



บทที่ 2

ทฤษฎี

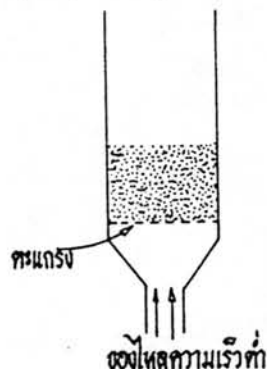
2.1 ฟลูอิดไดเซชัน (Fluidization)

ฟลูอิดไดเซชันเป็นเทคนิคใหม่ที่ได้รับการสนใจนำมาประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆ เช่น ในวงการอุตสาหกรรม ใช้ทำเม็ดนมผงให้โตขึ้น หรือตากแห้งผลิตภัณฑ์ต่างๆ

นิยาม "ฟลูอิดไดเซชัน" เป็นขบวนการหรือวิธีการที่มีของแข็งลักษณะเป็นเม็ด, เป็นชิ้น สัมผัสกับของไหล เช่น ก๊าซหรืออากาศ ตอนแรกเม็ดหรือวัตถุถูกวางไว้บนตะแกรง ในหอตดลองที่มักจะมีรูปร่างเป็นทรงกระบอก จะวางในแนวตั้งหรือในแนวนอนก็ได้ ของไหลที่ใช้จะเป็นก๊าซหรือของเหลวปล่อยให้ผ่านทางด้านล่างของตะแกรงที่รองรับเม็ดของแข็ง ของไหลก็จะไหลผ่านขึ้นเม็ดของแข็ง แล้วไหลออกทงส่วนบนของหอตดลอง เพื่อความเร็วของของไหลให้มากขึ้นเรื่อยๆ จนในที่สุดจะเห็นเม็ดของแข็งขยับตัวและลอยตัวเป็นชั้นอิสระไม่เกาะติดกัน ของแข็งที่อยู่ในลักษณะนี้จะมีคุณสมบัติคล้ายของไหล กล่าวคือจะมีการไหลหมุนเวียนของเม็ดของแข็งภายในเบดหรือภายในหอตดลอง เราเรียกของแข็งในสถานะนี้ว่า "ฟลูอิดไดเซชัน"

2.1.1 ลักษณะของฟลูอิดไดซ์เบด [10]

เบด หมายถึงเขตในคอลัมน์ที่มีปริมาณกลุ่มอนุภาคจำนวนหนึ่งบรรจุอยู่ ไม่ว่ากลุ่มอนุภาคนั้นจะอยู่นิ่งหรือเคลื่อนไหวด้วยของไหลในคอลัมน์ ซึ่งจะมีระดับตั้งแต่ตัวกระจายของไหล (Distributor) จนถึงระดับสูงสุดที่ผิวหน้าของกลุ่มอนุภาคดังรูป 2.1



รูป 2.1 แสดงระดับของเบดในหอตดลอง

ฟลูอิดไดเซชัน เป็นปรากฏการณ์ที่กลุ่มของอนุภาคประพติดตัวทางกายภาพคล้ายกับของไหล เมื่อมี ก๊าซหรือของเหลวไหลผ่านกลุ่มของอนุภาคนั้น เมื่อเริ่มปล่อยของไหลเข้าทางด้านล่างของหอทดลองอย่างช้าๆ ขณะที่ของไหลความเร็วยังน้อยอยู่เม็ดของแข็งจะไม่ขยับตัวเลย ลักษณะของเบดเช่นนี้เรียกว่า เบดนิ่ง (Fixed bed) แต่เมื่อความเร็วของของไหลเพิ่มขึ้นจนถึงระดับหนึ่ง อนุภาคจะเริ่มขยับตัว และจัดเรียงตัว ใหม่ เมื่อความเร็วของของไหลเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อย อนุภาคจะหลุดออกจากกัน ลอยตัวเป็นอิสระลักษณะ เช่นนี้เรียกว่า จุดเริ่มฟลูอิดไดเซชัน ถ้าอนุภาคที่ลอยตัวเป็นอิสระแต่ยังคงมีลักษณะเป็นกลุ่มอยู่ เรียกว่า ฟลูอิดไดซ์เบดแบบหนาแน่น (Dense-phase fluidized bed) แรงที่กระทำบนอนุภาคจะ อยู่ในสมดุลย์ กล่าวคือ แรงที่เกิดจากน้ำหนักของอนุภาคและแรงพยุงของของไหล ซึ่งมีทิศทางตรงกันข้ามมีค่าเท่ากัน ความดันลดที่พื้นที่หน้าตัดใดๆของกลุ่มอนุภาคมีค่าคงที่ ไม่ขึ้นอยู่กับความสูงของกลุ่มอนุภาค สภาพของ กลุ่มอนุภาคขณะเริ่มต้นฟลูอิดไดเซชันที่ความเร็วไหล ณ จุดนี้ เรียกว่า ความเร็วต่ำสุดในการที่ทำให้ เกิดฟลูอิดไดเซชัน (Minimum fluidization velocity)

ถ้าเพิ่มความเร็วของของไหลขึ้นอีก อนุภาคจะลอยตัวแยกห่างจากกัน กลุ่มของอนุภาคลักษณะนี้ เรียกว่า ฟลูอิดไดซ์เบดเจือจาง (Diluted-phase fluidized bed) และถ้าเพิ่มความเร็วจนอนุภาคหลุดจากระบบได้ จะกลายเป็นการขนส่งอนุภาค ถ้าของไหลเป็นอากาศ จะเรียกว่า การขนส่งอนุภาคด้วยอากาศ (Pneumatic transport) เช่น การลำเลียงปูนผง

2.1.2 ข้อได้เปรียบและเสียเปรียบของฟลูอิดไดเซชันกับเบดนิ่ง [10]

การเปรียบเทียบการได้เปรียบและเสียเปรียบระหว่างการใช้เทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดกับเทคนิค อื่นๆ ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

ข้อได้เปรียบ

1. เนื่องจากเม็ดของแข็งเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา ทำให้เกิดการผสมกันได้รวดเร็ว และสม่ำเสมอ อุณหภูมิภายในเบดคงที่ตลอด ซึ่งต่างจากเบดนิ่งหรือเบดบรรจุ อุณหภูมิจะไม่เท่ากันตลอดทั้งเบด
2. มีการจัดเรียงตัวของเม็ดของแข็ง เม็ดที่มีน้ำหนักน้อยจะอยู่ส่วนบน เม็ดที่มีน้ำหนักมาก จะอยู่ส่วนล่าง ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการแยกขนาดของเม็ดของแข็งได้ นอกจากนี้แรงเสียดทานต่อการไหล ของของไหลมีน้อยกว่ามาก

3. จากคุณสมบัติที่คล้ายกับของไหล จึงสามารถทำงานแบบต่อเนื่องได้ คือ ปล่อยให้ของแข็งไหลออกจากเบด และไหลเติมเข้าไปในเบดได้ การควบคุมก็จะทำได้ง่าย

4. การที่เม็ดของแข็งไหลหมุนเวียนอยู่ในเบด เม็ดของแข็งนี้สามารถที่จะเป็นตัวนำความร้อนจากผนังแหล่งความร้อนให้กับของไหลได้มากกว่า เพราะมีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนได้สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบที่ความเร็วไหลอันเดียวกัน ฟลูอิดไดซ์เบดจึงเหมาะสมกับขบวนการที่มีปฏิกิริยาที่ให้ความร้อน หรือดูดความร้อนจำนวนมากๆ

5. พื้นที่สัมผัสระหว่างเม็ดของแข็งกับของไหลจะมีมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเบดนิ่งที่ใช้จำพวกเม็ดของแข็ง จึงมีประโยชน์ในการขยายงานที่มีทั้งการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลสาร

6. การทำงานด้วยฟลูอิดไดซ์เบดจะเสียพลังงานน้อยกว่า เพราะแรงเสียดทาน และความดันตกของเบดน้อยกว่าในแบบบรรจุมาก

7. สามารถกำจัดขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีขนาดเล็กมากๆ ได้ โดยไม่ต้องหยุดเครื่องทำงาน

8. สามารถใช้ในการขนส่งเม็ดของแข็งจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งได้

ข้อเสียเปรียบ

1. เวลาของไหลสัมผัสกับเม็ดของแข็งสั้นมาก จึงต้องใช้เบดสูงๆ หรือเบดหลายชั้น

2. มักเกิดฟองก๊าซในเบดเมื่อทำงานกับก๊าซ ทำให้การสัมผัสไม่ดีเป็นการสูญเสีย ถ้ายังเป็นขบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมี และต้องใช้ตัวเร่งช่วยแล้ว ทำให้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงลดลง

3. เนื่องจากมีการผสมกันของเม็ดของแข็งอย่างรวดเร็ว อาจทำให้ระยะเวลาที่เม็ดของแข็งสัมผัสและผสมกับของไหลสั้นเกินไป เบดอาจจะไม่ผสมกันเป็นเนื้อเดียวโดยตลอด แต่อาจจะแก้ไขได้โดยใช้เบดหลายชั้น

4. การทำงานมีข้อจำกัด เพราะถ้าใช้ความเร็วของของไหลสูงเกินไป เม็ดของแข็งก็จะออกจากเบดไปพร้อมกับของไหล

5. ใช้กับเม็ดของแข็งที่เปราะหรือเป็นยางไม่ได้ เพราะเกิดการเกาะเป็นก้อนใหญ่และตกตะกอนมายังส่วนล่างของเบด

2.1.3 ความรู้และทฤษฎีเกี่ยวกับฟลูอิดไดซ์เซชัน [11]

ก่อนที่เม็ดของแข็งจะเริ่มขยับตัวเป็นฟลูอิดไดซ์เบด เม็ดของแข็งจะพักอยู่บนตะแกรง ปล่อยให้ของไหลไหลลดเคี้ยวผ่านไปตามช่องว่างที่มีอยู่ในเบด ความเร็วจะเปลี่ยนไปตลอดเบด ดังมีรายละเอียดที่เกิดขึ้นในเบดดังนี้

2.1.3.1 ช่องว่างภายในเบด (Voidage)

เม็ดของแข็งที่บรรจุอยู่ในเบด ไม่ว่าจะบรรจุอย่างเป็นระเบียบหรือแบบไม่เป็นระเบียบ (Random packing) ก็ย่อมเกิดช่องว่างระหว่างเม็ดของแข็งขึ้นเสมอ จะมีขนาดมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะและขนาดของแข็งที่ใช้ เม็ดของแข็งที่ผิวราบเรียบก็ไม่ค่อยจะมีปัญหา แต่ถ้าเม็ดของแข็งนั้นมีรูพรุน (Pore) อยู่ภายในเม็ดด้วยแล้ว การหาช่องว่างแท้จริงย่อมกระทำได้ยาก เพราะขนาดรูพรุนมีขนาดเล็กมาก วัดได้เป็นหน่วยของไมครอน (Micron) การคำนวณค่าช่องว่างภายในเบดนั้น ถ้าเม็ดของแข็งมีรูปร่างเป็นทรงกลมขนาดสม่ำเสมอเราสามารถคำนวณหาช่องว่างระหว่างเม็ดทรงกลมเหล่านี้ได้ด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ ลักษณะการเรียงตัวของเม็ดทรงกลมในเบด ทำให้เกิดขนาดของช่องว่างมีขนาดแตกต่างกันออกไป

สำหรับวัสดุที่ไม่ใช่เป็นทรงกลม อาจเป็นวัสดุที่มีรูปร่างไม่แน่นอนหรือรูปร่างแปลกๆต่างกันออกไป การหาลัดส่วนของช่องว่างที่เกิดขึ้นภายในเบดก็เปลี่ยนแปลงไปตามรูปร่าง และขนาดของวัสดุที่ใช้บรรจุลงในหอตลอด หรือแม้แต่การบรรจุที่เป็นระเบียบกับแบบที่ไม่เป็นระเบียบ ก็จะมีช่องว่างไม่เท่ากัน วัสดุที่มีรูอยู่ในเม็ดของแข็ง มีค่าช่องว่างน้อยมาก การศึกษาการไหลของของไหล ช่องว่างในรูพรุนจะไม่มีอิทธิพลอะไรเลย แต่ถ้าศึกษาการถ่ายเทมวลสารแล้ว ช่องว่างในรูพรุนเป็นตัวแปรที่สำคัญไม่น้อยทีเดียวจะเป็นตัวควบคุมที่จะทำให้เกิดการดูดซับและดูดซึมเกิดขึ้น

2.1.3.2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสมมุติ (Dp)

Delavaille ได้ให้นิยามของเส้นผ่านศูนย์กลางสมมุติดังนี้

$$D_p = k_1 / S_p \quad (2.1)$$

$$k_1 = 6.1 \text{ เมื่อเป็นเม็ดของแข็งที่กลวงมน}$$

$$k_1 = 7.7 \text{ เมื่อเป็นเม็ดของแข็งที่เป็นเหลี่ยม}$$

2.1.3.3 ค่าความดันตก (Pressure drop) ในฟลูอิดไดซ์เบด

ในขณะที่เม็ดของแข็งเริ่มลอยตัวเป็นอิสระอยู่นั้น อาจกล่าวอีกอย่างหนึ่งได้ว่า เม็ดของแข็งอยู่ในสภาวะสมดุลย์ของแรง 2 แรงที่เกิดขึ้นบนเม็ดของแข็ง คือ แรงที่เกิดจากน้ำหนักของตัวเม็ดของแข็งเองกับแรงพยุงจากของไหลหรือเกิดจากแรงเสียดทานกับแรงต้านของของไหล

$$\text{แรงพยุง(แรงเสียดทาน + แรงต้าน)} = \text{น้ำหนักของเม็ดของแข็ง}$$

หรือ (ความดันตกในพื้นที่ภาคตัดขวาง)(พื้นที่ภาคตัด) = (ปริมาตรของเบด)(ส่วนของของแข็งในเบด)
*(ถ.พ.ของของแข็ง)

ซึ่งเราจะได้ว่า ค่าความดันตกต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชันคือ

$$\Delta P_A = W = \frac{(A \cdot L_{MF}) \cdot (1 - \epsilon_{MF}) \cdot (\rho_P - \rho_G) \cdot g_C}{g} \quad (2.2)$$

$$\frac{\Delta P}{L_{MF}} = \frac{(1 - \epsilon_{MF}) \cdot (\rho_P - \rho_G) \cdot g_C}{g} \approx \frac{(1 - \epsilon_{MF}) \cdot (\rho_P) \cdot g_C}{g} \quad (2.3)$$

เพราะว่า $\rho_P \gg \rho_G$ และโดยปกติ ΔP จะมีค่าประมาณ 30 ถึง 300 มิลลิเมตรของน้ำ แต่อาจสูงถึง 1000 มิลลิเมตรของน้ำ ในบางครั้งเพื่อให้เกิด Fluidization อย่างสม่ำเสมอโดยปกติแล้วจะออกแบบให้ความต้านทานต่อการไหลผ่านแผ่นรูพรุนที่รองรับชั้นวัสดุ มีค่า 50-100 มิลลิเมตรของน้ำ [12]

มินา แซ่แต้ [9] ได้ทำการทดลองหาค่าความดันตกที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชันของข้าวโพดพันธุ์สุวรรณ 1 ที่ความชื้นร้อยละ 25 (น้ำหนักเปียก) พบว่าค่าความดันตกมีค่าเท่ากับ 77 มิลลิเมตรของน้ำ

2.1.3.4 ความเร็วต่ำสุดของของไหลที่เริ่มเกิดฟลูอิดไดเซชัน (U_{MF}) [11]

ความเร็วของของไหลที่ต่ำสุด ที่เริ่มเกิดฟลูอิดไดเซชัน สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$U_{MF} = \frac{(D_p^2) \cdot (\rho_P - \rho_G) \cdot (\epsilon_{MF}^3)}{180 \cdot (1 - \epsilon_{MF})} \quad (2.4)$$

โดยมินา แซ่แต้ [9] ได้ทำการทดลองเพื่อหาค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชันกับเมล็ดข้าวโพดพันธุ์สุวรรณ 1 ที่ความชื้นของข้าวโพดร้อยละ 25 (น้ำหนักเปียก) และพบว่าค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน คือ 9648 เมตร/ชั่วโมง

2.1.3.5 ผลกระทบของระบบสันสะเทือนต่อความเร็วของอากาศร้อน

Arai, N., Hasatani, M. [13] ได้สรุปไว้ว่า ในการอบแห้งแบบฟลูอิดไดเซชันซึ่งมีระบบสันสะเทือน

$$\text{ความเร็วของอากาศร้อน}(U_G) = U_G + U_G^*$$

U_G = ความเร็วอากาศร้อนขณะไม่มีระบบสันสะเทือน , เมตร/ชั่วโมง

U_G^* = ความเร็วที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากระบบสันสะเทือน , เมตร/ชั่วโมง

โดย

$$\frac{U_G + U_G^*}{U_G} = 1 \quad \text{เมื่อ} \quad \Gamma < 3.5 \quad (2.5)$$

$$\frac{U_G + U_G^*}{U_G} = 0.285 \quad \text{เมื่อ} \quad 3.5 < \Gamma < 15 \quad (2.6)$$

ซึ่ง

$$\Gamma = \frac{(D_p^2 \cdot U_G \cdot \rho_p)^{0.3} \cdot \left(\frac{\rho_G \cdot U_G^2}{(\rho_p - \rho_G) \cdot D_p} \right)^{0.4} \cdot (a_0 \cdot \omega^2)^{0.42}}{W \cdot g_C \cdot \sin \theta}$$

2.1.3.6 ความเร็วเชิงเส้นของอนุภาค

Arai, N., Hasatani, M. และ Sugiyama, S. [14] ได้สรุปสมการของความเร็วเชิงเส้นของอนุภาค ดังนี้

$$\frac{U_p}{U_G} = 2.75 \cdot 10^3 \cdot \frac{(D_p \cdot U_G \cdot \rho_p)^{-0.8} \cdot ((U_G - U_{MF}) \cdot D_p \cdot \rho_G)^{0.575}}{W \cdot \mu_G} \quad (2.7)$$

2.1.3.7 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

ในกรณีของของแข็งที่มีอนุภาคขนาดโต ได้มีผู้เสนอสมการสำหรับการคำนวณหาค่าไว้ดังนี้ [30]

$$Nu_p = 2.0 + 0.75.(Rep)^{0.5}.Pr^{1/3} \quad (2.8)$$

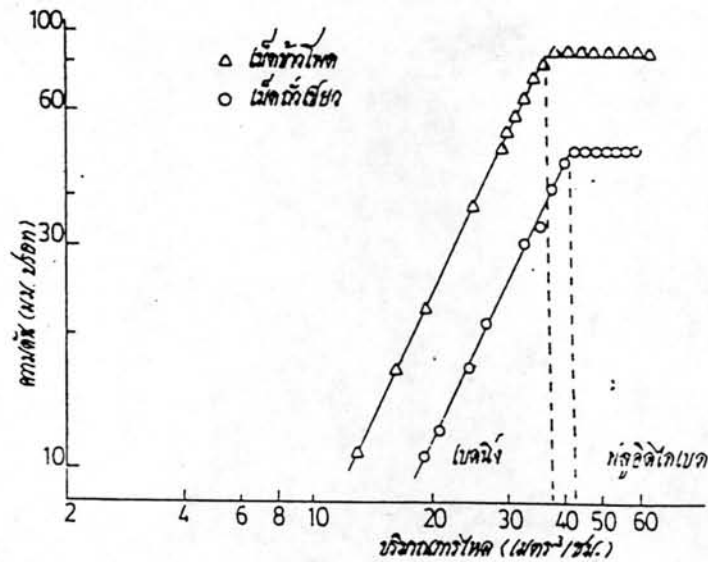
$$\text{ซึ่ง } Nu_p = hpD_p/k \quad (2.9)$$

$$Rep = (U_{G1}^* + U_p).D_p.\rho_G/\mu_G \quad (2.10)$$

2.1.4 การใช้เทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดกับการอบแห้ง

ฟลูอิดไดซ์เบด จะเกิดขึ้นได้ก็อาศัยแฟกเตอร์หลายอย่างมาผสมผสานกัน ให้เกิดความพอเหมาะขึ้นในเบด เบดนั้นจึงจะเกิดมีคุณสมบัติคล้ายของไหลได้ แฟกเตอร์ที่สำคัญในลำดับแรกคือ ความเร็วของของไหลดังกล่าวมาแล้ว ความเร็วของของไหลที่ค่อยๆ เพิ่มขึ้นน้อยนั้น ในระยะแรกเบดยังคงนิ่งอยู่ ความดันตกก็จะเพิ่มไปพร้อมกับความเร็วของไหล จนกระทั่งถึงระดับหนึ่ง เมื่อเม็ดของแข็งเริ่มขยับและแยกตัวเป็นอิสระ ความดันตกของเบดก็ไม่เพิ่มต่อไป ไม่ว่าเราเพิ่มความเร็วให้กับของไหลเท่าไรก็ตาม เบดในช่วงนี้ เราเรียกว่า ฟลูอิดไดซ์เบด

แม้ว่าวัสดุที่ใช้เป็นเบด จะมีรูปร่างแตกต่างออกไป ลักษณะของเบด หรือความสัมพันธ์ของความดันตกของเบด กับความเร็วก็มีผลเหมือนเดิม คือ ในช่วงที่เป็นฟลูอิดไดซ์เบด จะมีค่าความดันตกคงที่ เพราะค่าความดันตกในขณะนั้นจะมีตัวเลขใกล้เคียงกับอัตราส่วนของน้ำหนักของเม็ดของแข็งที่บรรจุอยู่ต่อพื้นที่ภาคตัดขวางของท่อทดลอง ซึ่งจากผลการวิจัยกับเมล็ดถั่วเขียวที่ความชื้นร้อยละ 12 และเมล็ดข้าวโพดที่ความชื้นร้อยละ 13 ผลการทดลองดังแสดงในรูป 2.2 ขณะที่เบดเริ่มเกิดเป็นฟลูอิดไดซ์เบด เม็ดของแข็งก็เริ่มขยับตัวจัดระเบียบของตัวเองให้อยู่ในแนวเดียวกัน หรือจัดเรียงเม็ดต่อเม็ดอย่างสวยงาม จากนั้นแต่ละเม็ดก็ค่อยๆ แยกห่างออกไปเป็นอิสระตามความเร็วของของไหลที่เพิ่มขึ้น ความเร็วของของไหลที่ทำให้เบดเริ่มขยับตัวหรือเริ่มจัดตัวเองนี้(ในขณะเดียวกันความดันตกเริ่มคงที่) ความเร็วจำนวนนี้เราเรียกว่า ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดซ์เบด โดยจากการทดลองดังรูป ได้ว่าค่าความเร็วต่ำสุดของอากาศมีค่าประมาณ 41.7 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง เมื่อทดลองกับเมล็ดถั่วเขียว และเท่ากับ 36.6 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง เมื่อทดลองกับเมล็ดข้าวโพด



รูป 2.2 ผลการทดลองที่ใช้เมล็ดข้าวโพดและเมล็ดถั่วเขียว

ตัวแปรที่สำคัญอีกตัวหนึ่งคือ ตัวกระจายของไหล(Distributor) และชิ้นส่วนที่จะทำให้ของไหลมีความเร็วสม่ำเสมอตลอดพื้นที่ภาคตัดขวางของหอทดลอง (Homogeneity section)

ในการทดลองใดก็ตาม ถ้าออกแบบตัวกระจายหรือชิ้นส่วนกระจายของไหล ไม่เหมาะสมกับเบดที่ใช้แล้ว จะเกิดช่องหรือแนวช่องที่มีแต่ของไหลเพียงอย่างเดียวผ่าน (Channeling) ที่เกิดเหตุการณ์แบบนี้ เพราะความเร็วที่ไหลสู่เบด มีส่วนหนึ่งเร็วกว่าส่วนอื่นๆ บริเวณนี้ของไหลจะทำให้เม็ดของแข็งกระจาย หรือแยกตัวออกไปอยู่ด้านข้าง เกิดเป็นช่องว่าง ตลอดทั้งความสูงของเบดหรือส่วนหนึ่งของเบด ปรากฏการณ์เช่นนี้มักเกิดในฟลูอิดไดเซชันที่ใช้ก๊าซเป็นของไหล

ตัวแปรอื่นๆ ที่มีอิทธิพลต่อไฮโดรไดนามิกของเบด มีอาทิเช่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหอทดลอง และเม็ดของแข็ง ความถ่วงจำเพาะของไหลและเม็ดของแข็ง ความหนืด ความสูงของเบด เป็นต้น

2.2 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการอบแห้ง

การอบแห้ง เป็นกระบวนการถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุที่ต้องการอบแห้ง โดยวิธีใดวิธีหนึ่ง เช่น วิธีการพา การนำการแผ่รังสี หรือทั้งสามแบบผสมกัน เพื่อทำให้น้ำหรือของเหลวที่อยู่ในเนื้อวัสดุระเหยออกมาอยู่ในรูปของไอ โดยความร้อนที่ได้รับจะเป็นความร้อนแฝงของการระเหย

ปริมาณน้ำที่มีอยู่ในวัสดุที่ต้องการอบแห้ง จะนิยามในรูปของอัตราส่วนของน้ำต่อมวลทั้งหมด โดยใช้ (17)

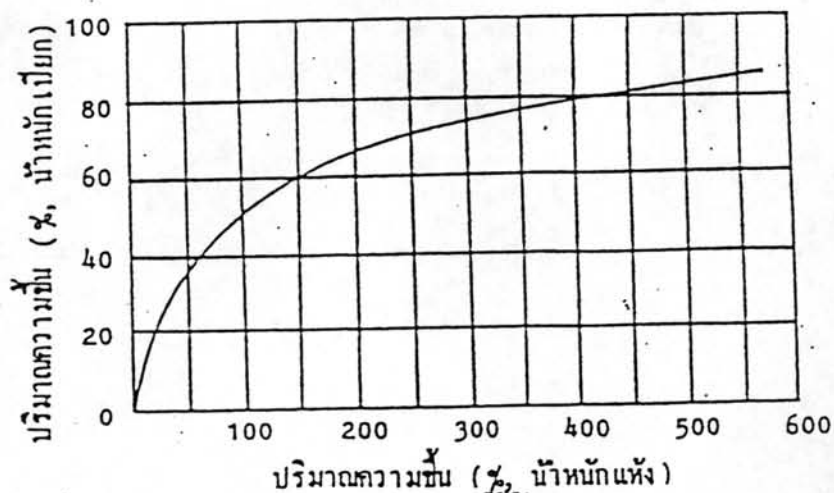
- มวลวัสดุชื้นเป็นหลัก (Wet basis) ในการคำนวณจะได้

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความชื้น} = \{ w_d / (1 + w_d) \} * 100\% \quad (2.12)$$

- มวลของวัสดุแห้งเป็นหลัก (Dry basis) ในการคำนวณจะได้

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความชื้น} = \{ w_w / (1 - w_w) \} * 100\% \quad (2.13)$$

โดยตัวหารของสมการมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับปริมาณความชื้นในเมล็ดพืช ความสัมพันธ์ระหว่างการหาความชื้นของเมล็ดพืชที่ชื้นและแห้งเป็นหลัก แสดงไว้ในรูป 2.3



รูป 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างการวัดความชื้นโดยมาตรฐานต่างกัน

2.2.1 ความชื้นสมดุลย์ (Equilibrium moisture content)

โดยทั่วไป การแบ่งประเภทของวัสดุตามคุณสมบัติของการอบแห้งได้ 2 ประเภท คือ

- ประเภทแรก วัสดุที่ผ่านการอบแห้งสามารถอบแห้งจนกระทั่งไม่มีความชื้นหลงเหลือ อยู่ในวัสดุเลย (Non-hydrosopic) เช่น พราย

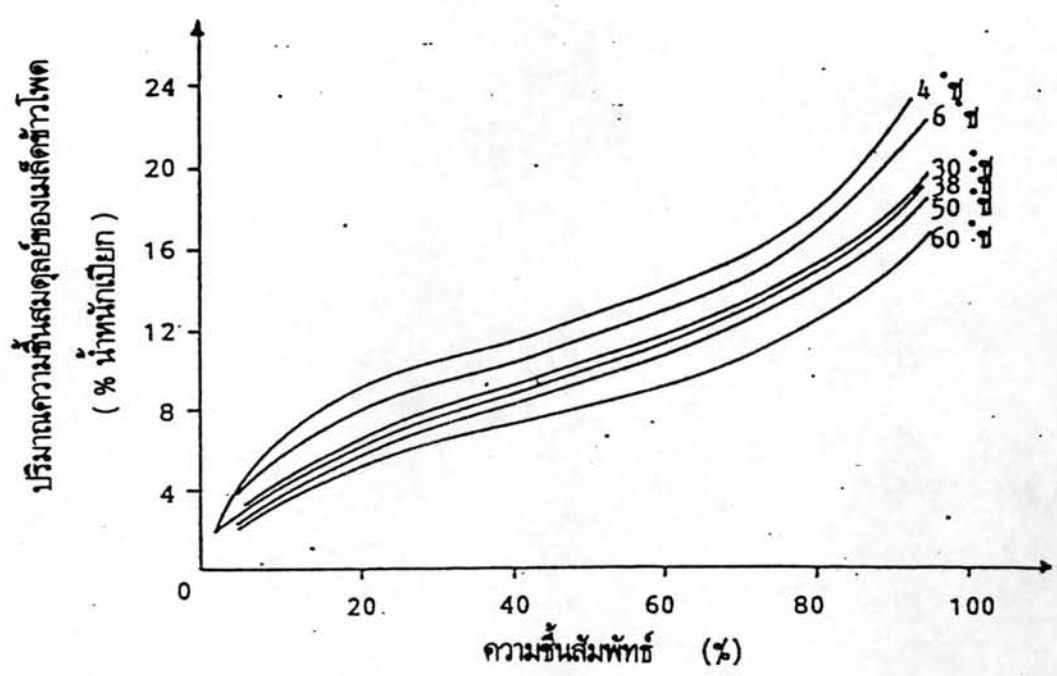
- ประเภทที่สอง วัสดุจะสามารถแลกเปลี่ยนความชื้นกับสภาวะแวดล้อมได้ ทำให้ไม่สามารถอบแห้งจนมีความชื้นเป็นศูนย์ได้ ซึ่งคุณสมบัตินี้เรียกว่า Hydrosopic เช่น พวกเมล็ดธัญพืชต่างๆ แต่วัสดุเหล่านี้จะมีค่าความชื้นสมดุลย์ ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อความชื้นภายในวัสดุมีความดันไปเท่ากับ ความดันไอของอากาศที่อยู่รอบๆ ค่านี้จะขึ้นกับชนิดของวัสดุ อุณหภูมิ และความชื้นเป็นต้น [18]

เมล็ดพืชและวัสดุอาหารส่วนใหญ่จะมีค่าความชื้นสมดุลย์ไอโซเทอม (Equilibrium moisture isotherm) ดังรูปที่ 2.4 และ 2.5 ถ้าสังเกตจะพบว่าที่ความชื้นสัมพัทธ์เดียวกัน ค่าความชื้นสมดุลย์ในเมล็ดข้าวโพดลดลง เมื่ออุณหภูมิของอากาศเพิ่มขึ้น [19,20]

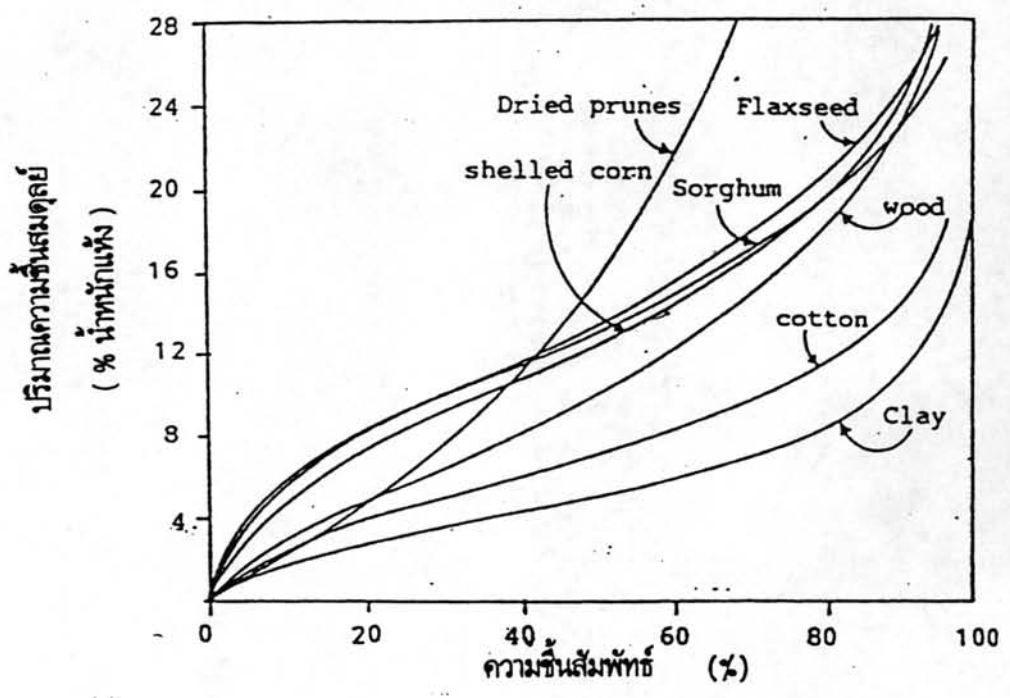
การเข้าสู่ความชื้นสมดุลย์เป็นไปได้ 2 ทางคือ วัสดุจะคายความชื้นให้แก่อากาศที่อยู่รอบๆ จนเข้าสู่ความชื้นสมดุลย์ ปรากฏการณ์เช่นนี้เรียกว่า การคายความชื้น หรือวัสดุดูดความชื้นจากอากาศ จนเข้าสู่ความชื้นสมดุลย์เรียกว่า การดูดความชื้น ในวัสดุชนิดเดียวกันที่อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์คงที่ที่ค่าหนึ่ง จะมีการเข้าสู่สมดุลย์ 2 ทางไม่เท่ากัน ทำให้เกิดความแตกต่างของค่าความชื้นสมดุลย์ที่เรียกว่า Hysteresis รูปที่ 2.6 และตามปกติแล้วค่าความชื้นสมดุลย์จะเกิดการคายความชื้น และค่านี้จะมีค่าสูงกว่าการดูดซึมความชื้นเสมอ [2]

2.2.2 เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง (Drying Characteristic Curve)[12]

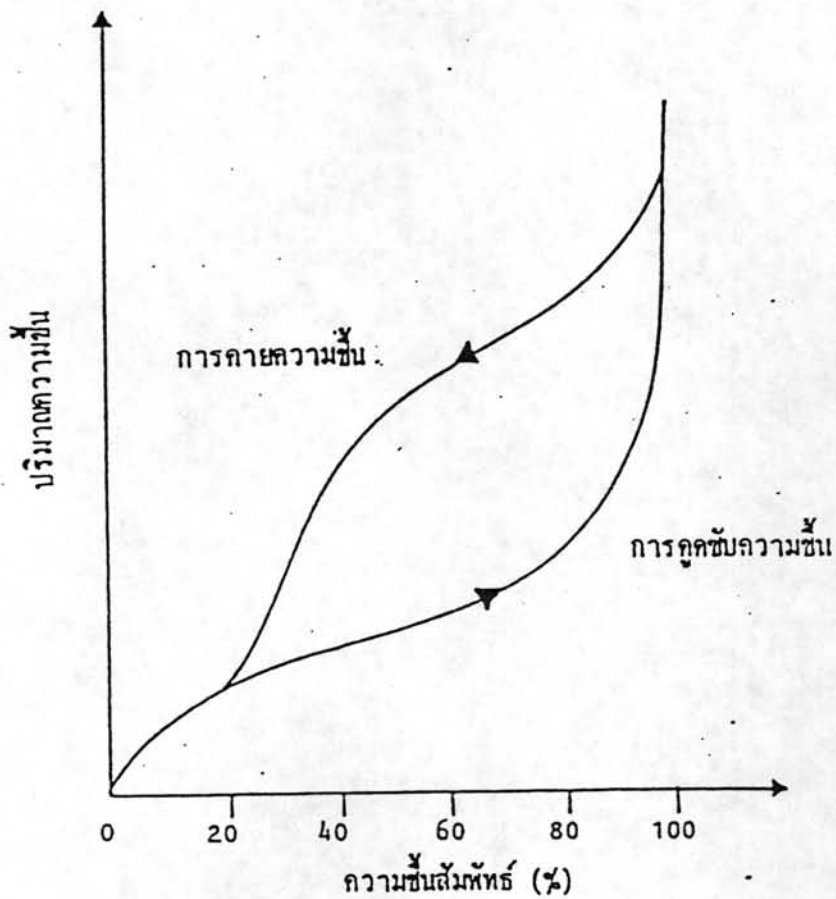
ในกรณีการอบแห้งวัสดุที่เปียกขึ้นอย่างมาก ภายใต้ง่อนไขของการอบแห้งที่คงที่ เช่น ในกรณีที่วางวัสดุเปียกขึ้นภายในกระแสลมปริมาณมากที่มีอุณหภูมิ ความชื้น(Humidity) และความเร็วลมคงที่ ถ้าลองวัดการเปลี่ยนแปลงมวลและอุณหภูมิของวัสดุที่อบแห้งนี้ กับเวลา จะได้กราฟคล้ายคลึงกับรูป 2.7 นี้



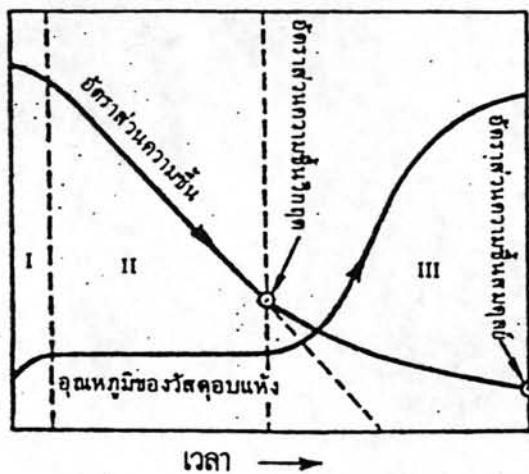
รูป 2.4 ปริมาณความชื้นสมมูลของเมล็ดข้าวโพดที่อุณหภูมิต่างๆ กัน



รูป 2.5 เส้นความชื้นสมมูลของวัสดุต่างๆ ที่อุณหภูมิ 25°C



รูป 2.6 การเข้าสู่สมดุลสำหรับเมล็ดพิช



รูป 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นและอุณหภูมิ

การอบแห้งแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วงใหญ่ๆ ดังนี้

1. ช่วงการให้ความร้อนเบื้องต้นแก่วัสดุ
2. ช่วงการอบแห้งที่ความเร็วคงที่
3. ช่วงการอบแห้งที่ความเร็วลดลง

ที่ผิวของวัสดุที่เปียกชื้น ความชื้นที่ผิวจะอยู่ในรูปของน้ำ ถ้าเอาวัสดุนี้มาอบแห้งภายใต้เงื่อนไขที่คงที่ อุณหภูมิของวัสดุจะมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิกระเปาะเปียก (Tw) ของกระแสลมร้อน ช่วงเวลาที่วัสดุใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิจนถึงค่านี้ คือช่วง 1 ในรูป 2.7 ในช่วงเวลา 2 ที่ถัดไป อุณหภูมิของวัสดุจะมีค่าคงที่ประมาณ อุณหภูมิกระเปาะเปียก (Tw) ตราบใดที่ยังมีความชื้นเหลืออยู่ในรูปน้ำที่ผิววัสดุ ความร้อนทั้งหมดที่วัสดุได้รับในช่วงนี้จะถูกใช้ในการระเหยความชื้นเท่านั้น ดังเห็นได้จากรูป อัตราส่วนความชื้นเฉลี่ย w ของวัสดุจะลดลงเป็นสัดส่วนกับเวลาในช่วง 2 นี้ ดังนั้น ความเร็วของการระเหยจะมีค่าคงที่ (Constant drying rate) ในช่วง 3 โดยทั่วไปพวกธัญพืช (Agricultural product) จะมีแต่ช่วงนี้เท่านั้นเนื่องจากความชื้นที่บริเวณผิวหน้าจะระเหยไปเกือบหมดแล้ว ตั้งแต่ยังเป็นผักแก่ก่อนเก็บเกี่ยวจากต้น เช่น ข้าวโพด ช่วงนี้เริ่มที่จุดปริมาณความชื้นวิกฤต (Critical moisture content) ความชื้นในรูปของน้ำที่ผิวของวัสดุจะระเหยหมดไป เพราะการถ่ายเทความชื้นในรูปของน้ำ จากส่วนในของวัสดุเกิดขึ้นไม่ทันกับการระเหยของน้ำจากผิวของวัสดุ ดังนั้น ผิวของวัสดุจะอยู่ในสภาพที่แห้ง และอุณหภูมิของวัสดุจะเริ่มสูงขึ้น สรุปแล้วความเร็วของการอบแห้งจะค่อยๆ ลดลง เพราะปริมาณความร้อนที่วัสดุจะได้รับนอกจากจะลดลงแล้ว ความร้อนนี้ยังต้องใช้ในการระเหยความชื้นและเพิ่มอุณหภูมิของวัสดุด้วย การอบแห้งจะสิ้นสุดลงเมื่ออัตราส่วนความชื้นลดลงถึงค่าอัตราส่วนความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content) ค่าของอัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยที่จุดต่อระหว่างช่วง 2 และ 3 มีชื่อเรียกว่า อัตราส่วนความชื้นวิกฤต (Critical moisture content)

เงื่อนไขของการอบแห้ง อาจแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ เงื่อนไขภายนอกวัสดุที่ก่อให้เกิดการอบแห้งและเงื่อนไขภายในตัววัสดุเอง

เงื่อนไขภายนอกจะเกี่ยวข้องกับวิธีการถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุ และวิธีการกำจัดไอน้ำ
ที่ระเหยออกมา

ส่วนเงื่อนไขภายใน ได้แก่ องค์ประกอบและรูปร่าง อัตราส่วนความชื้นของวัสดุอบแห้ง
เป็นต้น

กำหนดให้ R - (kg water/hr. m^2 drying area)

R_w - (kg water/hr. kg dry solid)

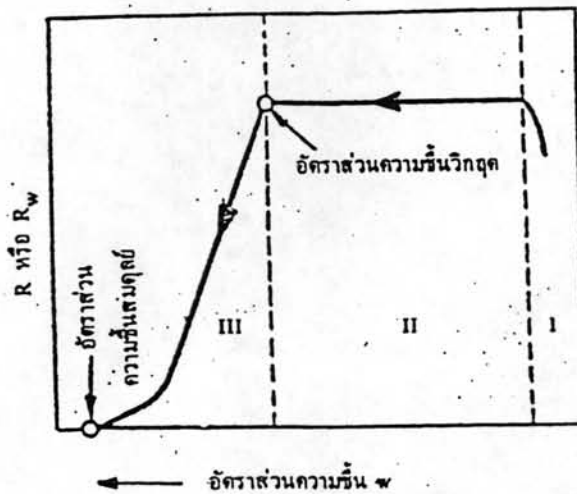
W - มวลของวัสดุอบแห้ง (kg dry solid)

A - พื้นที่ของการอบแห้ง (m^2)

เราจะได้

$$R = R_w(W/A) \tag{2.14}$$

และจะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของการอบแห้ง R หรือ R_w กับ
 w (moisture content) จะได้ดังรูป 2.8



รูป 2.8 เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง

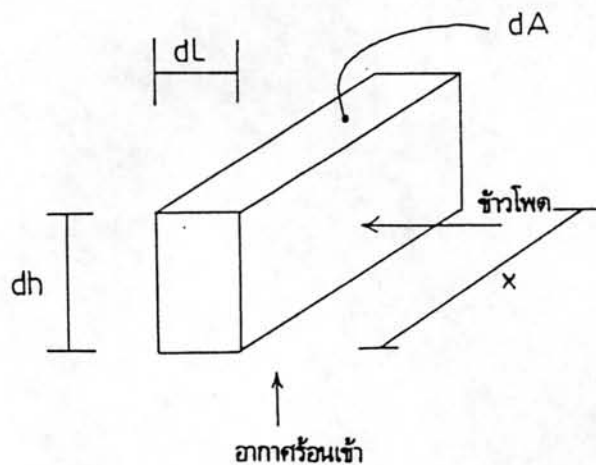
2.3 แบบจำลองคณิตศาสตร์ในการอบแห้งเมล็ดพืช

ในการสร้างแบบจำลองสามารถทำได้โดยการทำสมดุลงความร้อนและมวลสาร บนปริมาตร บังคับ ณ. ตำแหน่งใดๆ ในชั้นการอบแห้ง โดยมีข้อสมมุติฐานดังนี้

- 1) ไม่คิดว่าปริมาตรของเมล็ดมีค่าลดลงในขณะที่ทำการอบแห้ง
 - 2) ไม่มีการนำความร้อนระหว่างเมล็ดพืช
 - 3) ไม่มี การเคลื่อนที่ของอุณหภูมิจากเมล็ด ในแต่ละเมล็ด
 - 4) ไม่มีการถ่ายเทความร้อนระหว่างเครื่องอบแห้งกับสิ่งแวดล้อม
 - 5) คุณสมบัติทางความร้อนของเมล็ดพืชและของลมร้อนมีค่าคงที่ในช่วงเวลาที่กำลังพิจารณา
 - 6) ไม่เกิดการกลั่นตัวของไอน้ำในอากาศ
 - 7) อากาศมีการผสมในทิศทางตามความสูงของเบดอย่างสมบูรณ์และการไหลเป็นแบบลูกสูบ
- อนึ่ง การไหลของอากาศร้อนที่ผ่านเบดและที่ว่างระหว่างชั้นนั้นเป็นการไหลแบบลูกสูบ
- 8) ค่า $\partial T/\partial t$ และ $\partial H/\partial t$ มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่า $\partial T/\partial x$ และ $\partial H/\partial x$

2.3.1 การอนุพัทธ์สมการที่ใช้เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

พิจารณารูป 2.9



รูป 2.9 ปริมาตรบังคับใดๆ

เมล็ดข้าวโพด		อากาศร้อน	
มีอัตราการไหลเชิงมวล	G_p	มีอัตราการไหลเชิงมวล	G_G
ความเร็ว	U_p	ความเร็ว	U_G
อุณหภูมิของเมล็ดข้าวโพด	T_p	อุณหภูมิของอากาศร้อน	T_G
ปริมาณความชื้น	w	ปริมาณความชื้น	H_G
พื้นที่ผิวจำเพาะของข้าวโพด	S_p		

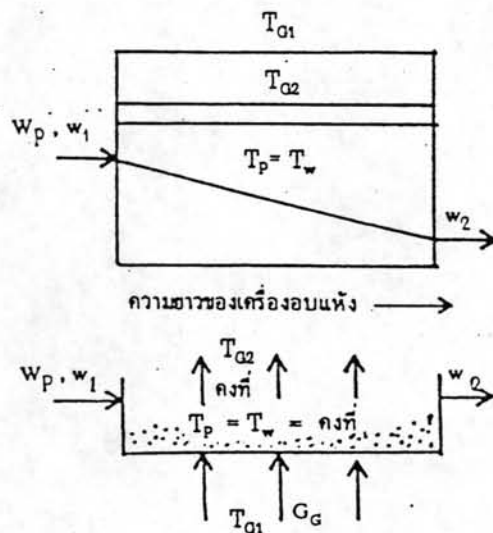
โดย x เป็นความกว้างขาเข้าของเครื่องอบแห้ง

จากเส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้งนั้น เราอาจกำหนดได้ว่าการอบแห้งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ช่วงใหญ่ๆ คือ

2.3.1.1 ช่วงการอบแห้งที่ความเร็วคงที่ หรือ ช่วงการระเหยจากผิววัสดุ

โดยกำหนดให้เป็นช่วงที่มีเพียงการลดความชื้นของวัสดุเพียงอย่างเดียว

ดังรูป 2.10



รูป 2.10 แสดงช่วงการระเหยที่ผิววัสดุ

โดยอุณหภูมิของอากาศขาออก (T_{G2}) จะมีค่าคงที่ในขณะที่อัตราส่วนความชื้นของวัสดุลดลงแบบเส้นตรง ตามความยาวของการอบแห้งในช่วงนี้ ซึ่งอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศร้อน คือ

$$G_G = U_G \cdot \rho_G / (1+H) \quad (2.15)$$

จะได้อะไรจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนของอากาศร้อน คือ

$$\frac{(\rho_G \cdot U_G \cdot C_G + \rho_G \cdot U_G \cdot C_W \cdot H) \cdot \partial T_G \cdot dA_C \cdot dh}{\partial h} \quad (2.16)$$

และจากอัตราการป้อนวัสดุ W_p (กิโลกรัม/ชั่วโมง) ที่กำหนดให้เราต้องการทราบพื้นที่ที่ต้องการใช้ในการลดความชื้นของวัสดุจาก w_1 เป็น w_2

$$\text{โดย พื้นที่ } dA_C = x \cdot dL_C$$

$$x = \text{ความกว้างของเครื่องอบแห้ง, เมตร}$$

$$dL_C = \text{ระยะตามยาวของเครื่องอบแห้ง, เมตร}$$

จะได้อะไรจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนของวัสดุในช่วงการระเหยที่ผิววัสดุนี้ คือ

$$\frac{hfg \cdot W_p \cdot (\partial w) \cdot dL_C}{\partial L_C} \quad (2.17)$$

แต่จากสมดุลย์เชิงความร้อนของปริมาณบังคับใดๆ ดังรูป 2.9 จะได้ว่า

$$dQ = h_p \cdot Sp \cdot \Delta T \cdot dA_C \cdot dh \quad (2.18)$$

$$\Delta T = T_G - T_p$$

โดย $T_p = T_w =$ อุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศร้อน

จากสมการ (2.16) เมื่อนำมาเทียบเท่ากับสมการ (2.18) จะได้

$$\frac{(\rho_G \cdot U_G \cdot C_G + \rho_G \cdot U_G \cdot C_W \cdot H) \cdot \partial T_G \cdot dA_C \cdot dh}{\partial h} = h_p \cdot Sp \cdot \Delta T \cdot dA_C \cdot dh$$

$$\frac{(\rho_G \cdot U_G \cdot C_G + \rho_G \cdot U_G \cdot C_W \cdot H) \cdot \partial T_G}{\partial h} = h_p \cdot Sp \cdot (T_G - T_w)$$

จะได้ว่า

$$\frac{dT}{(T_G - T_w)} = \frac{hp \cdot Sp \cdot dh}{(\rho_G \cdot U_G \cdot C_G + \rho_G \cdot U_G \cdot C_W \cdot H)}$$

$$\ln((T_{G2} - T_w) / (T_{G1} - T_w)) = \frac{-hp \cdot Sp \cdot h}{(\rho_G \cdot U_G \cdot C_G + \rho_G \cdot U_G \cdot C_W \cdot H)} = -M$$

$$T_{G2} = T_w + (T_{G1} - T_w) \cdot e^{-M} \quad (2.19)$$

จากสมการ (2.16) เมื่อนำมาเทียบเท่ากับสมการ (2.17) จะได้ว่า

$$\frac{hfg \cdot W_p \cdot (\partial w)}{\partial L_C} \cdot dL_C = \frac{(\rho_G \cdot U_G \cdot C_G + \rho_G \cdot U_G \cdot C_W \cdot H) \cdot \partial T_G \cdot dA_C \cdot dh}{\partial h}$$

$$hfg \cdot W_p \cdot dw = (\rho_G \cdot U_G \cdot C_G + \rho_G \cdot U_G \cdot C_W \cdot H) \cdot \Delta T_G \cdot x \cdot dL_C$$

ซึ่งในที่นี้ $\Delta T_G = T_{G2} - T_{G1}$

$$hfg \cdot W_p \cdot dw = (\rho_G \cdot U_G \cdot C_G + \rho_G \cdot U_G \cdot C_W \cdot H) \cdot (T_{G2} - T_{G1}) \cdot x \cdot dL_C \quad (2.20)$$

แทนค่า T_{G2} จากสมการ (2.19) ลงในสมการ (2.20) จะได้

$$hfg \cdot W_p \cdot dw = (\rho_G \cdot U_G \cdot C_G + \rho_G \cdot U_G \cdot C_W \cdot H) \cdot (T_{G1} - T_w) \cdot (e^{-M} - 1) \cdot x \cdot dL_C$$

จะได้

$$\int hfg \cdot W_p \cdot dw = \int (\rho_G \cdot U_G \cdot C_G + \rho_G \cdot U_G \cdot C_W \cdot H) \cdot (T_{G1} - T_w) \cdot (e^{-M} - 1) \cdot x \cdot dL_C$$

$$hfg \cdot W_p \cdot (w_2 - w_1) = (\rho_G \cdot U_G \cdot C_G + \rho_G \cdot U_G \cdot C_W \cdot H) \cdot (T_{G1} - T_w) \cdot (e^{-M} - 1) \cdot x \cdot \Delta L_C \quad (2.21)$$

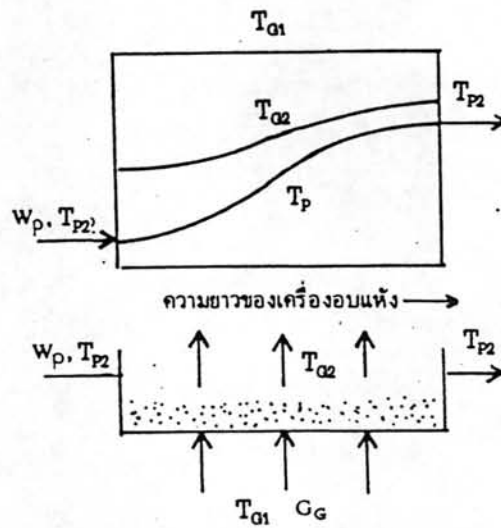
2.3.1.2 ช่วงการอบแห้งที่ความเร็วลดลง หรือ ช่วงการเพิ่มอุณหภูมิให้แก่วัสดุ

กำหนดเป็นช่วงที่มีเพียงการเพิ่มอุณหภูมิของวัสดุเพียงอย่างเดียวดังรูป 2.11

โดยจะเห็นว่าอุณหภูมิขาออกของอากาศร้อน และอุณหภูมิของวัสดุจะแปรผันตามทิศทางการไหลของวัสดุ

ซึ่งเราจะได้ว่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนของอากาศร้อน คือ

$$\frac{(\rho_G \cdot U_G \cdot C_G + \rho_G \cdot U_G \cdot C_W \cdot H) \cdot \partial T_G \cdot dA_D \cdot dh}{\partial h} \quad (2.22)$$



รูป 2.11 แสดงช่วงการเพิ่มอุณหภูมิของวัสดุ

และค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนของวัสดุ ในการเพิ่มอุณหภูมิของวัสดุจาก T_{p1} ไปเป็น T_{p2} ในปริมาณบังคับ จะได้

$$\frac{(\rho_p \cdot U_p \cdot C_p + \rho_p \cdot U_p \cdot C_w \cdot w) \cdot \partial T_p \cdot dA_D \cdot dL_D}{\partial L_D} \quad (2.23)$$

ซึ่งถ้าให้ค่า C_{pM} คือค่า ความร้อนจำเพาะของวัสดุที่มีความชื้น เราจะได้ว่า สมการ (2.23) จะเป็น

$$\frac{G_p \cdot C_{pM} \cdot \partial T_p \cdot dA_D \cdot dL_D}{\partial L_D} = \frac{W_p \cdot C_{pM} \cdot \partial T_p \cdot dL_D}{\partial L_D} \quad (2.24)$$

จากสมดุลย์ความร้อนของปริมาณบังคับใดๆ ดังรูป 2.9 จะได้ว่า

$$Q = h_p \cdot S_p \cdot \Delta T \cdot dA_D \cdot dh \quad (2.25)$$

$$\Delta T = T_G - T_p$$

จากสมการ (2.22) เมื่อนำมาเทียบเท่ากับสมการ (2.25) จะได้ว่า

$$\ln((T_{G1} - T_{p1}) / (T_{G1} - T_{p2})) = \frac{-h_p \cdot S_p \cdot h}{(\rho_G \cdot U_G \cdot C_G + \rho_G \cdot U_G \cdot C_w \cdot H)} = -M \quad (2.26)$$

และ จากสมการ (2.22) เมื่อนำมาเทียบเท่ากับสมการ (2.24) จะได้ว่า

$$\frac{(\rho_G \cdot U_G \cdot C_G + \rho_G \cdot U_G \cdot C_w \cdot H) \cdot \partial T_G \cdot dA_D \cdot dh}{\partial h} = \frac{W_p \cdot C_{pM} \cdot \partial T_p \cdot dL_D}{\partial L_D}$$

และ $dA_D = x \cdot dL_D$

จะได้ว่า

$$W_p \cdot C_{PM} \cdot \ln[(T_{G1} - T_{P1}) / (T_{G1} - T_{P2})] = (\rho_G \cdot U_G \cdot C_G + \rho_G \cdot U_G \cdot C_W \cdot H) \cdot (1 - e^{-M}) \cdot x \cdot dL_D \quad (2.27)$$

2.4 คุณสมบัติทางกายภาพของข้าวโพด

แบบจำลองใดๆ ที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทมวลและถ่ายเทความร้อน จะต้องใช้ค่าคุณสมบัติทางฟิสิกส์ที่ถูกต้องในแบบจำลอง สมการที่แสดงคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของเมล็ดพืชที่สามารถใช้ในแบบจำลองที่จะวิจัย มีรายละเอียดดังนี้

2.4.1 ความชื้นสมดุลย์ของเมล็ดข้าวโพด

ความชื้นสมดุลย์มีความสำคัญต่อการศึกษาชบวนการอบแห้ง เพราะเมื่ออบแห้งเมล็ดข้าวโพดโดยใช้อากาศที่สามารถคงที่ (เช่น มีอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์คงที่) ความชื้นของเมล็ดข้าวโพดจะลดต่ำลงจนถึงจุดๆ หนึ่งซึ่งไม่เปลี่ยนแปลง ในขณะนั้นความชื้นในเมล็ดข้าวโพดมีความดันไอเท่ากับความดันไอของอากาศที่อยู่รอบๆ และอุณหภูมิของเมล็ดข้าวโพดก็เท่ากับอุณหภูมิของอากาศรอบๆ ด้วย เรียกความชื้นในขณะนั้นว่า ความชื้นสมดุลย์ของเมล็ดข้าวโพด ได้มีผู้ทำการทดลองหาสมการความชื้นสมดุลย์ของเมล็ดข้าวโพดไว้ คือ

อรุณี ผุดผ่อง [21] ได้ทดลองหาความชื้นสมดุลย์ของข้าวโพดพันธุ์สุวรรณ 1 และพันธุ์สุวรรณ 2 ในช่วงอุณหภูมิ 35 - 70 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ระหว่างร้อยละ 10-90 พบว่า

1. อุณหภูมิมีผลกระทบต่อความชื้นสมดุลย์อย่างเห็นได้ชัดโดยค่าความชื้นสมดุลย์จะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

2. ที่อุณหภูมิและค่าความชื้นสัมพัทธ์คงที่ค่าหนึ่ง การคายความชื้น (Desorption) ให้ค่าความชื้นสมดุลย์สูงกว่าการดูดความชื้น (Absorption)

ได้สร้างสมการความชื้นสัมพัทธ์ เพื่อใช้ทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์
ของข้าวโพดภายใต้ สภาวะอากาศหลายๆ แบบ ดังนี้

$$1-RH = \exp(C.T.\text{weq}^n) \quad \{ \text{Unit of Temp in } ^\circ\text{C} \} \quad (2.28)$$

$$\ln RH = (A/RT).\exp(B.\text{weq}) \quad \{ \text{Unit of Temp in } ^\circ\text{C} \} \quad (2.29)$$

ตาราง 2.1 ค่าคงที่ในสมการความชื้นสัมพัทธ์ของข้าวโพดซึ่งเสนอโดย อรุณี ผุดผ่อง [21]

ค่าคงที่	พันธุ์	ชนิดของความชื้นสัมพัทธ์	
		Desorption	Absorption
C	สุวรรณ1	-0.000030742	-0.000062091
	สุวรรณ2	-0.000035747	-0.000083438
n	สุวรรณ1	1.8156	1.6006
	สุวรรณ2	1.7665	1.4831
A	สุวรรณ1	-11310	-8814.7
	สุวรรณ2	-10612	-8148.0
B	สุวรรณ1	-0.1767	-0.1691
	สุวรรณ2	-0.1723	-0.1667

2.4.2 ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำในข้าวโพด

Thomson et al. [22] ได้เสนอสมการหาความร้อนแฝงในการระเหยน้ำในข้าวโพด

ดังนี้
$$h'fg = hfg.[1.04+4.35 \exp(-28.25w)] \quad (2.30)$$

โดยที่
$$hfg = 2502.535259 - 2.3857624(T) \quad (2.31)$$

สำหรับ $0 \leq T \leq 65.65$

$$hfg = \text{Sqrt}[7329155.978 - 15.99596408(T+273.16)^2] \quad (2.32)$$

สำหรับ $65.65 \leq T \leq 260$

Sqrt = รากที่สอง

T = อุณหภูมิ ,C

2.4.3 ความร้อนจำเพาะของข้าวโพด

อรุณี ผุดผ่อง [21] ทดลองหาความร้อนจำเพาะของข้าวโพด พันธุ์สุวรรณ 1 และ สุวรรณ 2 ที่ความชื้นระหว่างร้อยละ 11-37 ได้สมการในรูป

$$C_p = 1.514 + 0.030(w) \quad (2.33)$$

2.4.4 ความหนาแน่นของข้าวโพด

Bushuk and Hlynka [23] ได้ทำการศึกษาความหนาแน่นแท้จริงของข้าวโพด ได้สมการ ดังรูป

$$\rho_T = 1329.50 - 1.60(w) \quad (2.34)$$

อรุณี ผุดผ่อง [21] ได้ทดลองหาความหนาแน่นปรากฏของข้าวโพดพันธุ์สุวรรณ 1 และสุวรรณ 2 ในช่วงความชื้น 13-32 %db ได้สมการอยู่ในรูป

$$\rho_B = 682.6 + 0.8214(w) \quad (2.35)$$

2.4.5 อัตราส่วนความชื้นอิสระวิกฤตของเมล็ดข้าวโพด

Sugiyama,S. [24] กล่าวว่า เป็นตัวแปรคุณลักษณะของอนุภาค โดยจากกราฟ ลักษณะเฉพาะของการอบแห้งของอนุภาคนั้น (รูป 2.7) เมื่อพิจารณาเส้นกราฟของอัตราส่วนความชื้น นั้น พบว่าช่วงการอบแห้งที่ความเร็วคงที่ กับช่วงของการอบแห้งที่ลดลงนั้น จะถูกแบ่งโดยอัตราส่วนความชื้นวิกฤติ ซึ่งสามารถหาค่า ได้จากกราฟอัตราการอบแห้ง

2.5 การคำนวณหาประสิทธิภาพทางความร้อน [9]

จาก ประสิทธิภาพทางความร้อน (η , ร้อยละ)

$$\text{คือ } \frac{\text{พลังงานความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำจากเมล็ดข้าวโพด} * 100\%}{\text{พลังงานความร้อนของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง}} \quad (2.36)$$

โดย พลังงานความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำออกจากข้าวโพด

$$= (\text{เอนทัลปีของข้าวโพดที่ออกจากเครื่อง} - \text{เอนทัลปีของข้าวโพดที่เข้าเครื่อง} \\ + \text{เอนทัลปีของไอน้ำที่ระเหยออกจากข้าวโพด})$$

2.6 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องอบแห้ง

2.6.1 ความเร็วอากาศร้อน [25]

การอบแห้งที่ต้องการความรวดเร็ว เราจะต้องผ่านอากาศที่มีอุณหภูมิสูงพอสมควร เข้าไปในชั้นของวัสดุ อากาศร้อนนี้จะทำหน้าที่อย่างน้อย 2 อย่างในเวลาเดียวกัน กล่าวคือประการแรก ความร้อนที่มีอยู่ในอากาศถูกถ่ายเทให้กับวัสดุ เพื่อทำให้วัสดุคายความชื้นแล้วในวัสดุมีอุณหภูมิสูงขึ้น หรือไปเพิ่มพลังงานให้กับน้ำที่อยู่ภายในวัสดุ ประการที่สอง อากาศจะช่วยพาเอาความชื้นหรือไอน้ำที่ซึม ผ่านมาที่ผิวของวัสดุหลุดไปรอบๆ กับอากาศ

ถ้ากระบวนการนั้นเป็นแบบฟลูอิดไดเซชันด้วยแล้ว อากาศส่วนนี้ ยังทำหน้าที่พุง ใ่วัสดุลอยตัวอยู่ในชั้น หรือเบตของเครื่องอบแห้งนั้นอีกด้วย ครั้นวัสดุแห้งจนมีน้ำหนักเหลืออยู่ น้อย อากาศก็สามารถพัดพาเอาวัสดุนั้นออกจากเครื่องอบแห้งมายังภาชนะบรรจุตรงทางออกของ เครื่องได้อีกประการหนึ่ง

การพิจารณากลไกการทำงานในการอบแห้งที่เกิดขึ้นกับเมล็ดข้าวโพด ตามรูปที่ 2.9 มีขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 พลังความร้อนจากอากาศผ่านมายังชั้นของอากาศบางๆ ที่อยู่รอบๆ ผิวหน้าของเมล็ดข้าวโพด

ขั้นตอนที่ 2 ความร้อนผ่านชั้นอากาศบางมาแล้วจะถึงผิวหน้าของเมล็ดข้าวโพด

ขั้นตอนที่ 3 พลังงานความร้อนผ่านทะลุชั้นผิวหน้าก็จะค่อยๆ ถ่ายเทให้กับเนื้อชั้นในของเมล็ดข้าวโพด

ขั้นตอนที่ 4 ความชื้นที่อยู่ภายในเนื้อเมล็ดข้าวโพด หลังจากได้รับพลังงานความร้อน สมดุลย์ที่มีครั้งแรกถูกเปลี่ยนไป ความชื้นจะค่อยๆ ซึมผ่านชั้นเนื้อภายใน

ขั้นตอนที่ 5 ความชื้นหรือไอน้ำจะซึมผ่านชั้นเนื้อภายใน มาถึงผิวหน้าของเมล็ดข้าวโพด

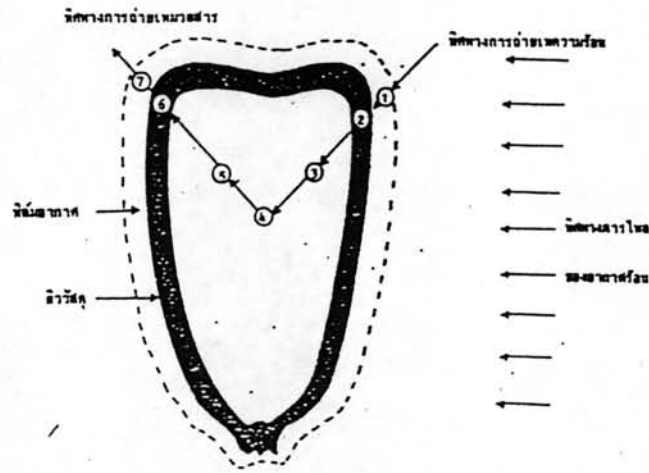
ขั้นตอนที่ 6 เป็นขั้นตอนที่ความชื้นหรือไอน้ำแพร่ผ่านมาถึงชั้นฟิล์มบางๆ ของอากาศ

ขั้นตอนที่ 7 ความชื้นหรือไอน้ำจะแพร่ผ่านพ้นชั้นฟิล์มบางๆ ของอากาศสู่บรรยากาศหรือกระแสอากาศที่พัดผ่าน

แต่ละขั้นตอนมีความยากง่ายของการซึมผ่านของน้ำหรือไอน้ำไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกายภาพของแต่ละวัสดุ

ความชื้นที่ซึมผ่านทางด้านผิวหน้าของเมล็ดข้าวโพดจะถูกอากาศร้อนพัดพาไป ทำให้ความชื้นจากภายในของเมล็ดข้าวโพดก็ซึมผ่านออกมาแทนที่ ถ้าเพิ่มความเร็วของอากาศร้อนมากขึ้น อัตราการซึมผ่านของความชื้นจะสูงขึ้น อย่างไรก็ตามอัตราการซึมผ่านหรือการแพร่กระจายของความชื้นมีขีดจำกัดระบบการอบแห้งจึงถูกควบคุมด้วยอัตราการซึมผ่านเนื้อของวัสดุ ซึ่งถ้าในกรณีที่มีความเร็วของอากาศร้อนมากเกินไปแล้วนั้น กลับจะเป็นผลเสีย กล่าวคือ ทำให้มีการใช้พลังงานความร้อนมากเกินไปจนจำเป็น เป็นผลทำให้ประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องอบแห้งต่ำ และความเร็วอากาศที่มากเกินไปนี้ ยังทำให้ความชื้นของข้าวโพดสูงกว่าความต้องการอีกด้วย เนื่องจากมีการพัดพาวัสดุ

ออกจากเครื่องอบแห้งเร็วเกินไปด้วย



รูปที่ 2.9 ความต้านทานต่างๆ ที่เกิดขึ้นต่อการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในการอบแห้ง

2.6.2 คุณหมุมิของอากาศร้อนที่เข้าเครื่องอบแห้ง [26]

อุณหภูมิอากาศร้อนที่ใช้ออบแห้งในช่วงไหน จะคำนึงถึงว่าเมล็ดข้าวโพดเป็นสิ่งมีชีวิต ฉะนั้น การอบที่อุณหภูมิสูงอาจทำลายหรือทำให้สุก หรือทำให้เมล็ดร้าว ซึ่งเกิดจากความเค้นภายใน เมล็ด ซึ่งทำให้เกิดวัตถุประสงค์ของการอบ และยังเป็นการทำลายปริมาณแป้งที่มีอยู่ในข้าวโพดให้ลดลง ดังแสดงไว้ในตาราง 2.2 [27] อีกทั้งยังทำให้เมล็ดข้าวโพดเสียรูปทรงไป เช่น เมล็ดลีบลงและมีสีเหลืองซีด ดังตาราง 2.3 [19]

ตาราง 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ใช้ออบแห้งข้าวโพด และปริมาณแป้งที่มีอยู่ในข้าวโพด

อุณหภูมิที่ใช้ออบแห้ง (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิข้าวโพดหลังการอบแห้ง (องศาเซลเซียส)	ปริมาณแป้งในข้าวโพด (ร้อยละ)
23	-	62.2
60	48	61.2
86	65	60.2
114	77	57.5
141	92	48.8

ตาราง 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Volume shrinkage ที่เกิดขึ้นกับข้าวโพดเมื่ออบแห้งข้าวโพด
ที่มีความชื้นเริ่มต้นต่างๆ กันจนเหลือความชื้นร้อยละ 12 [19]

ความชื้นข้าวโพดเริ่มต้น (ร้อยละ)	Volume Shrinkage (%)
30	29.1
25	22.5
20	14.5
17	9.1

ซึ่งเกิดเนื่องจากอัตราการระเหยของน้ำภายในเมล็ดข้าวโพดเร็วมาก จึงทำให้รูปทรง
เสียไป อันเป็นผลมาจากการใช้อุณหภูมิอากาศร้อนที่สูง มาใช้ในการอบแห้ง [9]

2.6.3 เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง

การใช้เครื่องอบแห้งเมล็ดพืชนั้น ระยะเวลาในการอบมีผลต่อการเจริญของเชื้อรา
ความแข็งแรงของเมล็ด และความสามารถในการงอกของเมล็ด ดังนั้นเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ถ้าไม่
เหมาะสมจะทำให้การเคลื่อนที่ของน้ำในเมล็ดมายังผิวไม่สม่ำเสมอ ทำให้เกิดการแตกหักของผิว
เมล็ดอันเนื่องมาจากการหดตัวไม่เท่ากันระหว่างเนื้อเยื่อภายในเมล็ดและเปลือกหุ้ม [28]

อีกทั้งจากการถือว่าการผสมกันของวัสดุภายในฟลูอิดไดซ์เบด เป็นการผสมกันแบบ
สมบูรณ์ ดังนั้น จะมีอนุภาคที่ยังไม่แห้งหลุดออกมาด้วยในระหว่างการอบแห้ง ซึ่งถ้าเวลาที่ใช้ใน
การอบแห้งไม่เพียงพอแล้ว จะทำให้วัสดุที่ออกมาจากเบดมีความชื้นไม่สม่ำเสมอ [12] แต่ถ้าเวลาที่
ใช้มากเกินไปแล้ว จะทำให้สิ้นเปลืองพลังงาน ซึ่งเป็นผลให้เสียค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น [9]