermodynamic

ซึ่งโดยทั่วไปนิยมใช้การแพร่ในการนำมาพิจารณา คือ

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D \frac{\partial^2 X}{\partial Z^2} \qquad (2\text{-}20)$$

เมื่อ X = ความชื้นของวัตถุ
D = สัมประสิทธิ์ของการแพร่
Z = ระยะทางในทิศทางการแพร่

ซึ่งเมื่อพิจารณาในกรณีของแผ่น slab จะได้ว่า

หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$\frac{X - X^*}{X_E - X^*} = \frac{16}{\pi^3}\left(\exp\left[-(\pi/2L)^2 Dt\right] + \frac{1}{3^3}\exp\left[-(3\pi/2L)^2 Dt\right] + \frac{1}{5^3}\exp\left[-(5\pi/2L)^2 Dt\right] + \ldots\right) \quad (2\text{-}21)$$

เมื่อ X_E = ความชื้นเริ่มต้นของช่วงนี้ (tertiary moisture content)

L = ความหนาของ slab เมื่อทำการอบแห้งจากผิวข้างเดียวและมีสมมติฐานว่า D และ X^* มีค่าคงที่

จากสมการ (2-21) เมื่อ t มีค่ามาก สมการจะเหลือเป็น

$$\frac{X - X^*}{X_E - X^*} = \frac{16}{\pi^3}\exp\left[-(\pi/2L)^2 Dt\right] \quad (2\text{-}22)$$

และ $$t_{f2} = \frac{4L^2}{\pi^2 D}\ln\left[\frac{16X_E - X^*}{X - X^*}\right] \quad (2\text{-}23)$$

ในการอบแห้งข้าวโพดได้มีผู้เสนอสมการการอบแห้งไว้หลายแบบด้วยกัน

Van, R.D. และ G.W.Isaacs(14) และ Thompson, T.L. และคณะ(15) ได้เสนอสมการการอบแห้งของข้าวโพดจากสมมติฐานว่ากลไกการเคลื่อนที่ภายในวัตถุเป็นการแพร่ โดยมีแรงผลักดัน (driving force) คือความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น ได้สมการเป็น

$$\frac{dX}{dt} = -k(X - X^*)$$

เมื่ออินทิเกรตจะได้;

$$MR = e^{-kt} \quad (2\text{-}24)$$

เมื่อ MR = moisture ratio

$$= \frac{X - X^*}{X_o - X^*}$$

X_o = ความชื้นเริ่มต้น

k = ค่าคงที่

เรียกสมการ (2-24) ว่า half - response equation และได้มีการใส่ค่าคงที่ N ลงในสมการ (2-24)

$$MR = e^{-kt^N} \qquad (2\text{-}25)$$

Misra, M.K. และ D.B. Brooker(16) ได้จัดรูปสมการใหม่เป็น

$$X = (X_o - X^*) \exp(-kt^N) + X^* \qquad (2\text{-}26)$$

ซึ่งจากข้อมูลที่ Misra, M.K. และ D.B. Brooker ทำการทดลองจะได้ว่า

$$k = \exp(-7.1735 + 1.2793 \ln(1.8T + 32) + 0.1378V)$$

$$N = 0.811 \ln(H) + 0.0078 X_o$$

เมื่อ V = ความเร็วลม

T = อุณหภูมิ

H = ความชื้นสัมพัทธ์

ซึ่งแสดงให้เห็นว่า k เป็นฟังก์ชั่นของอุณหภูมิ (T) และความเร็วลม (v) และ N เป็นฟังก์ชั่นของความชื้นสัมพัทธ์ (H) และความชื้นเริ่มต้น (X_o)

Chittenden, D.H. และ Hustrulid, A(17,18) ได้เสนอ

สมการการแพร่ในเมล็ดทรงกลม และมีค่าความต้านทานการแพร่สม่ำเสมอทั่วทั้งเมล็ด ว่า

$$\frac{X - X^*}{X_o - X^*} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp(-n^2 kt) \qquad (2\text{-}27)$$

Chin Shu Chen และ W.H. Johnson(8,9) ได้เสนอสมการทางจลนศาสตร์ขึ้นโดยมีพื้นฐานอยู่บนสมมติฐานว่า ความต้านทานการแพร่อยู่ที่ผิวของเมล็ด และได้สมการเป็น

$$\frac{dX}{dt} = - k (X - X^*)^n \qquad (2\text{-}28)$$

โดย k, n เป็นค่าคงที่ได้จากการทดลอง
เมื่ออัตราการอบแห้งคงที่ จะได้ค่า n เป็น 0

$$\frac{dX}{dt} = - k$$

เมื่ออัตราการอบแห้งลดลงในช่วงแรก ค่า n เป็น 1

$$\frac{dX}{dt} = - k (X - X^*)$$

$$\frac{X - X^*}{X_o - X^*} = e^{-kt}$$

เมื่ออัตราการอบแห้งลดลงในช่วงหลัง จะได้ค่า n เป็นเศษส่วน

$dX/dt = - k (X - X^*)^n$ เมื่อ $0 < n < 1$

จากทั้งหมด จะเห็นได้ว่า มีการพยายามใช้สมการเป็นจำนวนมาก

อธิบายลักษณะของอัตราการอบแห้งซึ่งความถูกต้องที่ได้จะแตกต่างกันไปตามส่วน โดยจะยึดถือค่าที่ได้จากการทดลองเป็นหลัก ทั้งนี้เนื่องจากว่า เมล็ดข้าวโพดเป็นผลิตผลทางการเกษตร และมีส่วนประกอบที่ซับซ้อน ทำให้ไม่สามารถที่จะระบุกลไกการเคลื่อนที่ ของความชื้นภายในเมล็ดข้าวโพด อย่างชัดเจนลงไปได้(14) ซึ่งจากการทดลองของ Syarief , A.M. และคณะ(19) ได้แสดงให้เห็นว่า ในแต่ละส่วนภายในเมล็ดข้าวโพด มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่แตกต่างกันไป

2.2.2 เครื่องมือที่ใช้ในการอบแห้ง

เครื่องมือที่ใช้ในการอบแห้งสามารถแบ่งตามลักษณะการถ่ายเทความร้อนได้เป็น 2 จำพวก คือ

1. เครื่องอบแห้งที่รับความร้อนโดยตรง(Direct-Heat Dryers) เครื่องอบแห้งชนิดนี้จะมีตัวกลาง เช่น ลมร้อนพัดปะทะหรือพัดผ่านวัตถุที่ต้องการอบแห้งโดยตรง และทำการถ่ายเทความร้อน พร้อมทั้งรับเอาไอของน้ำหรือของเหลวที่ระเหยจากวัตถุออกนอกเครื่องอบแห้ง ลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเครื่องอบแห้งชนิดนี้ จะเป็นแบบการพาความร้อน (heat convection) ซึ่งมีข้อดี คือ สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ง่ายโดยวัดและควบคุมอุณหภูมิจากตัวกลาง เช่น อากาศร้อนที่เข้าสู่เครื่อง อุณหภูมิของวัตถุที่อบแห้งในเครื่องชนิดนี้จะไม่เกินอุณหภูมิของอากาศร้อนที่ใช้ ทำให้มั่นใจได้ว่าวัตถุที่อบแห้งจะไม่มีการเสื่อมเสียเนื่องจากอุณหภูมิที่สูงเกินไป แต่ก็มีข้อเสียคืออาจเกิดการปนเปื้อน หรือเกิดการสูญเสียของผลิตภัณฑ์ในรูปของฝุ่นติดไปกับอากาศร้อนที่ออกจากเครื่องได้ นอกจากนี้ตัวกลางที่ถ่ายเทความร้อนอาจทำปฏิกริยากับวัตถุที่อบแห้งทำให้เกิดการเสื่อมเสียได้ จึงควรเลือกชนิดตัวกลางที่เหมาะสม เช่น ใช้กาซเฉื่อยแทนอากาศ ในกรณีวัตถุที่อบแห้งทำปฏิกริยากับออกซิเจนในอากาศได้ เป็นต้น

2. เครื่องอบแห้งที่ไม่ได้รับความร้อนโดยตรง (Indirect-Heat Dryers) เครื่องอบแห้งชนิดนี้แตกต่างจากเครื่องอบแห้งชนิดแรกตรงที่การถ่ายเทความร้อนจะเป็นแบบการนำความร้อน (heat conduction) ผ่านผนังซึ่งมักทำจากโลหะไปยังวัตถุที่ต้องการอบแห้ง ข้อดี

ของเครื่องอบแห้งชนิดนี้ มาจากการที่มีผนังกั้นระหว่างวัตถุและแหล่งความร้อน ทำให้ไม่มีปัญหาการปนเปื้อนหรือการเกิดฝุ่น รวมทั้งไม่มีการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของวัตถุ อันเนื่องมาจาก การปะทะกับตัวกลางที่นำความร้อนมาถ่ายเทให้ อีกทั้งการแยกไอระเหยจากวัตถุกลับมาใช้ยังทำได้โดยสะดวก

นอกจากแบ่งจำพวกเครื่องอบแห้ง จากลักษณะ การถ่ายเทความร้อน แล้วยังอาจแบ่งตามลักษณะการดำเนินการได้เป็น 2 จำพวก คือ แบบครั้งคราว หรือ แบบไม่ต่อเนื่อง (Batch operation) และแบบต่อเนื่อง (Continuous operation) ซึ่งมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไปคือ

ข้อดีของเครื่องอบแห้งแบบต่อเนื่อง

1. ใช้แรงงานน้อยและประหยัดเชื้อเพลิง
2. ใช้พื้นที่น้อยกว่าเครื่องอบแห้งแบบไม่ต่อเนื่อง
3. คุณภาพผลิตภัณฑ์ มีความสม่ำเสมอ

ข้อดีของเครื่องอบแห้งแบบไม่ต่อเนื่อง

1. มีราคาถูก
2. ค่าบำรุงรักษาต่ำ
3. ง่ายในการปฏิบัติการ
4. มีความยืดหยุ่นมาก

2.2.3 การอบแห้งในฟลูอิดไดซ์เบดในระบบไม่ต่อเนื่อง(4,20)

การวิเคราะห์ขบวนการอบแห้งในฟลูอิดไดซ์เบดมีความซับซ้อนมากกว่าการถ่ายเทความร้อน หรือการถ่ายเทมวลเพียงอย่างเดียวมาก การอบแห้งในฟลูอิดไดซ์เบดสามารถแบ่งได้เป็น

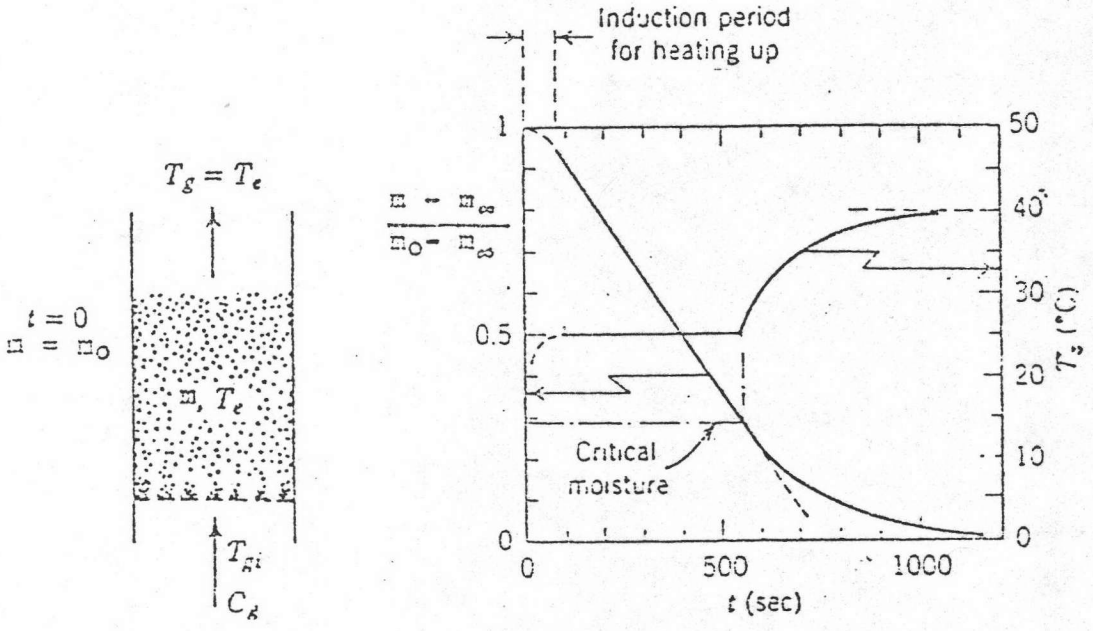
1. ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่หรือการถ่ายเทความร้อนเป็นตัวควบคุมระบบ

เมื่อพิจารณาของแข็งที่มีความชื้น นำมาอบแห้งโดยใช้กาซร้อนที่ที่อุณหภูมิเริ่มต้น Tgi เป่าขึ้นทางด้านล่างของเบดดังรูปที่ 2-7 ถ้าของแข็งมีขนาดเล็ก มีรูพรุนมาก และมีความชื้นอิสระ ของแข็งเหล่านี้จะถูกอบแห้งด้วยอัตราการอบแห้งคงที่ การถ่ายเทความร้อน และมวลสารจะเข้าสู่สมดุลอย่างรวดเร็ว ดังนั้นเบดและกาซที่ไหลออกจากคอลัมน์ จะมีอุณหภูมิใกล้กับอุณหภูมิอิ่มตัวของกาซร้อนที่ไหลเข้าคอลัมน์ สำหรับกรณีที่ไม่มีการสูญเสียความร้อนจะหาความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\left[\begin{array}{l}\text{ความร้อนที่กาซไหลเข้า}\\ \text{ในคอลัมน์สูญเสียไป}\end{array}\right] = \left[\begin{array}{l}\text{ความร้อนที่ถ่ายเทไปยังของแข็ง}\\ \text{เพื่อทำให้น้ำกลายเป็นไอ}\end{array}\right]$$

และได้สมการเป็น

$$A_c \rho_g u_o C_{pg} (T_{g,i} - T_e)\,dt = -A_c \rho_s L_m (1-e_m)\,\Delta Hv \qquad (2\text{-}29)$$



รูปที่ 2-7 การอบแห้งแบบไม่ต่อเนื่องในฟลูอิดไดซ์เบด

ถ้าความชื้นในของแข็งมีค่ามากกว่าความชื้นวิกฤต อัตราการอบแห้งจะมีค่าคงที่ สมการ (2-15) จะเป็น

$$m_o - m = \frac{p_a}{\rho_s} \frac{C_{pa}(T_{a1} - T_e)}{\Delta Hv} \frac{t}{(1-e_m)L_m/u_o} \qquad (2\text{-}30)$$

เมื่อ $m_o > m > m_{cr}$

และ m_{cr} คือค่าความชื้นวิกฤต ซึ่งค่าความชื้นที่ต่ำกว่าค่านี้จะทำให้อัตราการอบแห้งลดลงเนื่องจากอิทธิพลของการแพร่ของของเหลว

จากสมการที่ (2-30) จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงความชื้นในอนุภาคของแข็งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเร็วของกาซไหลเข้า และเป็นสัดส่วนผกผันกับความสูงของเบด

2. ช่วงอัตราการอบแห้งลดลงหรือการแพร่ของของเหลวเป็นตัวควบคุมระบบ

สำหรับเรซินและของแข็งอื่น ๆ ซึ่งมีสารที่ระเหยง่ายอยู่ภายในการแพร่ของความชื้นไปยังผิว จะมีอัตราช้ามากจนเป็นตัวควบคุมขบวนการอบแห้งทั้งหมด

การแพร่ของความชื้นในอนุภาคทรงกลม รัศมี R หาได้จากกฎของฟูเรียร์ คือ

$$\frac{\partial m_m}{\partial t} = D \frac{\partial^2 m_m}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial m_m}{\partial r} \qquad (2\text{-}31)$$

เมื่อ m_m คือค่าความชื้นที่ตำแหน่ง r และ D เป็นค่าการแพร่ของความชื้นในของแข็ง พรมแดนของระบบคือ

$$t = 0 , \quad r = r , \quad m_m = m_o$$

$$t = t\ ,\quad r = 0\ ,\quad m_m = 0$$

$$r$$

$$r = R\ ,\quad m_m = m_\infty \qquad (2\text{-}32)$$

ดังนั้นค่าความชื้นเฉลี่ยในของแข็งจะได้เป็น

$$m = \int_{r=0}^{R} \frac{4\pi r^2 m_m dr}{4/3\pi R^3} \qquad (2\text{-}33)$$

แก้สมการที่ (2-17) จะได้

$$\frac{m - m_\infty}{m_o - m_\infty} = \frac{m_f}{m_{fo}} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left| -(n\pi)^2 \frac{Dt}{R} \right| \qquad (2\text{-}34)$$

เมื่อ m_f คือความชื้นอิสระในของแข็ง

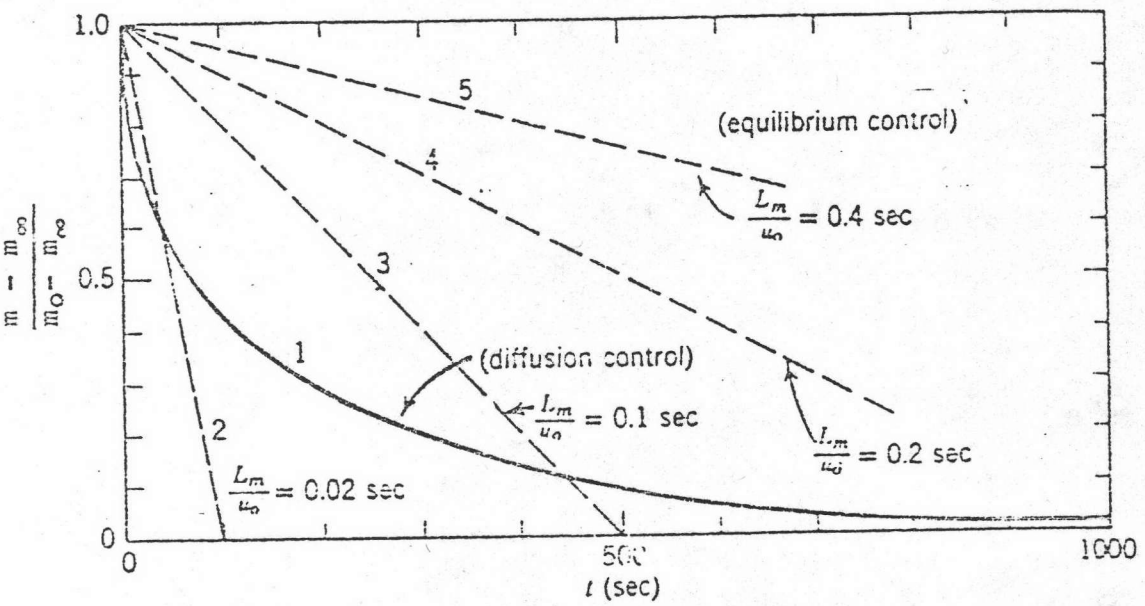
ถ้าการแพร่เป็นตัวควบคุมระบบ อัตราส่วนของความชื้นจะลดลงในลักษณะใกล้เคียงเอกโปเนนเชียล และอัตราการอบแห้งสามารถประมาณได้จากความเร็วของการอบแห้งของแข็งอนุภาคเดียว

3. ความชื้นวิกฤต และกรณีอินเทอร์มิเดียท

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นที่ลดลงกับเวลาของขบวนการอบแห้งทั้งสองแบบ แสดงในรูปที่ 2-6 ซึ่งชี้ให้เห็นว่าเมื่อใดระบบจะเป็นกรณีการแพร่ควบคุมระบบ หรือเมื่อใดจะเป็นการถ่ายเทความร้อนเป็นตัวควบคุมระบบ หรือเป็นกรณีอินเทอร์มิเดียท ตัวอย่าง เช่นในเบดที่มีความลึกมาก (L_m/u_o = 0.2 sec) การถ่ายเทความร้อนจะควบคุมระบบ เพราะอัตราการอบแห้งช้ากว่าอัตราการอบแห้งแบบการแพร่ควบคุมระบบ ในทางตรงข้ามในเบดที่มีความลึกน้อย (L_m/u_o = 0.02 sec) ขบวนการแพร่ช้ากว่าดังนั้นจึงเป็นตัวควบคุมระบบ และในกรณีอินเทอร์มิเดียท (L_m/u_o = 0.1 sec) ระบบจะเริ่มต้นด้วย การถ่ายเทความร้อนเป็นตัวควบคุมระบบ และที่เวลาประมาณ

450 วินาที ระบบจะเปลี่ยนเป็นการแพร่ควบคุมระบบ จากรูป 2-8 ความชื้นวิกฤตจะอยู่ที่ $\frac{X - X^*}{X_o - X^*} = 0.1$

ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความชื้นวิกฤตขึ้นกับความสูงของเบด และความเร็วของกาซ ทำให้สามารถสรุปได้ว่า ความชื้นวิกฤตไม่ได้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของของแข็งเพียงอย่างเดียว (D, d_p) แต่ยังขึ้นอยู่กับสภาวะของการอบแห้ง และลักษณะของเบดด้วย



รูปที่ 2-8 แสดงขั้นกำหนดความเร็วของการอบแห้งของแข็งในระบบฟลูอิดไดซ์เบดที่ไม่ต่อเนื่อง

2.3 ลักษณะและคุณสมบัติของเมล็ดข้าวโพด

2.3.1 ลักษณะโครงสร้างของเมล็ดข้าวโพด (6,22,23)

โครงสร้างของเมล็ดข้าวโพดจะประกอบด้วยส่วนต่างๆ ที่สำคัญ 4 ส่วน (รูปที่ 2-9) ดังมีรายละเอียดดังนี้

ก ส่วนชั้นนอกที่ห่อหุ้มเมล็ด (Pericap, Hull หรือ Bran) เป็นเปลือกชั้นนอกสุด ใช้หุ้มเมล็ด ลักษณะของเซลเป็นแท่งยาวอัดกัน ส่วนนี้มีประมาณร้อยละ 5.3 โดยน้ำหนักของเมล็ดทั้งหมด

ข ส่วนต้นอ่อน (Embryo หรือ Germ) ส่วนต้นอ่อนจะมีประมาณร้อยละ 11.9 โดยน้ำหนักของเมล็ดทั้งหมด ถ้าเป็นข้าวโพดที่มีน้ำมันมาก ส่วนนี้ก็จะสูงขึ้นตาม ต้นอ่อนยังแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนแรกเป็น scutellum มีประมาณร้อยละ 90 ของต้นอ่อน ทำหน้าที่เก็บอาหารระหว่างการงอก และส่วนที่สองเป็น Embryonic axis เป็นส่วนเติบโตต่อไปเป็นหน่อ

ค ส่วนแป้ง (Endosperm) เป็นส่วนสะสมอาหารพิศษนอกเหนือจากใบเลี้ยงมีประมาณ ร้อยละ 81.9 โดยน้ำหนักของเมล็ดทั้งหมด แบ่งได้เป็น 2 ส่วนคือ ส่วนแป้งแข็ง (Horny endosperm , Starch - gluten หรือ Hard starch) จะมีโปรตีนมากกว่าในแป้งอ่อน ร้อยละ 1.5-2.0 และอีกส่วนหนึ่งคือ ส่วนแป้งอ่อน (Floury endosperm หรือ Soft starch) เม็ดแป้งในส่วนนี้จะอัดกันแน่นทำให้มีผิวเรียบและเม็ดเล็ก

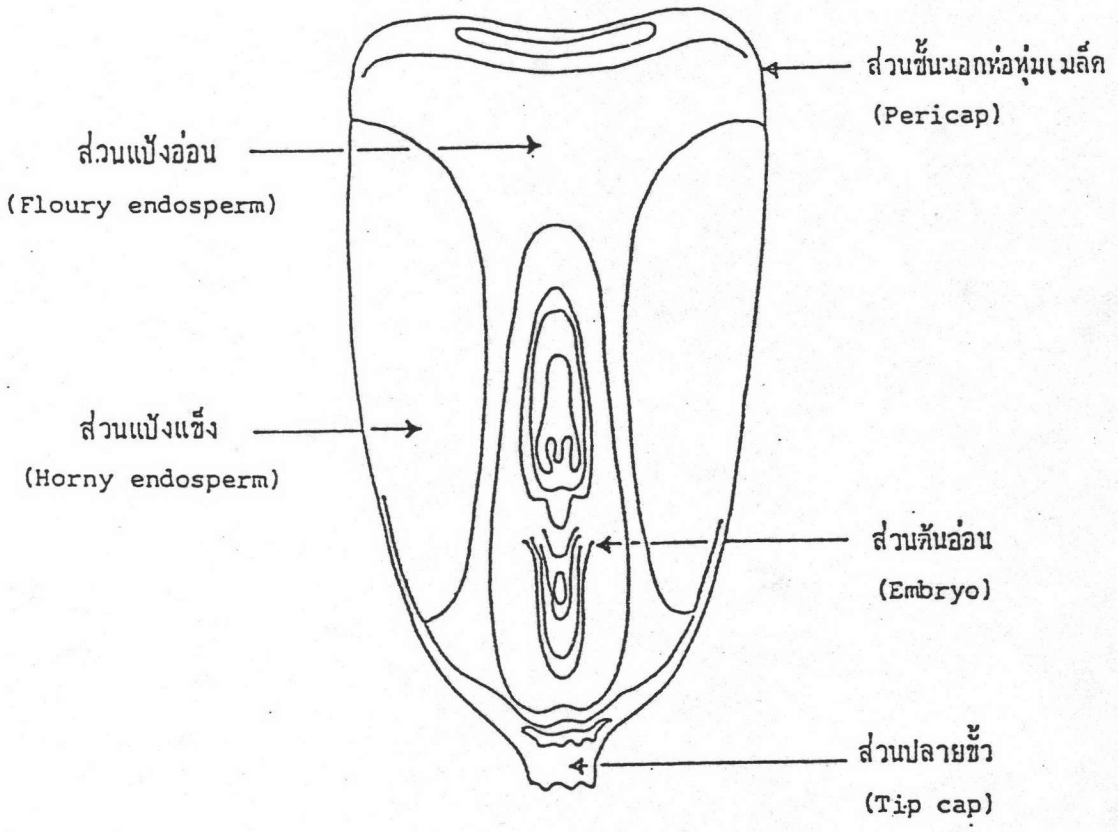
ง ส่วนปลายขั้ว (Tip cap) เป็นเนื้อเยื่อที่เมล็ดข้าวโพดติดกับซังข้าวโพดมีประมาณ ร้อยละ 0.83 โดยน้ำหนักของเมล็ดทั้งหมด ลักษณะเป็นรูปดาวยืดหยุ่นได้ อ่อนนุ่ม สามารถดูดซึมน้ำได้อย่างรวดเร็ว

2.3.2 ส่วนประกอบทางเคมีของเมล็ดข้าวโพด (1)

ข้าวโพดเป็นธัญพืชชนิดหนึ่ง ประกอบด้วยธาตุอาหาร 5 หมู่ใหญ่ๆ คือ

1. คาร์โบไฮเดรท
2. โปรตีน
3. ไขมัน
4. แร่ธาตุ
5. น้ำ

ซึ่งแสดงค่าโดยประมาณในตารางที่ 2-1 และ 2-2 นอกจากนี้ยังมีสารประกอบอื่นๆ ในปริมาณเล็กน้อยเช่น วิตะมิน เอนไซม์ เป็นต้น



รูปที่ 2-9 ลักษณะโครงสร้างของเมล็ดข้าวโพด

คาร์โบไฮเดรท (Carbohydrate)

คาร์โบไฮเดรท เป็นส่วนประกอบที่มีมากที่สุดในข้าวโพด โดยมีประมาณ 77-87 % คาร์โบไฮเดรทสามารถแบ่งได้หลายชนิด ได้แก่ แป้ง (starch) เซลลูโลส (cellulose) เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) เด็กซ์ตริน (dextrin) และน้ำตาล ซึ่งในจำนวนนี้แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรทที่สำคัญที่สุด และมีอยู่ถึงประมาณ 73% ของน้ำหนักข้าวโพดแห้ง เมล็ดแป้ง (starch granule) ประกอบด้วย 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ อะมัยโลส (amylose) ซึ่งเป็นโพลีเมอร์ของกลูโคสที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α (1-4) เป็นเส้นตรง และอะมัยโลเพคติน (amylopectin) ซึ่งเป็นโพลีเมอร์ของกลูโคสที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α (1-4) เป็นเส้นตรง และแตกแขนงด้วยพันธะ α (1-6) อย่างไม่เป็นระเบียบ อัตราส่วนของอะมัยโลสและอะมัยโลเพคติน จะแตกต่างกันไปตามพันธุ์ของข้าวโพด

เมล็ดแป้ง (starch granule) จะไม่ละลายในน้ำเย็น แต่เมื่อให้ความร้อน เมล็ดแป้งจะดูดซึมน้ำและบวมขึ้นจนกระทั่งแตกออก ซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การเกิดเจล (gelatinization)

ตารางที่ 2-1

ส่วนประกอบโดยประมาณในเมล็ดข้าวโพด

(g/100g d.b.)

Material	Protein	Fat	Crude fibre	Mineral matter	Soluble carbohydrate
Maize :					
flint	11.1	4.9	2.1	1.7	80.2
dent	10.2	4.5	3.5	2.0	80.0
sweet	12.1	9.1	2.2	2.0	74.5
popcorn	11.6	4.0	2.4	1.6	78.2

ตารางที่ 2-2

ส่วนประกอบทางเคมีในเมล็ดข้าวโพด

Material	Yield (%)	Moisture (%)	Protein (%)	Fat (%)	Ash (%)	Fibre (%)	Carbohydrate (%)
Maize grain	100	10.8	10.0	4.3	1.5	1.7	71.7

เด็กซ์ตริน (dextrin) เป็นโพลีเมอร์ของกลูโคส ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่าแป้งมีมากในข้าวโพดหวาน

เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส (cellulose and hemicellulose) เป็นส่วนประกอบสำคัญของผนังเซลและเมื่อรวมกับลิกนิน (lignin) จะได้เป็นสารจำพวกครูดไฟเบอร์ (crude fibre) ขึ้น เซลลูโลสเป็นโพลีเมอร์ของกลูโคส มีสูตรเคมีอย่างง่ายเช่นเดียวกับแป้ง แต่ต่างกันตรงที่พันธะที่ใช้ในการเชื่อมต่อกลูโคสเป็นพันธะ β

เพนโตแซน (pentosans) มีอยู่ 4% ในข้าวโพด โดยเป็นโพลีเมอร์ของน้ำตาลเพนโตส เช่น arabinose , xylose เป็นส่วนประกอบของผนังเซลเช่นกัน

น้ำตาล (sugar) มีอยู่ประมาณ 1-3 % น้ำตาลในเมล็ดข้าวโพดส่วนใหญ่ได้แก่ ซูโครส (sucrose) ประมาณ 3/4 ของน้ำตาลจะอยู่ใน Germ หรือ เอมบริโอ (embryo) ที่เหลืออีก 1/4 จะอยู่ในเอนโดสเปิมส์ (endosperm)

โปรตีน (Proteins)

โปรตีนประกอบด้วยสายของกรดอมิโน (amino acid) ซึ่งกรดอมิโนแต่ละตัวจะเชื่อมต่อกันด้วยพันธะเปปไทด์ (piptide bond) ระหว่างกลุ่มคาร์บอกซิล (carboxyl group, COOH) ของกรดอมิโนตัวหนึ่งและกลุ่มอัลฟา-อมิโน (alpha-amino group , NH_2) ของกรดอมิโนตัวถัดไป กรดอมิโนในธัญพืชทั่วไปมีอยู่ 18 ชนิด ซึ่งผลจากคุณสมบัติที่แตกต่างกันของกรดอมิโนแต่ละตัว และการเรียงลำดับของมันในสายกรดอมิโน มีผลทำให้เกิดลักษณะเฉพาะของโปรตีนแต่ละชนิดขึ้น สายกรดอมิโนแต่ละเส้นอาจเชื่อมกันด้วยพันธะไดซัลไฟด์ (disulphide bond) เกิดเป็นโครงสร้างชั้นที่สองขึ้น (secondary structure) และเมื่อเชื่อมด้วยพันธะไฮโดรเจน(hydrogen bond) จะเกิดเป็นโครงสร้างชั้นที่สามขึ้น (tertiary structure) ซึ่งสายของกรดอมิโนจะขดกันเป็นเกลียว (spirals)

โปรตีนในธัญพืชสามารถแบ่งได้ตามลักษณะการละลายออกเป็น 4 ชนิดคือ

อัลบูมีน (Albumins) เป็นโปรตีนที่ละลายในน้ำและสารละลายเกลือ โปรตีนชนิดนี้จะจับตัวเป็นก้อนเมื่อโดนความร้อน

โกลบูลีน (Globulins) เป็นโปรตีนที่ละลายในน้ำและสารละลายเกลือ

โปรลามีน (Prolamines) เป็นโปรตีนที่ละลายในแอลกอฮอล์ 50-90% แต่ไม่ละลายในน้ำ แอลกอฮอล์บริสุทธิ์ และตัวทำละลายที่เป็นกลาง

กลูเตลีน (Glutelins) เป็นโปรตีนที่ละลายในกรดอ่อนหรือเบสอ่อน ไม่ละลายในตัวทำละลายที่เป็นกลาง

โปรตีนพบกระจายอยู่ทั่วไป ในเนื้อเยื่อของเมล็ดพืช แต่มีมากในเอมบริโอ (embryo) สคูเทลลัม (scutellum) และ อลูโลนเลเยอร์ (aleurone layer) ทั้งนี้จากตารางที่ 2-4 แสดงถึงการกระจาย

ของโปรตีนในส่วนต่างๆ ของเมล็ดข้าวโพด

ตารางที่ 2-3
ชนิดของโปรตีนในเมล็ดข้าวโพด

Material	Protein range (% d.b.)	Albumins	Globulins	Prolamins	Residue and Glutelins
Maize	7-13	2-10	10-20	50-55	30-45

ตารางที่ 2-4
การกระจายของโปรตีนในข้าวโพด

Part of Grain	Proportion of Kernel (%)	Protein Content (%)	Proportion of Total Protein in Kernel (%)
Pericarp	6.5	3.0	2.2
Aleurone	2.5	19.2	4.7
Endosperm :	(97.6)	-	(71.0)
outer	3.9	27.7	11.9
middle	58.1	7.5	48.2
inner	17.6	5.6	10.9
Embryo	1.1	26.5	3.2
Scutellum	10.6	16.0	18.9
Whole Grain	100	9.0	100

i17356635

ในเมล็ดที่ยังอ่อนอยู่ โปรตีนชนิดโปรลามีน จะมีอยู่ในปริมาณน้อย เมื่อเทียบกับโปรตีนชนิดอื่นๆ เช่น อัลบูมีน โกลบูลีน และกลูเตอีน แต่เมื่อเมล็ดเริ่มแก่ตัวขึ้น ปริมาณโปรลามีน จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วกว่าโปรตีนชนิดอื่น

ในเมล็ดธัญพืชจะมีกรดอมิโนคือ กรดกลูตามิก (glutamic acid) และโพรลีน (proline) อยู่ในปริมาณมาก และมีไลซีน (lysine) อยู่ในปริมาณน้อย โดยทั่วไปค่าทางชีวภาพ (bioloyical value)ของโปรตีนใน germ และในอลูโลน (aleurone) จะมีค่าสูงกว่าโปรตีนใน เอนโดเสปิมส์ (endosperm) และปริมาณไลซีนใน germ และอลูโลนก็มีค่าสูงกว่าในเอนโดสปิมส์ 2 ถึง 2.5 เท่าด้วย ตารางที่ 2-5 แสดงถึงปริมาณกรดอมิโนในข้าวโพด

ไขมัน (Lipids)

ปริมาณไขมันในข้าวโพดจะมีประมาณ 4-6 % โดยใน germ จะมีปริมาณไขมันมากที่สุดคือ 35 % และ bran จะมีปริมาณไขมันน้อยที่สุดคือประมาณ 1% ไขมันประกอบด้วยกลีเซอร์ไรด์ (glycerides) และ กรดไขมัน (fatty acid)

กรดไขมัน (fatty acid) ในธัญพืช พบว่าประกอบด้วยกรดไขมันที่อิ่มตัว (saturated fattyacid) 11-26 % และกรดไขมันไม่อิ่มตัว (unsaturated fatty acid) 72-85% ทั้งนี้จาก ตารางที่ 2-6 แสดงถึงปริมาณกรดไขมันชนิดต่างๆ ในข้าวโพด

ฟอสโฟลิปิด (phospho-lipids) เป็นไขมันอีกชนิดหนึ่งที่พบในธัญพืช มีประมาณ 4 % ของไขมันทั้งหมด เกิดจากการเชื่อมต่อของกรดฟอสโฟริค (phosphoric acid) เข้ากับโมเลกุลของไขมันเกิดเป็นฟอสโฟลิปิดขึ้น

ตารางที่ 2-5

ปริมาณกรดอมิโนในเมล็ดข้าวโพด

(g amino acid / 16 g nitrogen)

Amino Acid	Maize
Arginine	4.7
Cystine and Cysteine	2.5
Histidine	2.8
Isoleucine	4.0
Leucine	12.5
Lysine	3.0
Methionine	1.8
Phenylalanine	5.1
Threonine	3.6
Tryptophan	0.8
Tyrosine	4.4
Valine	5.2
Alanine	7.7
Aspartic Acid	6.4
Glutamic Acid	18.8
Glycine	3.9
Proline	8.8
Serine	4.9
Protein	10.6

ตารางที่ 2-6
ปริมาณกรดไขมันในเมล็ดข้าวโพด

Material	Saturated		Unsaturated		
	Palmitic (%)	Stearic (%)	Oleic (%)	Linoleic (%)	Linolenic (%)
Maize	14.0	2.0	33.4	49.8	1.5

แร่ธาตุ (Mineral Matter)

แร่ธาตุในเมล็ดธัญพืชนั้น ประมาณ 95 % จะเป็นพวกฟอสเฟต (phosphate) และซัลเฟต (sulphate) ของโปแตสเซียม (potassium) แมกนีเซียม (magnesium) และแคลเซียม (calcium) นอกจากนั้นจะเป็นพวกเหล็ก แมงกานีส สังกะสี ทองแดง และแร่ธาติอื่นๆ อีกปริมาณเล็กน้อย แร่ธาติในเมล็ดข้าวโพด แสดงในตารางที่ 2-7

วิตะมิน (Vitamins)

วิตะมินในเมล็ดธัญพืชมีอยู่มากมายหลายชนิด มีปริมาณแตกต่างกันไปตามธัญพืชชนิดต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2-8

วิตะมินที่สำคัญในธัญพืชคือ วิตะมินบี และวิตะมิน อี วิตะมินบีที่มีในธัญพืชจะเป็นพวก ไนอาซิน (niacin) วิตะมินบี1 (thiamine) วิตะมินบี2 (riboflavin) วิตะมินบี3 (pantothenic acid) และ วิตะมินบี6 (pyridoxin) ซึ่งการกระจายของวิตะมินบี จะไม่สม่ำเสมอ มีปริมาณแตกต่างกันไป ตามส่วนต่างๆ ของเมล็ดธัญพืช ดังแสดงในตารางที่ 2-9, 2-10 , 2-11

ตารางที่ 2-7

ปริมาณแร่ธาตุในเมล็ดข้าวโพด (mg/100 g d.b.)

Element	Maize
Main :	
Ca	20
Cl	55
K	342
Mg	143
Na	40
P	294
S	145
Minor :	
Cu	0.4
Fe	3.1
Mn	0.6
Zn	2.0
Trace :	
Al	0.057
As	0.03
B	0.3
Ba	3.0
Br	0.26
Cd	0.012
Co	0.008
Cr	0.004
F	0.04
I	0.2

ตารางที่ 2-7 (ต่อ)

ปริมาณแร่ธาตุในเมล็ดข้าวโพด (mg/100 g d.b.)

Element	Maize
Li	0.005
Mo	0.03
Ni	0.04
Pb	0.01
Rb	0.3
Sc	0.01
Sn	0.01
Sr	0.02
Ti	0.17
V	0.01
Zr	0.02
Ash (%)	1.7

วิตะมินอี (tocopherols) แบ่งได้เป็น α , β , γ , δ ทั้งนี้ข้าวโพดจะเป็นชนิด γ มากที่สุด ในปริมาณ 4.4-5.1 มิลลิกรัม ต่อร้อยกรัมของข้าวโพด วิตะมินอีจะมีมากในน้ำมันที่ได้จากเมล็ดธัญพืช เช่น ในน้ำมันข้าวโพดจะมีวิตะมินอีอยู่ 0.8-0.9 มิลลิกรัม ต่อกรัมน้ำมัน

2.3.3 การนำไปใช้ประโยชน์ (1)

ข้าวโพดสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายทาง อาทิ เช่น เป็นอาหารสำหรับบริโภค ผลิตเป็นอาหารสัตว์ ผลิตเป็นแป้ง น้ำตาล น้ำเชื่อม ตลอดจนผลิตเป็นเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ เช่น เบียร์ และวิสกี้ เป็นต้น ข้าวโพดเป็นธัญพืชที่เคยเป็นอาหารทั่วไปของชาวอินเดียนโบราณ เช่น พวกมายา

ตารางที่ 2-8 ปริมาณวิตะมินในเมล็ดธัญพืช

(μg/g)

Cereal	Thiamine	Riboflavin	Niacin	Pantothenic acid	Biotin	Pyridoxin	Folic acid	Choline	Inositol	*p*-Amino benzoic acid
Wheat:										
hard	4.3	1.3	54	10	0.1	4.5	0.5	1100	2800	2.4
soft	3.4	1.1	45							
Barley	4.4	1.5	72	5.7	0.13	4.4	0.4	1000	2500	0.5
Oats (whole)	5.8	1.3	11	10	0.17	2.1	0.5	9-10	—	—
Rye	4.4	2.0	12	7.2	0.05	3.2	0.6	450	—	—
Triticale	9.2	3.1	16	7.5	0.06	4.7	0.7	—	—	—
Rice (brown)	3.3	0.7	46	9	0.1	4.0	0.5	900	—	—
Maize	4.0	1.1	19	5.3	0.1	5.3	0.4	445	—	—
Sorghum	3.5	1.4	41	11	0.19	4.8	0.2	600	—	—
Millet:										
pearl	3.6	1.7	26	11.4	—	—	—	—	—	—
foxtail	5.9	0.8	7	—	—	—	—	—	—	—
proso	2.0	1.8	23	—	—	—	—	748	—	—
finger	3.6	0.8	13	—	—	—	—	—	—	—

ตารางที่ 2-9 การกระจายของวิตะมินบี ในส่วนต่างๆ ของข้าวสาลี

Part of grain	Thiamine†	Riboflavin§	Niacin§	Pyridoxin§	Pantothenic acid§
	(a) *Concentration in the parts of the grain, μg/g*				
Pericarp, testa and hyaline	0.6	1.0	25.7	6.0	7.8
Aleurone layer	16.5	10	741	36	45.1
Endosperm	0.13	0.7	8.5	0.3	3.9
Embryo	8.4	13.8	38.5	21.1	17.1
Scutellum	156	12.7	38.2	23.2	14.1
Whole grain	3.75	1.8	59.3	4.3	7.8
	(b) *Distribution among the parts, percentages of total in grain*				
Pericarp, testa and hyaline	1	5	4	12	9
Aleurone layer	32	37	82	61	41
Endosperm	3	32	12	6	43
Embryo	2	12	1	9	3
Scutellum	62	14	1	12	4

ตารางที่ 2-10 การกระจายของวิตะมินในข้าวและข้าวโพด

Part of grain	Percentage of total thiamine in rice	Percentage of total niacin		
			in maize	
		in rice†	flint	sweet
Pericarp, testa hyaline	34	5	2	3
Aleurone layer		80.5	63	59
Endosperm	8	12.3	20	26
Embryo	11	0.6	2	2
Scutellum	47	1.6	13	10

ตารางที่ 2-11 ปริมาณ THIAMINE ในธัญพืช

Cereal	Wt of tissue (g/100 g grain)		Thiamine concentration (μg/g)		Proportion of total thiamine of grain (%)	
	Embryo	Scutellum	Embryo	Scutellum	Embryo	Scutellum
Wheat (average)	1.2	1.54	12	177	3	59
Barley (de-husked)	1.85	1.53	15	105	8	49
Oats (kernels)	1.6	2.13	14.4	66	4.5	28
Rye	1.8	1.73	6.9	114	5	82
Rice (brown)	1.0	1.25	69	189	11	47
Maize	1.15	7.25	26.1	42	8	85

(Mayas) อินคา (Incas) มาก่อน และในปัจจุบัน บางประเทศในลาตินอเมริกา ก็ยังนิยมบริโภคข้าวโพดในรูปเมล็ดอยู่ แม้ในปัจจุบันการบริโภคข้าวโพดของมนุษย์ มักจะอยู่ในรูปของแป้งข้าวโพดที่เป็นส่วนประกอบหลักในการผลิตอาหารชนิดอื่นๆ ก็ตาม ตารางที่ 2-12 แสดงถึงปริมาณการบริโภคแป้งข้าวโพดในประเทศต่างๆ และตารางที่ 2-13 แสดงถึง การนำข้าวโพดไปใช้ประโยชน์ทางด้านต่างๆ ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีการนำไปใช้เพื่อผลิตอาหารสัตว์เป็นส่วนใหญ่

ซังข้าวโพด (corn cob) เป็นผลพลอยได้ภายหลังจากการที่นำเมล็ดข้าวโพดไปใช้ประโยชน์แล้วประกอบด้วย เซลลูโลส 35% เพนโตแซน 40% และลิกนิน 15% ซังข้าวโพดสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ดังต่อไปนี้คือ

การเกษตร ใช้เป็นอาหารสัตว์ ปรับปรุงคุณภาพดิน และเมื่อบดให้ละเอียดจะใช้เป็นตัวทำเจือจางหรือตัวนำยาฆ่าแมลงได้

อุตสาหกรรม เมื่อพิจารณาจากคุณสมบัติทางกายภาพ จะนำไปใช้ทำความสะอาด ทำกาว พลาสติก อิฐ และเซรามิค ทำเป็นตัวฟิลเลอร์ (fillers) เป็นต้น และเมื่อพิจารณาจากคุณสมบัติทางเคมีจะนำมาใช้ผลิต เฟอฟูรอล (furfural) น้ำตาลที่ใช้ในการหมัก เชื้อเพลิง ถ่าน กระดาษ และเยื่อกระดาษ เป็นต้น

2.4 การเปลี่ยนแปลงทางเคมีของเมล็ดข้าวโพดภายหลังการอบแห้ง

การอบแห้งนอกจากจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพแล้วยังก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของข้าวโพดด้วย อันมีผลทำให้คุณภาพของข้าวโพด และผลิตภัณฑ์จากข้าวโพดแตกต่างกันไปตามสภาพการอบแห้ง

Temesvari, J(21) พบว่าการอบแห้งเป็นการลดกิจกรรมของเอนไซม์ peroxidaseโดยการทำการทดลองที่อุณหภูมิของลมร้อน70-130 °C ได้ความเร็ว สัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของลมร้อนที่ใช้และกิจกรรมของเอนไซม์ดังสมการ

ตารางที่ 2-12

ปริมาณการบริโภคแป้งข้าวโพดในประเทศต่างๆ

(kg/head/year, 1975–7 average)

Africa		*America, Central*	
Benin	53	El Salvador	77
Botswana	57	Guatemala	104
Cape Verde	106	Honduras	84
Egypt	48*	Mexico	99
Kenya	92	Nicaragua	69
Lesotho	80	*America, South*	
Malawi	169	Paraguay	55
South Africa	95	*Europe*	
Swaziland	118	Albania	62
Tanzania	52	Romania	57
Zambia	112		
Zimbabwe	145		

*Includes 9.0 kg/head/year as unspecified maize products.

Source: F.A.O., *Provisional Food Balance Sheets 1975–77* (1979).

ตารางที่ 2-13

ปริมาณการใช้ข้าวโพดภายในประเทศต่างๆ

Country	Year	Total domestic usage (thousand t)	Percentage of total domestic usage			
			Human food	Industrial*	Animal feed	Seed
EEC:						
Bel/Lux	'79/80	1184	2	30	68	—
France	'79/80	7294	1	8	89	2
Germany, FR	'79/80	3003	10	13	76	1
Italy	'79/80	9580	3	1	96	—
Netherlands	'79/80	2577	2	10	88	—
U.K.	'79/80	3133	10	50	40	—
Australia	'78	155	39	—	61	<1
Austria	'78	1270	1	7	91	<1
Canada	'78	4476	18	—	81	1
Japan	'78	10,483	3	16	81	—
Portugal	'77	1770	15	<1	83	1
Spain	'78	5493	—	8	92	<1
U.S.A.	'78	111,891	8	3	88	<1
Yugoslavia	'78	9955	5	26†	68	1

*Including waste. †Including 23% waste.

Sources: 1. EUROSTAT, via *H-GCA Cereal Statistics 1981.*
2. M.A.F.F., via *H-GCA Cereal Statistics 1981.*
3. O.E.C.D., *Food Consumption Statistics 1970–75*, Paris, 1978.

$$\log Y = 40.5 - 0.035T_{n}$$

เมื่อ Y เป็นกิจกรรมของเอนไซม์ peroxidase

T_{n} เป็นอุณหภูมิของลมที่ใช้ในการอบแห้ง

Gunasekaran, S และ M.R.Paulsen (22) พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราการอบแห้ง และอุณหภูมิของลมร้อน การแตกหักของเมล็ดจะเพิ่มขึ้น และ Pristas, O.(23) ยังพบว่า จากการแตกหักของเมล็ด มีผลทำให้เกิดการสูญเสียรำ (germ) ทำให้คุณค่าทางอาหารลดลง และความสามารถในการย่อยสลายของสัตว์ลดลง อันเนื่องมากจากการสูญเสียเอนไซม์ย่อยโปรตีนและไขมัน

Toolier, Marie T. และคณะ(24) พบว่าเมื่ออุณหภูมิการอบแห้งมากกว่า 140 °C กิจกรรมของเอนไซม์ α - amylase จะถูกทำลายจนหมด แต่จะไม่มีผลเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 90 °C (25)

Roushdi , M. , Ghali, Y. และ A. Hassanean(26) พบว่าการอบแห้งที่ 100 °C จะทำให้แป้งจากการสีลดลง และ Mercier, C. และคณะ(25) ยังพบว่า นอกจากอุณหภูมิการอบแห้งที่สูงจะทำให้ ได้ปริมาณแป้งน้อยลงแล้ว การเก็บรักษาก่อนการอบแห้งก็มีผลต่อปริมาณแป้งเช่นกัน พร้อมกับเสนอว่า อุณหภูมิการอบแห้งที่สูงสุด เพื่อให้ได้แป้งจากการสีมากที่สุด คือ 90 °C

Thormaehlem , M.(27) พบว่า ในการย่อยสลายแป้งโดยใช้หนูเป็นตัวทดลอง ความสามารถในการย่อยสลายแป้งของหนูจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิการอบแห้งเพิ่มขึ้น โดยเมื่อยึดอุณหภูมิการอบแห้งที่ 20 °C เป็นหลัก พบว่า ความสามารถในการย่อยสลายแป้งของหนูจะเพิ่มเป็น 1.1 - 1.5 เท่าที่อุณหภูมิ 80 °C และ 3.6 - 4.6 เท่าที่อุณหภูมิ 180 °C

จะเห็นได้ว่า ที่สภาวะการอบแห้งที่ต่างกันมีผลทำให้ได้ข้าวโพดมีลักษณะต่างกันไป ซึ่งขึ้นกับวัตถุประสงค์ในการนำไปใช้ประโยชน์ ในปัจจุบันข้าวโพดส่วนใหญ่จะนำไปใช้ เพื่อผลิตเป็นอาหารสัตว์ ดังนั้นจึงมีการศึกษา

ถึงคุณภาพโปรตีนของข้าวโพดภายหลังการอบแห้งแล้ว การเปลี่ยนแปลงคุณภาพโปรตีนโดยทั่วไปจะจำแนกได้ 5 ลักษณะ(28) คือ

1. ภายใต้ความร้อนที่ไม่รุนแรง (Mild heat) จะเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นที่โครงสร้างชั้นที่สามของโปรตีน (denaturation) แต่ไม่มีผลต่อคุณค่าทางอาหาร

2. ภายใต้ความร้อนที่ไม่รุนแรง (Mild heat) และมีสารจำพวก reducing substance มีผลทำให้เกิด พันธะระหว่างกลุ่มอมิโนชนิด epsilon ของไลซีน กับ reducing group ของสาร reducing substance ซึ่งไม่สามารถย่อยสลายด้วยเอนไซม์ได้ เกิดเป็นลักษณะของไลซีนที่ร่างกายใช้ไม่ได้ (unavailable lysine)

3. ภายใต้ความร้อนที่รุนแรง (severe heat) กรดอมิโนชนิดต่างๆ ที่ร่างกายสามารถนำไปใช้ได้ (available amino acid) จะลดลง โดยลักษณะเช่นนี้จะเกิดขึ้น ไม่ว่าจะมีสารพวก reducing substance หรือไม่ก็ตาม ตัวอย่างของการสูญเสียคุณค่าโปรตีนในลักษณะนี้ ได้แก่ การที่ Cystine เปลี่ยนสภาพเป็นสารประกอบ เช่น methyl mercaptan dimethyl sulphide และ dimethyl disulphide ที่อุณหภูมิ 115 °C ซึ่งสารประกอบเหล่านี้ร่างกายไม่สามารถย่อยสลายได้ หรืออาจเกิดปฏิกริยากันเองระหว่าง กลุ่มอมิโนอิสระของไลซีน และ arginine กลุ่มกรดอิสระของ aspartic acid และ glutamic acid หรือ กลุ่มอมิโน ของ asparagine และ glutamine

4. ภายใต้สภาวะความร้อนที่มากเกินไป (excessive heat) จะทำให้กรดอมิโนเกิดการสลายตัวหรือเปลี่ยนแปลงโครงสร้างไป สภาวะนี้จะมีอุณหภูมิสูงกว่า 180 °C ขึ้นไป

5. ภายใต้สภาวะที่ถูกกระทำโดยด่าง (alkali treatment) และโดยออกซิเดชั่น (oxidation)

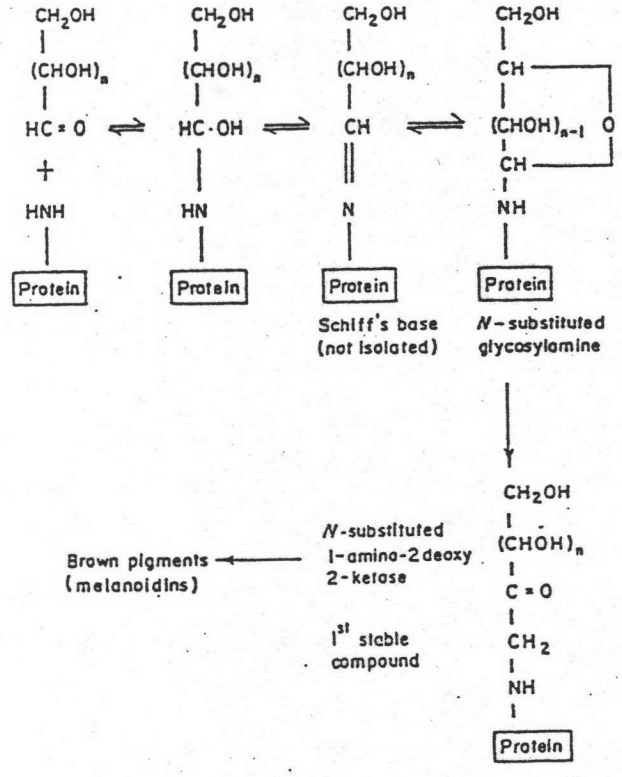
2.4.1 การเปลี่ยนแปลงปริมาณไลซีนภายหลังการอบแห้ง(28)

ในการศึกษาถึงคุณภาพโปรตีนของข้าวโพดเพื่อใช้ผลิตอาหารสัตว์ จะใช้ไลซีนเป็นตัวกำหนด(29,30,30,32,33,34) เนื่องจากไลซีนเป็นกรดอมิโนที่สูญเสียคุณค่าได้ง่ายเมื่อโดนความร้อน(35) การสูญเสียคุณค่าของไลซีนเกิดจากการสร้างพันธะระหว่างกลุ่มอมิโนชนิด epsilon ในไลซีน กับสารพวก reducing substamce เช่น glucose ซึ่งพันธะที่เกิดขึ้นนี้ไม่สามารถจะย่อยสลายด้วยเอนไซม์จำพวก enzyne ได้ ทำให้ร่างกายไม่สามารถนำเอาไลซีนไปใช้ประโยชน์ได้ (biologically unavailable)

2.4.2 Maillard Reaction

เป็นปฏิกริยาระหว่าง กลุ่มอมิโนของ กรดอมิโน กับ น้ำตาล (glycosidic sugar) ปฏิกริยาช่วงแรกจะเกิดการสร้างตัวเป็นสารประกอบไม่มีสี และเปลี่ยนสภาพเป็นสารสีน้ำตาลในภายหลัง (brown pigments) ดังนั้น Maillard Reaction อาจเรียกอีกชื่อหนึ่งเป็น non-enzymic browning ได้ ลักษณะของปฏิกริยาแสดงได้ดังรูปที่ 2-10

สารประกอบที่ได้นี้ จะไม่สามารถย่อยสลายด้วยเอนไซม์ได้ จึงไม่สามารถนำไปใช้ได้ (biologially unavailable) แต่สามารถย่อยสลายด้วยกรดได้ เช่น สารประกอบ 1 - deoxy - 2 - ketose (lysine-fructose) เมื่อนำมาย่อยสลายด้วยกรดจะได้ไลซีน 50 % furosine 20 % และ pyridosine 10 %



รูปที่ 2-10 ปฏิกริยา Maillard Reaction