บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 กระบวนการอบแห้ง

การอบแห้ง[11] เป็นกระบวนการถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุที่ต้องการอบแห้ง โดยวิธีใดวิธีหนึ่ง เช่น วิธีการพา การนำการแผ่รังสี หรือทั้งสามแบบผสมกัน เพื่อทำให้น้ำหรือของเหลวที่อยู่ในเนื้อวัสดุระเหยออกมาอยู่ในรูปของไอน้ำ โดยความร้อนที่ได้รับจะเป็นความร้อนแฝงของการระเหย

ปริมาณน้ำที่มีอยู่ในวัสดุที่ต้องการอบแห้ง จะนิยามในรูปของอัตราส่วนของน้ำต่อมวลทั้งหมดโดยใช้

- มวลวัสดุชื้นเป็นหลัก (Wet basis) ในการคำนวณจะได้

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความชื้น} = \frac{(w-d)x100}{w} \tag{3.1}$$

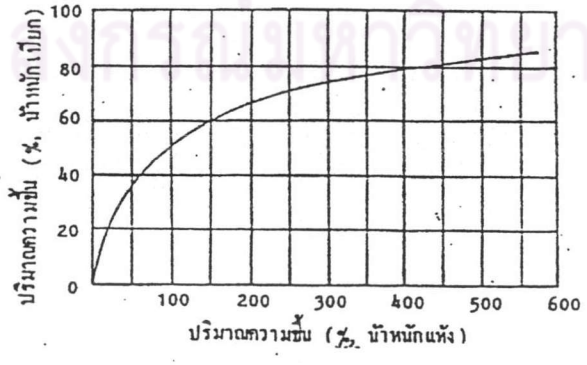
- มวลของวัสดุแห้งเป็นหลัก (Dry basis) ในการคำนวณจะได้

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความชื้น} = \frac{(w-d)x100}{d} \tag{3.2}$$

โดยที่ w = น้ำหนักน้ำในวัสดุ , กรัม

d = น้ำหนักแห้งในวัสดุ , กรัม

ความสัมพันธ์ระหว่างการหาความชื้นของเมล็ดพืชที่ชื้นและแห้งเป็นหลัก แสดงไว้ในรูป 3.1



รูป 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างการวัดความชื้นโดยมาตรฐานต่างกัน[11]

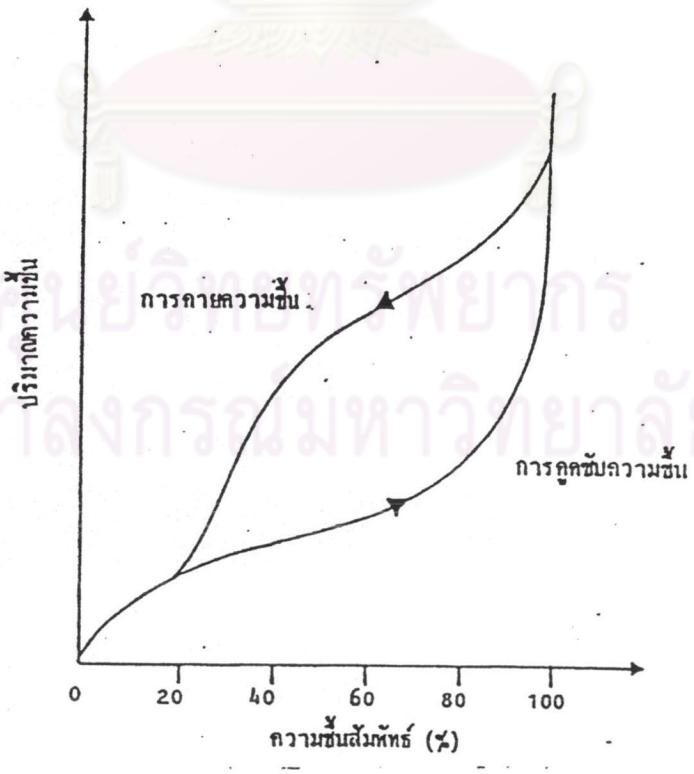
3.1.1 ความชื้นสมดุล

การแบ่งประเภทของวัสดุตามคุณสมบัติของการอบแห้ง[11] แบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. วัสดุที่เมื่อผ่านการอบแห้งแล้ว สามารถอบแห้งจะสามารถอบแห้งจนกระทั่งไม่มีความชื้นหลงเหลืออยู่ในวัสดุเลย (Non-hydroscopic) เช่น ทราย

2. วัสดุจะสามารถแลกเปลี่ยนความชื้นกับสภาวะแวดล้อมได้ ทำให้ไม่สามารถอบแห้งจนมีความชื้นเป็นศูนย์ได้ ซึ่งคุณสมบัตินี้เรียกว่า Hydroscopic เช่น พวกเมล็ดธัญพืชต่าง ๆ แต่วัสดุเหล่านี้จะมีค่าความชื้นสมดุล ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อความชื้นภายในวัสดุมีความดันไปเท่ากับความดันไอของอากาศที่อยู่รอบ ๆ ค่านี้จะขึ้นกับชนิดของวัสดุ อุณหภูมิ และความชื้นเป็นต้น

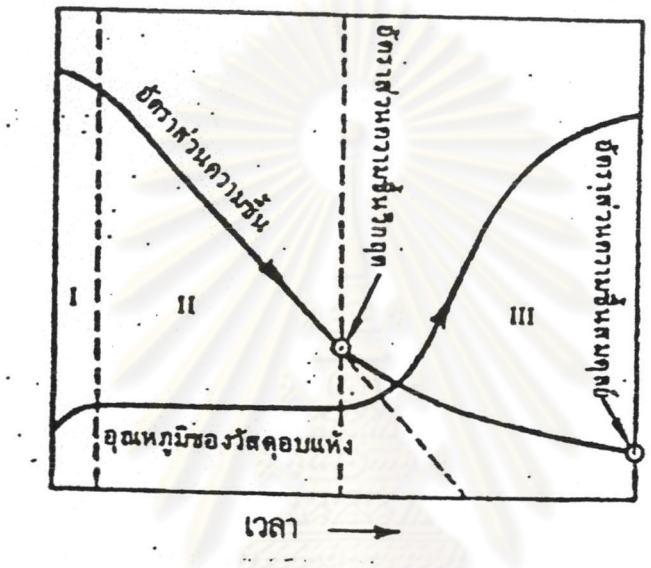
การเข้าสู่ความชื้นสมดุลเป็นไปได้ 2 ทางคือ วัสดุจะคายความชื้นให้แก่อากาศที่อยู่รอบ ๆ จนเข้าสู่ความชื้นสมดุล ปรากฏการณ์เช่นนี้เรียกว่า การคายความชื้น หรือวัสดุดูดความชื้นจากอากาศจนเข้าสู่ความชื้นสมดุลเรียกว่า การดูดความชื้น ในวัสดุชนิดเดียวกันที่อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์คงที่ที่ค่าหนึ่ง จะมีการเข้าสู่สมดุล 2 ทางไม่เท่ากัน ทำให้เกิดความแตกต่างของความชื้นสมดุลที่เรียกว่า Hysteresis รูปที่ 3.2 และตามปกติแล้วค่าความชื้นสมดุลจะเกิดการคายความชื้น และค่านี้จะมีค่าสูงกว่าการดูดซึมความชื้นเสมอ



รูป 3.2 การเข้าสู่สมดุลสำหรับเมล็ดพืช[11]

3.1.2 เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง (Drying Characteristic Curve)

ในกรณีการอบแห้งวัสดุที่เปียกชื้นอย่างมาก ภายใต้เงื่อนไขของการอบแห้งที่คงที่ เช่น ในกรณีที่วางวัสดุเปียกชื้นภายในกระแสลมปริมาณมากที่มีอุณหภูมิ ความชื้น(Humidity) และความเร็วลมคงที่ ถ้าลองวัดการเปลี่ยนแปลงมวลและอุณหภูมิของวัสดุที่อบแห้งนี้กับเวลา จะได้กราฟคล้ายคลึงกับรูป 3.3 นี้



รูป 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นและอุณหภูมิ[11]

การอบแห้งแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วงใหญ่ ๆ ดังนี้

1. ช่วงการให้ความร้อนเบื้องต้นแก่วัสดุ
2. ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่
3. ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง

ที่ผิวของวัสดุที่เปียกนั้น ความชื้นที่ผิวจะอยู่ในรูปของน้ำ ถ้าเอาวัสดุนี้มาอบแห้งภายใต้เงื่อนไขที่คงที่ อุณหภูมิของวัสดุจะมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิกระเปาะเปียก (Tw) ของกระแสลมร้อน ช่วงเวลาที่วัสดุใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิจนถึงค่านี้ คือช่วง 1 ในรูป 3.3 ในช่วงเวลา 2 ที่ถัดไป อุณหภูมิของวัสดุจะมีค่าคงที่ประมาณ อุณหภูมิกระเปาะเปียก (Tw) ตราบใดที่ยังมีความชื้นเหลืออยู่ในรูปน้ำที่ผิววัสดุ ความร้อนทั้งหมดที่วัสดุได้รับในช่วงนี้จะถูกใช้ในการระเหยความชื้นเท่านั้น ดังเห็นได้จากรูปอัตราส่วนความชื้นเฉลี่ย w ของวัสดุจะลดลงเป็นสัดส่วนกับเวลาในช่วง 2 นี้ ดังนั้น

ความเร็วของการระเหยจะมีค่าคงที่ (Constant drying rate) ในช่วง 3 โดยทั่วไปพวกธัญพืช (Agricultural product) จะมีแต่ช่วงนี้เท่านั้นเนื่องจากความชื้นที่บริเวณผิวหน้าจะระเหยไปเกือบหมดแล้ว ตั้งแต่ยังเป็นฝักแก่ก่อนเก็บเกี่ยวจากต้น เช่น ข้าวโพด ช่วงนี้เริ่มที่จุดปริมาณความชื้นวิกฤต (Critical moisture content) ความชื้นในรูปของน้ำที่ผิววัสดุจะระเหยหมดไป เพราะการถ่ายเทความชื้นในรูปของน้ำ จากส่วนในของวัสดุเกิดขึ้นไม่ทันกับการระเหยของน้ำจากผิววัสดุ ดังนั้น ผิวของวัสดุจะอยู่ในสภาพที่แห้ง และอุณหภูมิของวัสดุจะเริ่มสูงขึ้น สรุปแล้วความเร็วของการอบแห้งจะค่อย ๆ ลดลง เพราะปริมาณความร้อนที่วัสดุได้รับนอกจากจะลดลงแล้ว ความร้อนนี้ยังต้องใช้ในการระเหยความชื้นและเพิ่มอุณหภูมิของวัสดุด้วย การอบแห้งจะสิ้นสุดลงเมื่ออัตราส่วนความชื้นลดลงถึงค่าอัตราส่วนความชื้นสมดุลย์ (Equilibrium moisture content) ค่าของอัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยที่จุดต่อระหว่างช่วง 2 และ 3 มีชื่อเรียกว่า อัตราส่วนความชื้นวิกฤต (Critical moisture content)

เงื่อนไขของการอบแห้ง อาจแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ เงื่อนไขภายนอกวัสดุที่ก่อให้เกิดการอบแห้งและเงื่อนไขภายในตัววัสดุเอง เงื่อนไขภายนอกจะเกี่ยวข้องกับวิธีการถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุ และวิธีกำจัดไอน้ำที่ระเหยออกมา ส่วนเงื่อนไขภายในได้แก่ องค์ประกอบและรูปร่าง อัตราส่วนความชื้นของวัสดุอบแห้ง เป็นต้น

กำหนดให้ R = อัตราการระเหยของน้ำต่อพื้นที่ผิววัสดุ, kg water/hr. m^2 drying area

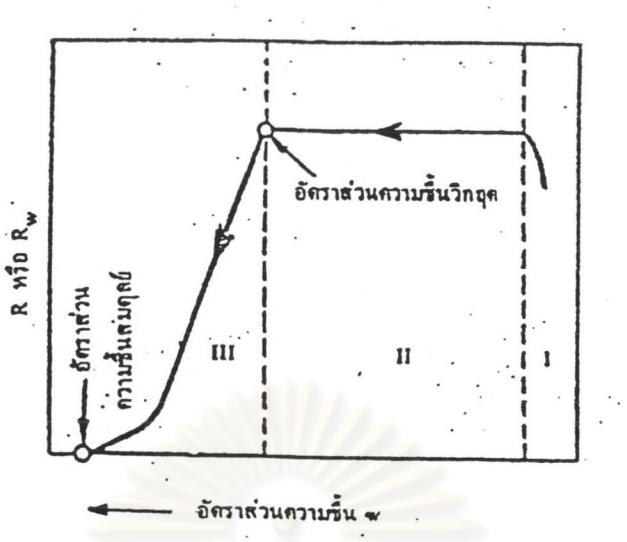
R_w = อัตราการระเหยของน้ำต่อมวลวัสดุ, kg water/hr. kg dry solid

W = มวลของวัสดุอบแห้งม kg dry solid

A = พื้นที่ของการอบแห้งม m^2

เราจะได้ $$R = R_w(W/A) \qquad (3.3)$$

และจะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของการอบแห้ง R หรือ R_w กับ w (moisture content) จะได้ดังรูป 3.4



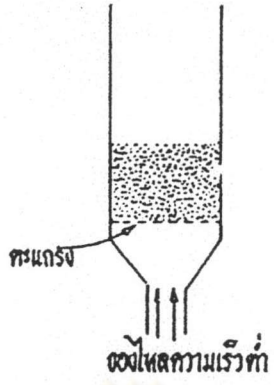
รูป 3.4 เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง[11]

3.2 ฟลูอิไดเซชัน

ฟลูอิไดเซชัน[12] เป็นขบวนการหรือวิธีการที่ของแข็งลักษณะเป็นเม็ดหรือเป็นชิ้นสัมผัสกับของไหลแล้ว เม็ดของแข็งนั้นจะมีคุณสมบัติคล้ายของไหล ตอนแรกเม็ดของแข็งจะถูกวางไว้บนตะแกรงในหอทดลอง ที่มักจะมีรูปร่างเป็นทรงกระบอกแนวตั้งหรือแนวนอนก็ได้ ของไหลที่ใช้จะเป็นก๊าซหรือของเหลวปล่อยให้ผ่านทางด้านล่างของตะแกรงที่รองรับเม็ดของแข็ง ของไหลก็จะไหลผ่านชั้นเม็ดของแข็ง แล้วไหลออกทางด้านบนของหอทดลอง เมื่อเพิ่มความเร็วของของไหลให้มากขึ้นเรื่อย ๆ จนในที่สุดเม็ดของแข็งจะขยับตัวและลอยตัวเป็นชั้นอิสระในของไหล พฤติกรรมของเม็ดของแข็งที่อยู่ในลักษณะนี้จะมีคุณสมบัติคล้ายของไหล กล่าวคือจะมีการไหลหมุนเวียนของเม็ดของแข็งภายในหอทดลอง เราเรียกของแข็งในสถานะนี้ว่า “ฟลูอิไดเซชัน”

3.2.1 ลักษณะของฟลูอิไดซ์เบด

คำว่า เบด (bed) หมายถึงอาณาเขตภายในหอทดลองที่มีปริมาณของเม็ดของแข็งบรรจุอยู่ ไม่ว่าเม็ดของแข็งจะอยู่นิ่งหรือเคลื่อนที่ในหอทดลองก็ตาม ซึ่งจะมีระดับตั้งแต่แผ่นโลหะที่ทำเป็นตะแกรงหรือตัวกระจายของไหล (Distributor) จนถึงระดับสูงสุดคือผิวหน้าของเม็ดของแข็งที่อยู่ภายในหอทดลอง ดังรูป 3.5



รูป 3.5 ระดับเบดในหอทดลอง[12]

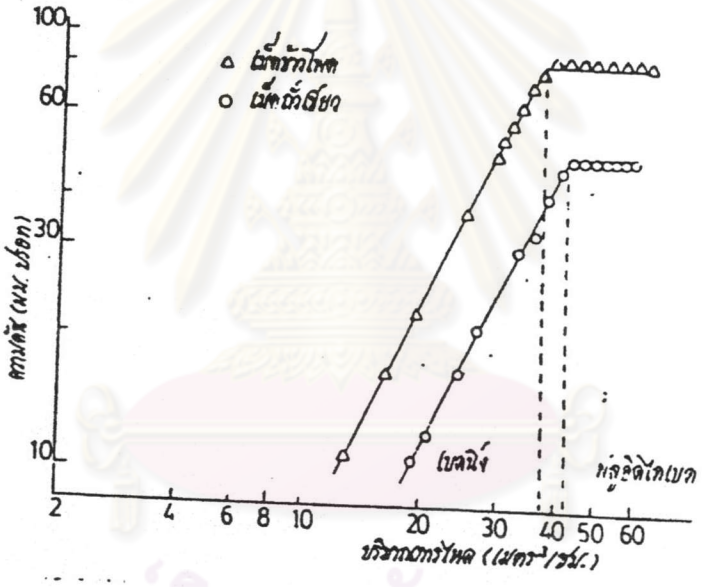
เมื่อบรรจุเม็ดของแข็งในหอทดลองเรียบร้อยแล้ว เริ่มปล่อยของไหลเข้าทางด้านล่างของหอทดลองอย่างช้า ๆ ขณะที่ของไหลความเร็วยังต่ำอยู่ ของไหลจะซึมผ่านช่องว่างระหว่างเม็ดของแข็ง เม็ดของแข็งจะไม่ขยับตัวเลย ลักษณะเช่นนี้เรียกว่า เบดนิ่ง (Fixed bed) เมื่อความเร็วของไหลเพิ่มขึ้นจนถึงระดับหนึ่ง เม็ดของแข็งจะเริ่มขยับตัวและจัดเรียงตัวใหม่อย่างเป็นระเบียบ และเมื่อเพิ่มความเร็วของของไหลอีกเล็กน้อย เม็ดของแข็งจะหลุดออกจากกันและลอยตัวเป็นอิสระ ลักษณะเช่นนี้เรียกว่า จุดเริ่มฟลูอิไดเซชัน (minimum fluidized bed) ถ้าเม็ดของแข็งที่ลอยตัวเป็นอิสระแต่ยังคงมีลักษณะเป็นกลุ่มอยู่ เรียกว่า ฟลูอิไดซ์เบดแบบหนาแน่น (Dense-phase fluidized bed) ถ้าเพิ่มความเร็วของของไหลนี้ขึ้นอีกจนของไหลเกือบจะพาเม็ดของแข็งออกจากหอทดลอง เบดลักษณะนี้เราเรียกว่า ฟลูอิไดซ์เบดเจือจาง (Diluted-phase fluidized bed) และถ้าเพิ่มความเร็วจนถึงความเร็วสุดท้ายของฟลูอิไดเซชัน เม็ดของแข็งจะถูกพัดพาออกจากเบดติดไปกับของไหล จะกลายเป็นการขนส่งอนุภาค ถ้าของไหลเป็นอากาศ เรียกว่า การขนส่งอนุภาคด้วยอากาศ (Pneumatic transport) เช่น การลำเลียงปูนผง

3.2.2 ฟลูอิไดซ์เบดกับการอบแห้ง[12]

ฟลูอิไดซ์เบด จะเกิดขึ้นได้โดยอาศัยปัจจัยหลายอย่างมาผสมผสานกัน ให้เกิดความพอเหมาะขึ้นในเบด เบดนั้นจึงจะเกิดมีคุณสมบัติคล้ายของไหลได้ ปัจจัยที่สำคัญในลำดับแรก คือ ความเร็วของของไหลดังกล่าวมาแล้ว ความเร็วของของไหลที่ค่อย ๆ เพิ่มทีละน้อยนั้น ในระยะแรกเบดยังคงนิ่งอยู่ ความดันตกก็จะเพิ่มไปพร้อมกับความเร็วของไหล จนกระทั่งถึงระดับหนึ่ง เมื่อเม็ดของแข็งเริ่มขยับและแยกตัวอิสระ ความดันตกของเบดก็ไม่เพิ่มต่อไป ไม่ว่าเราเพิ่มความเร็วให้กับของไหลเท่าไรก็ตาม เบดในช่วงนี้ เราเรียกว่า ฟลูอิไดซ์เบด

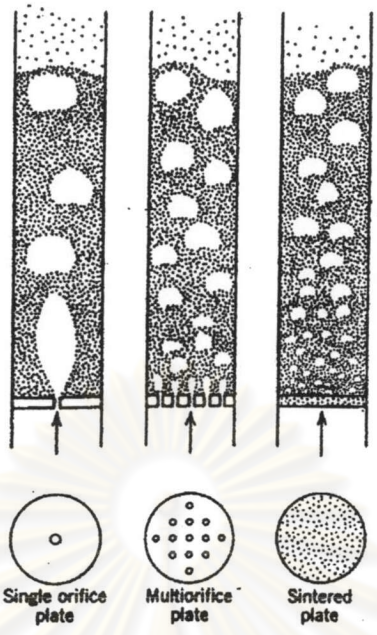
แม้ว่าตัววัสดุที่นำมาอบแห้งจะมีรูปร่างแตกต่างออกไป ลักษณะเบดหรือความสัมพันธ์ของความดันตกของเบด กับความเร็วก็มีผลเหมือนเดิม คือในช่วงที่เป็นฟลูอิไดซ์เบด จะมี

ค่าความดันตกคงที่ เพราะค่าความดันตกในขณะนั้นจะมีตัวเลขใกล้เคียงกับอัตราส่วนของน้ำหนักของเม็ดของแข็งที่บรรจุอยู่ต่อพื้นที่ภาคตัดขวางของหอทดลอง รูปที่ 3.6 แสดงผลจากงานวิจัยของ สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ[12] กับเมล็ดถั่วเขียวที่มีความชื้นร้อยละ 12 และเมล็ดข้าวโพดที่มีความชื้นร้อยละ 13 ขณะที่เบดเริ่มเกิดเป็นฟลูอิไดซ์เบด เม็ดของแข็งก็เริ่มขยับตัวจัดระเบียบของตัวเองให้อยู่ในแนวเดียวกัน หรือจัดเรียงเม็ดต่อเม็ดอย่างสวยงาม จากนั้นแต่ละเม็ดก็ค่อย ๆ แยกห่างออกไปเป็นอิสระตามความเร็วของของไหลที่เพิ่มขึ้น ความเร็วของของไหลที่ทำให้เบดเริ่มขยับตัวหรือเริ่มจัดตัวเองนี้ (ในขณะเดียวกัน ความดันตกเริ่มคงที่) ความเร็วจำนวนนี้เราเรียกว่า ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิไดเซชัน โดยจากการทดลองดังรูป ได้ค่าความเร็วต่ำสุดของอากาศมีค่าประมาณ 41.7 m^3/hr เมื่อทดลองกับเมล็ดถั่วเขียว และเท่ากับ 36.6 m^3/hr เมื่อทดลองกับเมล็ดข้าวโพด



รูป 3.6 ผลการทดลองที่ใช้เมล็ดข้าวโพดและเมล็ดถั่วเขียว[12]

ตัวแปรที่สำคัญอีกตัวหนึ่งคือ ตัวกระจายของไหล (Distributor) เป็นชิ้นส่วนที่มีหน้าที่ทำให้ของไหลมีความเร็วสม่ำเสมอตลอดพื้นที่ภาคตัดขวางของหอทดลอง (Homogeneity section) ซึ่งตัวกระจายของไหลที่ดีจะไม่ทำให้เกิดฟองก๊าซในเบด ถ้าออกแบบตัวกระจายของไหลไม่เหมาะสมกับเบดที่ใช้แล้ว จะเกิดการไหลเป็นช่อง (Channelling) ดังแสดงในรูปที่ 3.7 ปรากฏการณ์เช่นนี้มักเกิดในฟลูอิไดเซชันที่ใช้ก๊าซเป็นของไหล



รูป 3.7 ลักษณะฟองก๊าซที่เกิดขึ้น[12]

พฤติกรรมของการเกิดฟลูอิไดเซชันมักมีตัวแปรต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อการออกแบบอย่างมาก เพราะก่อนที่เม็ดของแข็งจะเริ่มขยับตัวหรือเกิดฟลูอิไดซ์เบด เม็ดของแข็งจะพักอยู่บนตะแกรงรองรับ ปล่อยให้ของไหลไหลผ่านไปตามช่องว่างที่อยู่ในเบด ความเร็วของของไหลจึงมีอิทธิพลต่อการเกิดฟลูอิไดเซชันเป็นอย่างมาก ซึ่งปัจจัยต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อการเกิดฟลูอิไดซ์เบดมีดังนี้

3.2.2.1 ช่องว่างภายในเบด (Voidage)

เม็ดของแข็งที่บรรจุอยู่ในเบด ไม่ว่าจะบรรจุอย่างเป็นระเบียบหรือแบบไม่เป็นระเบียบ (Random packing) ก็ย่อมเกิดช่องว่างระหว่างเม็ดของแข็งขึ้นเสมอ จะมีขนาดมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับคุณลักษณะและขนาดของแข็งที่ใช้ เม็ดของแข็งที่ผิวราบเรียบก็ไม่ค่อยจะมีปัญหา แต่ถ้าเม็ดของแข็งนั้นมีรูพรุน (Pore) อยู่ภายในเม็ดด้วยแล้ว การหาช่องว่างแท้จริงย่อมกระทำได้ยาก เพราะขนาดรูพรุนมีขนาดเล็กมาก วัดได้เป็นหน่วยของไมครอน (Micron) การคำนวณค่าของช่องว่างภายในเบดนั้น ถ้าเม็ดของแข็งมีรูปร่างเป็นทรงกลมขนาดสม่ำเสมอ เราสามารถคำนวณหาช่องว่างระหว่างเม็ดทรงกลมเหล่านี้ได้ด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ ลักษณะการเรียงตัวของเม็ดทรงกลมในเบด ทำให้เกิดขนาดของช่องว่างมีขนาดแตกต่างกันออกไป

สำหรับวัสดุที่ไม่ใช่เป็นทรงกลม อาจเป็นวัสดุที่มีรูปร่างไม่แน่นอนหรือรูปร่างแปลก ๆ ต่างกันออกไป การหาสัดส่วนช่องว่างที่เกิดขึ้นภายในเบดก็เปลี่ยนแปลงไปตามรูปร่างและขนาดของวัสดุที่ใช้บรรจุลงในหอทดลอง หรือแม้แต่การบรรจุที่เป็นระเบียบกับแบบไม่เป็นระเบียบ ก็จะมีช่องว่างไม่เท่ากัน วัสดุที่มีรูอยู่ในเม็ดของแข็ง มีค่าช่องว่างน้อยมาก การศึกษาการไหลของของไหล ช่องว่างในรูพรุนจะไม่มีอิทธิพลอะไรเลย แต่ถ้าศึกษาการถ่ายเทมวลสารแล้วช่องว่างในรูพรุนเป็นตัวแปรที่สำคัญไม่น้อยทีเดียว จะเป็นตัวควบคุมที่จะทำให้เกิดการดูดซับและดูดซึมเกิดขึ้น

3.2.2.2 ความเร็วต่ำสุดของของไหลที่เริ่มเกิดฟลูอิไดเซชัน (U_{MF})

การที่มีเม็ดของแข็งจำนวนมากภายในเบด ทำให้เกิดแรงต้านการไหลของของไหล เมื่อความเร็วของของไหลเพิ่ม แรงต้านการไหลก็จะเพิ่ม และเม็ดของแข็งจะเรียงตัวเองให้มีแรงต้านต่ำสุด จากนั้นแต่ละเม็ดก็ค่อย ๆ แยกห่างออกไปเป็นอิสระตามความเร็วของของไหลที่เพิ่มขึ้น ความเร็วของของไหลที่ทำให้เบดเริ่มขยับตัวนี้ (ในขณะเดียวกัน ความดันตกเริ่มคงที่) เราเรียกว่า "ความเร็วต่ำสุดของของไหลที่เริ่มเกิดฟลูอิไดเซชัน" สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ที่แสดงโดย Kunii and Levenspiel[15] ดังนี้

$$\frac{1.75}{\phi_s \varepsilon_{mf}^3}\left[\frac{d_p U_{mf} \rho_f}{\mu}\right] + \frac{150(1-\varepsilon_{mf})}{\phi_s^3 \varepsilon_{mf}^3}\left[\frac{d_p U_{mf} \rho_f}{\mu}\right] = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_p - \rho_f) \cdot g}{\mu^2} \qquad (3.4)$$

โดยที่ U_{mf} คือ ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิไดเซชัน, m/s

ε_{mf} คือ สัดส่วนช่องว่างต่ำสุด

ϕ_s คือ แฟคเตอร์รูปร่าง

d_p คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค, m

g คือ อัตราเร่งที่เกิดจากแรงดึงดูดของโลก, m/s^2

ρ_p คือ ความหนาแน่นของอนุภาค, kg/m^3

ρ_f คือ ความหนาแน่นของอากาศ, kg/m^3

μ คือ ความหนืดของอากาศ, $N.S/m^2$

3.2.2.3 ค่าความดันตก (Pressure drop) ในฟลูอิไดซ์เบด

ในขณะที่เม็ดของแข็งเริ่มลอยตัวเป็นอิสระอยู่นั้น อาจกล่าวอีกอย่างหนึ่งได้ว่า เม็ดของแข็งอยู่ในสภาวะสมดุลของแรง 2 แรงที่เกิดขึ้นบนเม็ดของแข็ง คือ แรงที่เกิดจากน้ำหนักของตัวเม็ดของแข็งเองกับแรงพยุงจากของไหลหรือเกิดจากแรงเสียดทานกับแรงต้านของของไหล

แรงพยุง (แรงเสียดทาน + แรงต้าน) = น้ำหนักของอนุภาค (3.5)

ซึ่งเราอาจเรียกได้ว่า ค่าความดันตกต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิไดเซชั่นคือ

$$\Delta P.A = W = (A.L_{MF})(1-\varepsilon_{MF})(\rho_P - \rho_f).g \quad (3.6)$$

$$\frac{\Delta P}{L_{MF}} = (1-\varepsilon_{MF})(\rho_P - \rho_f).g \quad (3.7)$$

โดยที่ A คือ พื้นที่หน้าตัดของเบด , m^2

ΔP คือ ความดันต่างของเบด, N/m^2

W คือ น้ำหนักของวัสดุ, N

L_{MF} คือ ความสูงของเบดเมื่อเกิดฟลูอิไดซ์เบด, m

3.2.3 ลักษณะฟองก๊าซ

ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะที่แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของของแข็ง ความเร็วของก๊าซ และแผ่นกระจายของไหล ลักษณะของฟองก๊าซอาจแบ่งได้ดังนี้

1. Channelling เกิดการผ่านของก๊าซเป็นช่อง ๆ โดยที่อนุภาคของแข็งอยู่ตรงทางผ่านของก๊าซเท่านั้นที่เคลื่อนที่ แต่บริเวณด้านข้างจะอยู่กับที่ไม่เคลื่อนที่

2. Bubbling อนุภาคของแข็งในฟลูอิไดซ์เบดจะเคลื่อนที่ตลอดเวลาและสม่ำเสมอในเบด แต่ถ้าหากบริเวณใดมีอนุภาคของแข็งอยู่น้อย เมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณอื่นหรือไม่มีเลย เราเรียกบริเวณนั้นว่า Bubbling

3. Slugging การเกิดฟองก๊าซหรือการรวมตัวของฟองก๊าซ จนได้ฟองก๊าซที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ column มีการแยกตัวของอนุภาคของแข็งเป็นชั้น ๆ ทำให้การถ่ายเท

มวลสาร หรือความร้อนเกิดได้ไม่ทั่วถึง เนื่องจากอนุภาคของแข็งสัมผัสกับก๊าซเป็นเวลาอันสั้นหรือไม่สัมผัสเลยในบางส่วน

4. Spouted bed การที่ก๊าซไหลผ่านเฉพาะบริเวณตรงกลางของกลุ่มของของแข็งเท่านั้นด้วยความเร็วสูงมาก ทำให้บริเวณตรงกลางมีความหนาแน่นของอนุภาคของของแข็งน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณด้านข้าง ลักษณะการไหลแบบนี้คล้ายกับน้ำพุ

3.2.4 <u>ข้อได้เปรียบและเสียเปรียบของฟลูอิไดเซชันกับเบดนิ่ง</u>

การเปรียบเทียบการได้เปรียบและเสียเปรียบระหว่างการใช้เทคนิคฟลูอิไดซ์เบดกับการอบแห้งแบบเบดนิ่งที่ไม่มีการขยับตัวของวัสดุ มีรายระเอียดดังต่อไปนี้

<u>ข้อได้เปรียบ</u>

1. เนื่องจากเม็ดของแข็งเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา ทำให้เกิดการผสมกันได้รวดเร็วและสม่ำเสมอ อุณหภูมิภายในเบดคงที่ตลอด ซึ่งต่างจากเบดนิ่งหรือเบดบรรจุ อุณหภูมิจะไม่เท่ากันตลอดทั้งเบด

2. มีการจัดเรียงตัวของเม็ดของแข็ง เม็ดที่มีความหนาแน่นจะอยู่ส่วนบน เม็ดที่มีน้ำหนักมากจะอยู่ส่วนล่าง ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการแยกขนาดของเม็ดของแข็งได้ นอกจากนี้แรงเสียดทานต่อการไหลของของไหลมีน้อยกว่ามาก

3. จากคุณสมบัติที่คล้ายกับของไหล จึงสามารถทำงานแบบต่อเนื่องได้ คือ ปล่อยให้ของแข็งไหลออกจากเบด และไหลเติมเข้าไปในเบดได้ การควบคุมก็จะทำได้ง่าย

4. การที่เม็ดของแข็งไหลหมุนเวียนอยู่ภายในเบด เม็ดของแข็งนี้สามารถที่จะเป็นตัวนำความร้อนจากผนังแหล่งความร้อนให้กับของไหลได้มากกว่า เพราะสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนได้สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบที่ความเร็วไหลอันเดียวกัน ฟลูอิไดซ์เบดจึงเหมาะสมกับขบวนการที่มีปฏิกิริยาที่ให้ความร้อน หรือดูดความร้อนจำนวนมาก ๆ

5. พื้นที่สัมผัสระหว่างเม็ดของแข็งกับของไหลจะมีมากกว่าแบบเบดนิ่ง เมื่อเปรียบเทียบกับเบดนิ่งที่ใช้จำพวกเม็ดของแข็ง จึงมีประโยชน์ในการขยายงานที่มีทั้งการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทของเหลว

6. สามารถใช้ในการขนส่งเม็ดของแข็งจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งได้

ข้อเสียเปรียบ

1. เวลาของไหลสัมผัสกับเม็ดของแข็งสั้นมาก จึงต้องใช้เบดสูง ๆ หรือเบดหลายชั้น

2. มักเกิดโพรงอากาศในเบดเมื่อทำงานกับก๊าซ ทำให้การสัมผัสไม่ดี เป็นการสูญเปล่า ถ้ายิ่งเป็นขบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมี และต้องใช้ตัวเร่งช่วยแล้ว ทำให้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงลดลง

3. การทำงานมีข้อจำกัด เพราะถ้าใช้ความเร็วของของไหลสูงเกินไป เม็ดของแข็งก็จะออกจากเบดไปพร้อมกับของไหล

4. ใช้กับเม็ดของแข็งที่เปียกหรือมีลักษณะเป็นยางไม่ได้ เพราะจะเกิดการเกาะเป็นก้อนใหญ่และตกตะกอนมายังส่วนล่างของเบด

5. ต้องใช้พลังงานในการขับเคลื่อนของไหลและจะยิ่งใช้มากขึ้น เมื่อความสูงของเบดมากขึ้น

3.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การอบแห้งเมล็ดพืชโดยส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ทำให้การเคลื่อนที่ของน้ำภายในเนื้อวัสดุโดยส่วนใหญ่อยู่ในรูปของเหลว ซึ่งเป็นผลมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น จากลักษณะปรากฏการณ์ดังกล่าว ได้มีการนำแบบจำลองในทางทฤษฎีมาอธิบายการแพร่ที่เกิดขึ้นภายในเนื้อวัสดุ เช่น สมการการแพร่ของวัสดุมีลักษณะเป็นทรงกลมหรืออื่น ๆ เป็นต้น เนื่องจากสมการอบแห้งในทางทฤษฎีอธิบายผลการทดลองได้ไม่ถูกต้องนัก จึงได้มีการ เสนอสมการขึ้นใหม่เพื่อให้ทำนายความชื้นของวัสดุหลังอบแห้งได้ถูกต้องขึ้น โดยจะอยู่ในรูปของสมการอัตราส่วนความชื้นถดถอย (moisture ratio, dimensionless) ดังนี้

$$MR = \frac{M(t) - M_e}{M_{in} - M_e} \qquad (3.8)$$

โดยที่ MR คือ อัตราส่วนความชื้น , ไร้หน่วย

t คือ เวลาอบแห้ง, นาที

M(t) คือ ความชื้นที่เวลา t, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง

M_e คือ ความชื้นสมดุล , เศษส่วนมาตรฐานแห้ง

M_{in} คือ ความชื้นเริ่มต้น, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง

แบบจำลองลอการึทิมมิค (Exponential model) เป็นแบบจำลองหนึ่งที่ใช้อธิบายอัตราการอบแห้ง โดยมีสมมติฐานของแบบจำลองว่า อัตราการลดลงของความชื้นผลิตภัณฑ์แปรโดยตรงกับความแตกต่างของความชื้นของผลิตภัณฑ์และความชื้นสมดุลซึ่งคล้ายกับกฎการเย็นตัวของ Newton รูปสมการเป็นดังนี้

$$MR = \exp(-kt) \tag{3.9}$$

โดยที่ k คือ ค่าคงที่ของการอบแห้ง

t คือ เวลา ,นาที

แบบจำลองของ Page[13] เป็นสมการอบแห้งเอมไพริเคิลที่ปรับปรุงมาจากสมการที่ (3.9) โดยมีรูปสมการดังนี้

$$MR = \exp(-xt^y) \tag{3.10}$$

โดยวิชัย เพชรดาษดา[1] พบว่า ค่า x,y แปรผันต่ออุณหภูมิอากาศก่อนเข้าเบดและอัตราการไหลจำเพาะของอากาศ(SP) ซึ่งอัตราการไหลจำเพาะของอากาศเป็นสัดส่วนของอัตราการไหลมวลอากาศต่อน้ำหนักของวัสดุแห้ง

Wang and Singh[14] พบว่าสมการ exponential เทอมเดียวเป็นสมการอบแห้งเอมไพริเคิลที่ใช้อธิบายการอบแห้งข้าวเปลือกความยาวปานกลางได้ดี โดยมีรูปสมการดังนี้

$$MR = x \exp(-yt) \tag{3.11}$$

โดยที่ x,y เป็นค่าคงที่ของการอบแห้งที่ได้จากการทดลอง

สมการ exponential สองเทอม เป็นสมการอบแห้งเอมไพริเคิลสองเทอมมีรูปแบบสมการดังนี้

$$MR = x_1 \exp(-y_1 t) + x_2 \exp(-y_2 t) \tag{3.12}$$

โดยที่ x_1, x_2, y_1, y_2 เป็นค่าคงที่ของการอบแห้งที่ได้จากการทดลอง พบว่า ค่าคงที่ของการอบแห้ง k_1, k_2 ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความสูงเบด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากที่กล่าวมาข้างต้น โดยเฉพาะกับการอบแห้งเมล็ดพืชโดยวิธีฟลูอิไดซ์เบด ค่าคงที่ของการอบแห้งมักขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของอากาศก่อนไหลเข้าเบดและความสูงเบด เมื่อเบดมีความสูงมากจะส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงของสภาวะของอากาศขณะไหลในเบดได้อย่างชัดเจน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้ขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของอากาศต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ดังนั้นค่าคงที่ของการอบแห้งจึงไม่น่าจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของอากาศก่อนไหลเข้าเบดและความสูงเบดเท่านั้น แต่ควรขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของอากาศต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ด้วย ซึ่งตัวแปรหลังสุดนี้สามารถรวมเข้ากับความสูงเบดเกิดเป็นตัวแปรตัวใหม่เรียกว่า อัตราการไหลจำเพาะของอากาศ(SP) ซึ่งหมายถึง อัตราส่วนของอัตราการไหลของอากาศต่อหนึ่งหน่วยมวลแห้งของเมล็ดพืช

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย