หอสมุดกลาง ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2
วารสารปริทัศน์

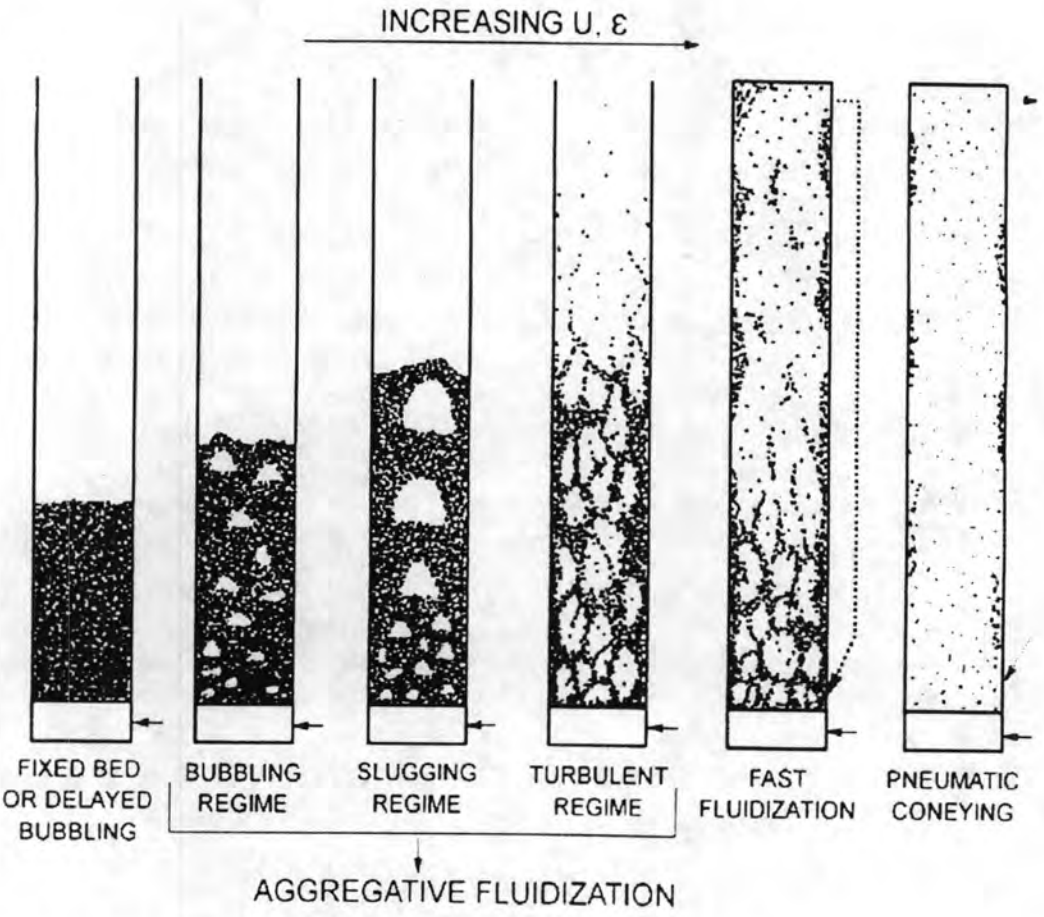
2.1 ฟลูอิไดเซชัน

เทคนิคฟลูอิไดเซชัน เป็นเทคนิคที่ได้รับความสนใจจากวงการอุตสาหกรรมเป็นอย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นระบบที่สามารถตอบสนองความต้องการทางด้านอุตสาหกรรมในการลดต้นทุนการผลิตและทำให้กระบวนการผลิตมีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น เครื่องมือฟลูอิไดซ์เบดที่ใช้ในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่จึงได้ถูกสร้างขึ้น และพัฒนาอย่างรวดเร็วทั้งในยุโรปและอเมริกา (เชิดชัย และคณะ, 2533) ยกตัวอย่างเช่น เตาเผาฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียน หรือเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดเซชัน เป็นต้น

เบด (Bed) หมายถึง อาณาเขตในหอการทดลองที่มีปริมาณเม็ดของแข็งบรรจุอยู่ไม่ว่าของแข็งนั้นจะอยู่นิ่งหรือเคลื่อนไหวด้วยของไหลภายในหอทดลอง จะมีระดับตั้งแต่แผ่นโลหะทำเป็นตะแกรงรองรับหรือเป็นตัวกระจายอากาศ (Gas Distributor) จนถึงระดับสูงสุดหรือผิวหน้าของเม็ดเบด

ฟลูอิไดเซชัน คือ ปรากฏการณ์ที่ทำให้ของแข็งประพฤติตัวคล้ายของไหล เนื่องจากการสัมผัสกันของของแข็งกับของไหล ซึ่งได้แก่อากาศหรือของเหลว โดยการสัมผัสกับของไหลแต่ละชนิดจะส่งผลต่อลักษณะของฟลูอิไดเซชัน คือ ฟลูอิไดซ์เบดที่เป็นของเหลวการขยายตัวของเบดเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ การลอยตัวและการหมุนรอบตัวเป็นไปอย่างช้าๆ เรียกเบดแบบนี้ว่า เบดสม่ำเสมอ หรือเบดที่เป็นเนื้อเดียวกัน สำหรับฟลูอิไดซ์เบดที่ของไหลเป็นอากาศลักษณะเบดที่เกิดขึ้นจะแตกต่างจากที่เป็นของเหลวมากเพราะว่าเมื่อความเร็วของอากาศสูงกว่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิไดซ์เบดแล้ว อากาศส่วนหนึ่งยังทำหน้าที่ให้เกิดการลอยตัวของเม็ดของแข็ง แต่อีกส่วนหนึ่งรวมตัวกันแล้วก่อตัวกันเป็นฟองอากาศขึ้น ฟองอากาศก็จะแทรกตัวขึ้นมายังบริเวณผิวหน้าของเบดและแตกตัวในที่สุด แต่ขณะที่ฟองอากาศลอยขึ้นมานี้จะทำให้เม็ดของแข็งลอยติดตามฟองอากาศขึ้นมาด้วย เม็ดของแข็งภายในเบดจึงมีการเคลื่อนที่เป็นไปอย่างซุลมุนวุ่นวาย

ลักษณะของฟลูอิไดซ์เบดที่เกิดเนื่องจากการสัมผัสกันระหว่างอากาศและของแข็งมีความสลับซับซ้อน โดยเมื่อมีของแข็งวางบนตัวกระจายอากาศ (Air distribution) และมีอากาศเคลื่อนที่ผ่าน และค่อยๆ เพิ่มความเร็วอากาศทำให้เกิดปรากฏการณ์ต่างๆ ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งสามารถจำแนกขอบเขตของฟลูอิไดเซชันได้ดังนี้



รูปที่ 2.1 รูปแบบการไหลในระบบฟลูอิไดเซชันระหว่างอากาศ-ของแข็ง (Grace J.R. 1997)

เมื่ออากาศไหลผ่านของแข็งขึ้นมาด้วยความเร็วต่ำ ของแข็งที่วางตัวอยู่บนตัวกระจายอากาศจะอยู่นิ่งไม่เคลื่อนไหว อากาศจะไหลผ่านไปตามช่องว่างของของแข็งที่มีอยู่ในเบด หรือเบดอาจมีการเคลื่อนที่สัมพัทธ์กับผนังแต่ของแข็งในเบดไม่มีการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ต่อกัน กรณีนี้เรียกว่าเบดนิ่ง (Fixed Bed) เมื่ออากาศเคลื่อนที่ผ่านของแข็งที่วางนิ่ง จะเกิดแรงเนื่องจากการไหลของของไหลที่กระทำต่อของแข็งในทิศเดียวกับทิศทางการไหล เรียกแรงนี้ว่าแรงเสียดทานเนื่องจากการไหล (Drag Force) ซึ่งจะก่อให้เกิดความดันลด (Pressure Drop) ตกคร่อมเบดไว้ ความดันลดตกคร่อมเบดตลอดความสูงของเบดนิ่งที่เกิดขึ้น จะเพิ่มตามความเร็วของอากาศที่เพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วอากาศที่เคลื่อนที่ผ่านเบดนิ่งเพิ่มขึ้นจนถึงความเร็วค่าหนึ่ง ของแข็งเริ่มเกิดการเคลื่อนที่ขึ้น ซึ่งความเร็วจุดนี้เรียกว่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิไดเซชัน (Minimum Fluidization Velocity; U_{mf}) และเรียกเบด ณ จุดนี้ว่า Minimum Fluidized Bed ซึ่งเป็นจุดแรกที่ของแข็งประพฤติตัวคล้ายกับของไหล โดยเมื่อความเร็วอากาศเพิ่มขึ้นจนทำให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็กจำนวนมากทางด้านล่างของเบด เรียกเบดที่สภาวะนี้ว่าเบดแบบฟองอากาศ (Bubbling bed) และเรียกความเร็วนี้ว่าความเร็วเริ่มต้นของการเกิดฟอง (Minimum bubbling velocity, U_{mb}) ซึ่ง

ความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟองขึ้นอยู่กับสมบัติของของแข็งเป็นอย่างมาก โดยของแข็งที่จัดอยู่ใน Geldart กลุ่ม A จะมีความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟองอากาศสูงกว่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิไดเซชัน แต่ของแข็งที่จัดอยู่ใน Geldart กลุ่ม B และ D (อธิบายข้อมูลเกี่ยวกับการจำแนกของแข็งในหัวข้อที่ 2.3) จะมีความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟองอากาศเท่ากับความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิไดเซชัน ดังนั้นรูปแบบการเกิดฟลูอิไดเซชันแบบสม่ำเสมอ หรือแบบไม่มีฟองอากาศ (Bubble-free Fluidization) จึงเกิดเฉพาะในกรณีที่อนุภาคของแข็งที่อยู่ใน Geldart กลุ่ม A เท่านั้น

สำหรับความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิไดเซชัน สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

- $Re_p < 20$ $$U_{mf} = \frac{(\phi d_p)^2}{150} \cdot \frac{(\rho_s - \rho_g)}{\mu} g \left(\frac{\varepsilon_{mf}^3}{1-\varepsilon_{mf}} \right) = \frac{d_p^2 (\rho_s - \rho_g) g}{1650 \mu} \quad (2.1)$$

- $Re_p > 1{,}000$ $$U_{mf} = \frac{\phi d_p}{1.75} \cdot \frac{(\rho_s - \rho_g)}{\rho_g} g \varepsilon_{mf}^3 = \frac{d_p (\rho_s - \rho_g) g}{24.5 \rho_g} \quad (2.2)$$

ส่วนบริเวณที่อยู่เหนือเบดขึ้นไป ซึ่งฟองอากาศจะเกิดการแตกตัวและของแข็งที่ติดไปกับฟองอากาศจะตกลงมายังเบดอีกครั้งด้วยผลของแรงโน้มถ่วง เรียกว่าบริเวณอิสระ (Freeboard) อย่างไรก็ตามอาจจะมีของแข็งบางส่วนที่มีปริมาณน้อยมาก ซึ่งมีขนาดเล็กถูกพัดพาเคลื่อนที่ไปกับอากาศด้วยทำให้ไม่ตกย้อนกลับลงมาในเบดอีก ณ ความสูงค่าหนึ่งใน Freeboard ซึ่งของแข็งเกือบทั้งหมดตกกลับลงมายังเบดจะเรียกความสูงนี้ว่า ความสูงหลุดลอยส่งผ่าน หรือ Transport Disengaged Height (TDH) เหนือความสูงนี้ไปจะมีของแข็งเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งอาจหลุดไปกับอากาศด้วยอัตราการลอยออกที่สม่ำเสมอ ซึ่งอัตราการเคลื่อนที่ของของแข็งในช่วงนี้จะเรียกว่า Elutriation Rate

เมื่อเพิ่มความเร็วอากาศในเบดแบบฟองอากาศ ฟองอากาศที่เกิดขึ้นจะเกิดการรวมตัวกันและมีขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อฟองอากาศลอยขึ้นมาของแข็งจะถูกฟองอากาศ ผลักขึ้นไปและอนุภาคของแข็งจะตกกลับลงมาอีก ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า สลักกิ้ง (Slugging) เรียกความเร็วอากาศนี้ว่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดสลักกิ้ง (U_{ms}) นอกจากนี้ยังพบว่าขนาดของฟองอากาศจะมีขนาดเพิ่มตามความเร็วของอากาศ และความสูงของเบด ถ้าเบดมีขนาดเล็กหรือแคบและยาว ฟองอากาศที่เกิดขึ้นอาจจะมีขนาดใหญ่เกือบเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางหรือความกว้างของเบด ซึ่งจะทำให้เกิดความแปรปรวนของความดันภายในเบดอย่างมาก เมื่อความเร็วของอากาศที่เคลื่อนที่ผ่านเบดแบบฟองอากาศเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งเริ่มสังเกตเห็นรูปแบบการสัมผัสของของแข็งกับอากาศซึ่งมีการขยายตัวเปลี่ยนแปลงไป ฟองอากาศที่เกิดขึ้นมีการรวมตัวและแตกกระจายออกจากกันอย่างรวดเร็ว จนอาจจะดูเหมือนไม่มีฟองอากาศ เรียกว่า เบดแบบปั่นป่วน (Turbulent Bed) โดย

การเคลื่อนไหวภายในเบดเป็นแบบปั่นป่วนลักษณะภายในเบดจะแบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ Dense Phase ซึ่งเป็นส่วนที่มีของแข็งอยู่หนาแน่น และ Dilute Phase ซึ่งเป็นส่วนที่มีของแข็งอยู่เบาบาง โดยช่วงในการเปลี่ยนจากเบดแบบฟองอากาศเป็นเบดแบบปั่นป่วนไม่ได้เกิดขึ้นทันทีทันใดที่ความเร็วอากาศค่าหนึ่ง แต่จะมีช่วงความเร็วอากาศในการเปลี่ยนภาวะทั้งสองนี้ จากผลการวิจัยของนักวิจัยหลายๆ ท่านพบว่า การเปลี่ยนจากขอบเขตเบดแบบฟองอากาศไปเป็นเบดแบบปั่นป่วนนั้นจะมีช่วงการเปลี่ยน โดยเมื่อค่อยๆ เพิ่มความเร็วอากาศจนถึงค่าๆ หนึ่ง เบดซึ่งเดิมอยู่ในภาวะเบดแบบฟองอากาศนั้น ที่บริเวณผิวหน้าเบดจะเริ่มเปลี่ยนไปเป็นเบดแบบปั่นป่วน ซึ่งเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์

Terminal Velocity, U_t คือ ความเร็วตกอิสระของของแข็งในของไหลที่อยู่นิ่ง ซึ่งความเร็วนี้จะมีค่าเท่ากับความเร็วของไหลที่ทำให้เม็ดของแข็งเคลื่อนตัวหลุดออกจากหอทดลองไป โดยค่า Terminal Velocity สามารถหาได้จากสมการของ Haider และ Levenspiel (Kunii D และคณะ, 1969) โดยแบ่งออกเป็น 2 กรณี ตามรูปร่างของของแข็ง

- กรณีของแข็งมีรูปร่างเป็นทรงกลม (Kunii D. และคณะ,1991)

$$U_{t,spherical} = \frac{g(\rho_s - \rho_g)d_p^2}{18\mu} \qquad \text{เมื่อ Rep < 0.4} \qquad 2.3$$

$$U_{t,spherical} = \left[\frac{4}{225}\frac{(\rho_s - \rho_g)^2 g^2}{\rho_g \mu}\right]^{1/3} d_p \qquad \text{เมื่อ 0.4 < Rep < 500} \qquad 2.4$$

$$U_{t,spherical} = \left[\frac{3.1g(\rho_s - \rho_g)d_p}{\rho_g}\right]^{1/2} \qquad \text{เมื่อ 500 < Rep < 20,000} \qquad 2.5$$

- กรณีของแข็งไม่เป็นทรงกลม

$$U_t^* = \left[\frac{18}{(d_p^*)^2} + \frac{2.335 - 1.744\phi}{(d_p^*)^{1/2}}\right]^{-1} \qquad 2.6$$

โดยที่

$$U_t^* = U_t\left[\frac{\rho_g^2}{\mu(\rho_s - \rho_g)g}\right]^{1/3} \qquad 2.7$$

$$d_p^* = d_p\left[\frac{\rho_g(\rho_s - \rho_g)g}{\mu^2}\right]^{1/3} \qquad 2.8$$

เมื่อเพิ่มความเร็วอากาศในเบดแบบปั่นป่วนจนกระทั่งไม่สามารถระบุผิวด้านบนของเบดได้ เรียกเบดสภาวะนี้ว่า เบดที่ความเร็วสูง (Fast Bed) หรือฟลูอิไดซ์เซชันที่ความเร็วสูง (Fast Fluidization) โดยความเร็วอากาศต่ำสุดที่ทำให้เบดเปลี่ยนจากเบดแบบปั่นป่วนเป็นฟลูอิไดเซชันที่ความเร็วสูง เรียกความเร็วนี้ว่า Transport Velocity หรือ U_{tr} ในขอบเขตฟลูอิไดเซชันที่ความเร็วสูง มีการเคลื่อนที่ออกของอนุภาคของแข็งทางด้านบนของเบด เพื่อไม่ให้ปริมาณของแข็งในเบดหมดไป จำเป็นต้องเติมอนุภาคของแข็งเข้ามาแทนที่โดยการใส่เข้ามาใกล้ๆ ส่วนล่างของเบด ของแข็งจะรวมตัวกันเป็นกลุ่มและเคลื่อนที่ลงบริเวณใกล้ๆ ผนังของเบด โดยที่อากาศและของแข็งที่กระจายตัวอยู่ด้านในจะเคลื่อนที่ขึ้น ในขณะที่อัตราการไหลป้อนของแข็งคงที่ที่ความเร็วอากาศเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณของแข็งในเบดเจือจางมากขึ้น ในภาวะที่เบดเป็นฟลูอิไดเซชันที่ความเร็วสูง ถ้านำเอาของแข็งที่หลุดออกจากเบดกลับเข้ามาในระบบใหม่ตรงบริเวณส่วนล่างของเบด ระบบแบบนี้จะเรียกว่า ฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียน (Circulating fluidized bed, CFB)

เมื่อความเร็วอากาศเพิ่มขึ้นจนมากกว่า U_{tr} พบว่าความหนาแน่นของแข็งภายในเบดเบาบางมากเนื่องจากความเร็วของอากาศเพิ่มขึ้นมากจนเกิดเป็นการขนส่งของแข็งด้วยอากาศ ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณของของแข็งในแนวแกนยกเว้นในส่วนล่างที่มีความเร่ง และของแข็งบางส่วนอาจหยุดนิ่งอยู่ใกล้ๆ ผนังของเบด เรียกเบดที่สภาวะนี้ว่า การขนส่งแบบเบดเจือจาง (Dilute phase transport regime) หรือ การขนส่งด้วยอากาศ (Pneumatic conveying) ความเร็วอากาศที่ทำให้เบดในท่อเปลี่ยนจากเบดแบบเจือจางเป็นเบดแบบหนาแน่นเรียกว่า ความเร็วในการเกิดช็อคกิ้ง (Choking Velocity) ค่าความเร็วนี้สามารถหาได้จากการทำการทดลอง โดยการปรับลดความเร็วอากาศในระบบที่เป็นเบดแบบเจือจางและมีปริมาณของแข็งในระบบคงที่ลงจนกระทั่งเบดเกิดการยุบตัวลงอย่างรวดเร็วเปลี่ยนจากเบดเจือจางเป็นเบดหนาแน่นซึ่งความเร็วอากาศที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว คือ ความเร็วในการเกิดช็อคกิ้ง โดยความเร็วช็อคกิ้งแบ่งได้ 3 ชนิด ได้แก่ A, B และ C โดยความเร็วอากาศที่ทำให้เบดเปลี่ยนจากขอบเขตการขนส่งแบบเจือจางเป็นเบดแบบฟลูอิไดเซชันที่ความเร็วสูง เรียกความเร็วอากาศนี้ว่า ความเร็วช็อคกิ้ง ชนิด A (Type A Choking Velocity, V_{CA}) (Bi T.H. 1995) ซึ่งอธิบายรายละเอียดไว้ในหัวข้อที่ 2.3

ดังนั้นสามารถสรุปช่วงของความเร็วอากาศที่ทำให้เกิดขอบเขตฟลูอิไดเซชันต่างๆ ได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ช่วงของความเร็วอากาศในการเกิดขอบเขตฟลูอิไดเซชันต่างๆ

ช่วงความเร็วอากาศ	ขอบเขต
$0<U<U_{mf}$	เบดนิ่ง (Fix bed)
$U_{mf}<U<U_{mb}$	เบดแบบไม่มีฟองอากาศ (Bubble–free fluidzation)
$U_{mb}<U<U_{ms}$	เบดแบบฟองอากาศ (Bubble fluidized bed)
$U_{ms}<U<U_{t}$	เบดแบบสลักกิ้ง (Slugging bed)
$U_{t}<U<U_{tr}$	เบดแบบปั่นป่วน (Turbulent bed)
$U_{tr}<U<V_{CA}$	เบดแบบฟลูอิไดเซชันที่ความเร็วสูง (Fast fluidization)
$U>V_{CA}$	การขนส่งแบบเบดเบาบาง (Dilute phase transport) หรือการขนส่งด้วยอากาศ (Pneumatic conveying)

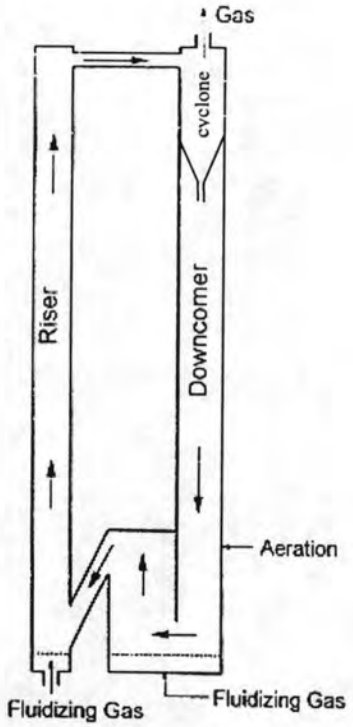
U คือ ความเร็วอากาศตามผิว (Superficial gas veloicy, เมตรต่อวินาที)

V คือ ความเร็วอากาศภายในไรเซอร์ (Gas velocity in riser, เมตรต่อวินาที)

2.2 ฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียน (Circulating Fluidized Bed, CFB)

กระบวนการฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียนเป็นกระบวนการหนึ่งที่เป็นการสัมผัสกันระหว่างอากาศและของแข็ง ซึ่งถูกค้นพบครั้งแรกโดย Winkler และถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมตั้งแต่ปีคริสต์ศักราช 1930 (Xu G. และคณะ, 2000) โดยปัจจุบันได้มีการประยุกต์ใช้กันอย่างกว้างขวางในกระบวนต่างๆ ในอุตสาหกรรม อย่างเช่น กระบวนการเผาไหม้ของถ่านหิน (Coal Combustion), กระบวนผลิตแก๊สจากชีวมวล (Biomass Gasification), กระบวนการแตกตัวของไอน้ำมันหนักด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (Fluid Catalytic Cracking, FCC) และอื่นๆ (Monazam E.R., และคณะ 2005) เนื่องจากเทคนิคฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียนมีข้อดีดังนี้ มีอัตราการถ่ายโอนของมวลและความร้อนระหว่างแก๊สและของแข็งสูง มีการกระจายความร้อนที่สม่ำเสมอ เป็นกระบวนการที่ต่อเนื่อง และสามารถใช้สารตั้งต้นได้หลากหลายชนิด (Wang X. และคณะ, 2005)

ระบบฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียน เป็นระบบซึ่งอาศัยเทคนิคทางฟลูอิไดเซชันมาประยุกต์ใช้งาน โดยระบบจะประกอบไปด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน ดังรูปที่ 2.2



หอสมุดกลาง ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 2.2 ระบบฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียน (Grace, J. R. 1997)

1) ไรเซอร์ (Riser) เป็นส่วนที่เกิดปฏิกิริยาในแต่ละกระบวนการ เช่นเป็นส่วนที่เกิดปฏิกิริยาในกระบวนการเผาไหม้ของถ่านหิน (Coal combustion) หรือเป็นส่วนที่เกิดกระบวนการแตกตัวของไอน้ำมันในกระบวนการแตกตัวของไอน้ำมันหนักด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาของ (Fluid Catalytic Cracking) หรือเป็นส่วนที่เกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชั่นในกระบวนการผลิตแก๊สจากถ่านหินหรือชีวมวล(Coal or Biomass gasification) และอื่นๆ โดยไรเซอร์ทำงานภายใต้สภาวะฟลูอิไดเซชันที่ความเร็วสูง มีลักษณะเป็นท่อสูงประมาณ 5-20 เมตร ในการสร้างส่วนของไรเซอร์สำหรับการเผาไหม้ โดยมักจะพบการกัดกร่อนจากอนุภาคที่มากระทบผนังและความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา จึงมักใช้โลหะทนความร้อน อาทิ เหล็ก หุ้มภายในด้วยอิฐทนไฟเพื่อป้องกันการกัดกร่อนและความร้อน หรือ สร้างจากโลหะผสมจำพวก สแตนเลสสตีล (Stainless steel) แล้วหุ้มภายนอกด้วยฉนวน
2) Gas-solid Separator ทำหน้าที่แยกแก๊สและของแข็งออกจากกัน ซึ่งในระบบฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียนนิยมใช้ไซโคลนในการแยกแก๊สและของแข็งออกจากกัน โดยอาศัยหลักการเหวี่ยง ซึ่งจะใช้แรงเหวี่ยงในแนวรัศมีในการเหวี่ยงอนุภาคของของแข็งให้กระทบกับผนังของไซโคลนแล้วจากนั้นอนุภาคจะเคลื่อนที่ไปสู่ส่วนล่างของไซโคลน เพื่อผ่านท่อป้อนกลับต่อไป ส่วนแก๊สและอนุภาคขนาดเล็กๆ จะถูกแยกออกสู่ด้านบนของไซโคลน

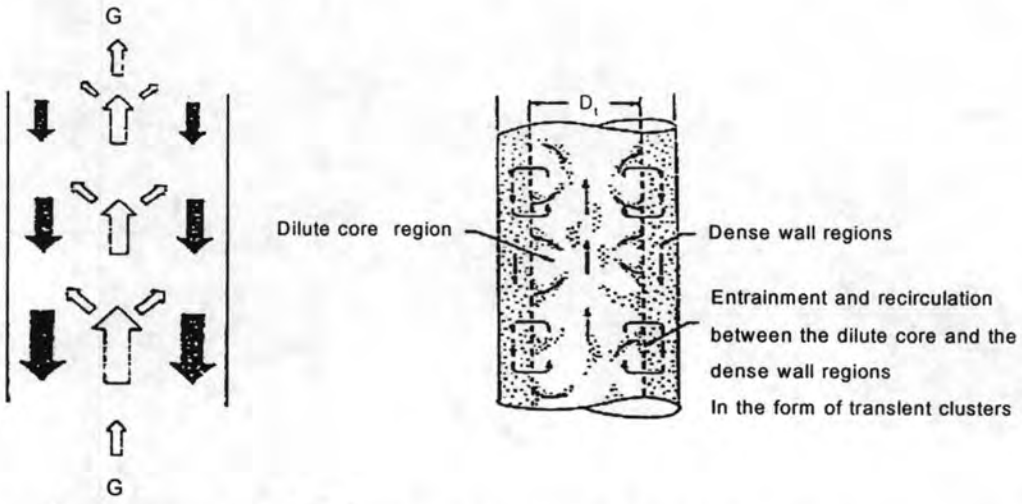
3) ท่อป้อนกลับ (Downcomer) ทำหน้าที่ป้อนกลับของแข็งที่ถูกดักจับจากไซโคลนไปยังด้านล่างของไรเซอร์ โดยในระบบฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียนจะออกแบบท่อป้อนกลับให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับหรือใหญ่กว่าท่อไรเซอร์ เพื่อให้เกิดการหมุนเวียนของของแข็งได้อย่างต่อเนื่อง (เชิดชัย และคณะ, 2533)

ฟลูอิไดเซชันที่ความเร็วสูง เป็นลักษณะหนึ่งของการสัมผัสระหว่างอากาศกับของแข็ง ซึ่งอากาศจะเคลื่อนที่ผ่านกลุ่มของอนุภาคของแข็งที่อยู่เหนือตัวกระจายอากาศ โดยอากาศจะมีความเร็วสูงกว่าความเร็วสุดท้าย (Terminal Velocity) ของอนุภาค ทำให้อนุภาคของแข็งมีการเคลื่อนที่แบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยกัน

1) Cluster phase อนุภาคของแข็งเกาะอยู่ด้วยกันเป็นกลุ่มๆ เคลื่อนที่ขึ้นลง มีการสลายตัวและรวมตัวใหม่ภายในไรเซอร์
2) Disperse phase อนุภาคของแข็งมีเบาบางกระจายกันออกไป (อยู่ห่างกัน) และเคลื่อนที่ขึ้นไปยังท่อป้อนกลับ

อนุภาคของแข็งที่เกาะตัวกันต่อเนื่องและรวมตัวกันเป็นกลุ่มภายใน cluster phase จะเรียกว่า cluster หรือ strand หรือ streamer ซึ่งกระจายตัวอย่างไม่สม่ำเสมอ และเคลื่อนที่ขึ้น ๆ ลง ๆ อยู่ภายใน disperse phase ซึ่งประกอบด้วย แก๊สซึ่งเคลื่อนที่ขึ้นและเม็ดของแข็งเบาบาง (ปริมาณน้อยกว่าใน cluster phase) เคลื่อนที่ไปพร้อมกับแก๊ส

เม็ดของแข็งภายในเบดส่วนใหญ่จะอยู่ใน cluster phase และมีการเคลื่อนที่ขึ้นไปตามแกนกลาง (ขณะที่เคลื่อนที่ขึ้นจะมีขนาดเพิ่มขึ้น) จนเมื่อถึงจุด ๆ หนึ่งก็จะตกกลับลงมาตามผนังของท่อไรเซอร์ เมื่อเคลื่อนที่ตกกลับมาถึงจุด ๆ หนึ่ง cluster ก็จะแตกสลายตัวออกจากกัน และเกิดการเคลื่อนที่ขึ้นไปอีกครั้ง โดยการรวมตัวกันเป็น cluster และการสลายตัวออกจากกันจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ลักษณะการเคลื่อนที่ของ Cluster (Basu P. และคณะ, 1991)

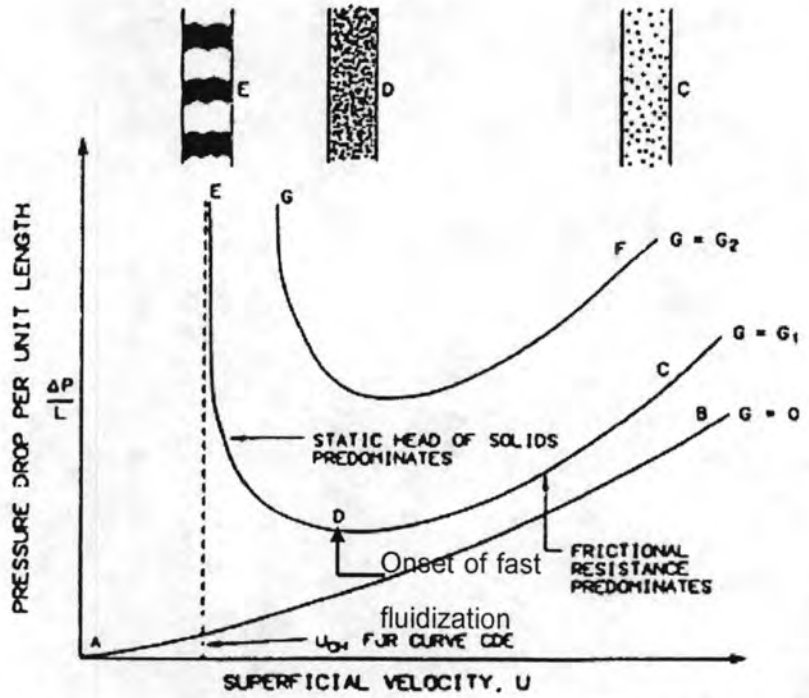
เมื่อพิจารณาลักษณะการเคลื่อนที่สัมผัสกันของอากาศและของแข็ง และความหนาแน่นของของแข็งตลอดความยาวของท่อไรเซอร์ จะเห็นรูปแบบการกระจายตัวแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

1) บริเวณที่ของแข็งเกิดการรวมตัวเป็น Cluster และสลายตัวอยู่ตลอดเวลาจะเกิดที่บริเวณด้านล่างของท่อไรเซอร์ การกระจายตัวหรือความเข้มข้นของของแข็งมีค่าสูง เรียกว่า Dense Bed
2) บริเวณที่ของแข็งมีการกระจายตัวหรือมีความเข้มข้นน้อย ซึ่งเกิดบริเวณด้านบนของท่อไรเซอร์เรียกว่า Dilute Bed

2.2.1 ขอบเขตในระบบฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียน

ระบบฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียนส่วนใหญ่จะทำงานอยู่ในขอบเขตของฟลูอิไดเซชันที่ความเร็วสูง ซึ่งได้มีการศึกษาเพื่อหาคำนิยามของขอบเขตของฟลูอิไดเซชันที่ความเร็วสูง โดย Yerushalmi และ Cankurt ได้นิยามขอบเขตของฟลูอิไดเซชันที่ความเร็วสูง คือ ขอบเขตที่เกิดขึ้นเมื่อความเร็วอากาศมากกว่า Terminal Velocity ที่ต่ำสุด ซึ่งจะไม่เกิดสภาวะช็อคกิ้งเมื่ออัตราการหมุนเวียนของของแข็งเปลี่ยนแปลง ซึ่งคำนิยามนี้มีความคล้ายคลึงกับคำนิยามของ Rhodes และ Geldart ซึ่งได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาขอบเขตการเกิดฟลูอิไดเซชันที่ความเร็วสูง โดยศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ความดันลดคร่อมเบดต่อหนึ่งหน่วยความยาวและความเร็วอากาศและสามารถสรุปผลขอบเขตในการเกิด fast bed แสดงดังรูปที่ 2.4 พบว่าสำหรับการไหลของของผสมอากาศกับของแข็งที่มีความหนาแน่นบัลค์ (Bulk Density) หรือ Suspension Density มีค่าต่ำในแนวดิ่งโดยอัตราการป้อนของแข็งเท่ากับ G_1 เมื่อลดความเร็วอากาศลงจากจุด C ซึ่งเป็นจุดที่มีความเร็วอากาศสูง การกระจายตัวของเม็ดของแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเร็วอากาศที่สูงขึ้น เมื่อลดความเร็วลงจนกระทั่งมีความเร็วเท่ากับจุด D ค่าความดันเนื่องจากน้ำหนักเม็ดของแข็ง Static Head กับความดันลดเนื่องจากแรงเสียดทานในการไหลของของผสม จะมีค่าต่ำที่สุด เรียกจุด D นี้ว่าจุดที่เริ่มเกิดเบดแบบความเร็วสูง, Fast Bed (Onset of Fast Fluidization) หรือจุดที่เปลี่ยนจากเบดแบบส่งผ่าน (Pneumatic Transport) ไปเป็นเบดแบบความเร็วสูง (Fast Bed) เมื่อความเร็วอากาศยังคงลดลงต่อไป (จากจุด D ไป E) การกระจายตัวของเม็ดของแข็งลดลงมีความหนาแน่นมากขึ้นทำให้ความดันลดรวมมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วอากาศลดลงจนถึงค่าหนึ่ง (ที่จุด E) อากาศจะไม่สามารถพัดพาของแข็งออกไปจากคอลัมน์ได้อีก ของแข็งเริ่มที่จะสะสมตัวอยู่ในคอลัมน์ ทำให้ความดันลดมีค่าเพิ่มขึ้นสูงมากดังในรูปที่ 2.4 ดังนั้นที่จุด E จึงเป็นจุดที่เปลี่ยนจากภาวะ Fast Bed ไปเป็น Captive Fluidized Bed (Turbulent Bed) ยกเว้นกรณีที่คอลัมน์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กมากเบดจะกลายเป็น สลักกิ้ง (Slugging) ภาวะที่จุด E จะเรียกว่า

Chocking Condition (เป็นจุดที่อากาศอิ่มตัวด้วยของแข็ง) และความเร็วที่จุด E จะเรียกว่า ความเร็วช็อคกิ้ง (Chocking Velocity)



รูปที่ 2.4 ขอบเขตของ Fast Fluidization (Basu P., และ Fraser S.A., 1991)

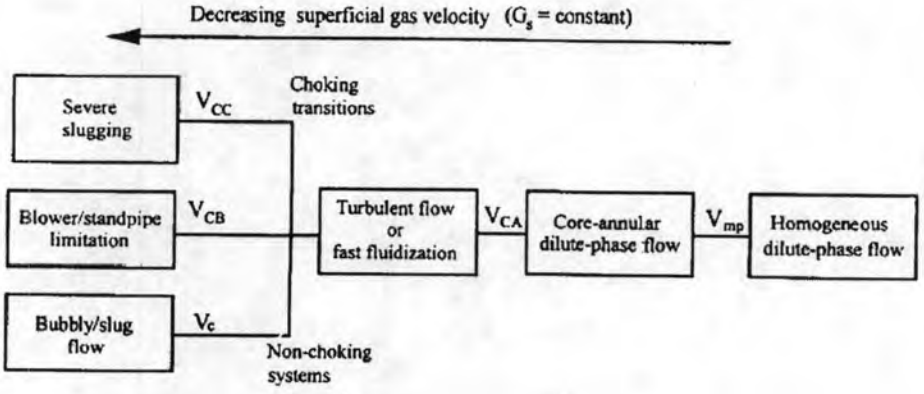
การเปลี่ยนแปลงขอบเขตไปเป็นขอบเขตฟลูอิไดเซชันที่ความเร็วสูงมีตัวแปรที่สำคัญ 2 ตัวแปร ได้แก่ ความเร็วอากาศและอัตราการหมุนเวียนของของแข็ง โดยการเปลี่ยนแปลงขอบเขตเนื่องจากการลดความเร็วอากาศ ที่อัตราการหมุนเวียนของของแข็งคงที่ แสดงดังรูปที่ 2.5 พบว่าการเปลี่ยนแปลงขอบเขตในระบบฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียนสัมพันธ์กับความเร็วในการเกิดช็อคกิ้ง (Chocking velocity) ซึ่งความเร็วช็อคกิ้งแบ่งได้ 3 ชนิด ได้แก่ A B และ C โดยสภาวะช็อคกิ้ง (Chocking Condition) คือ สภาวะที่อากาศอิ่มตัวไปด้วยของแข็ง ซึ่งเป็นการเปลี่ยนจากเบดแบบเจือจางเป็นเบดแบบหนาแน่นโดยความเร็วอากาศที่สภาวะนี้เรียกว่าความเร็วช็อคกิ้ง จากแผนผังพบว่าที่ความเร็วอากาศสูงมาก โดยความเร็วอากาศสูงกว่า V_{mp} การขนส่งภายในไรเซอร์เป็นการไหลแบบเบดเบาบางที่เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous dilute-phase flow) ซึ่งที่ความเร็วนี้ความดันของอากาศภายในคอลัมน์จะเท่ากันตลอดทั้งคอลัมน์ โดยเมื่อความเร็วอากาศลดลงพบว่าการไหลภายในคอลัมน์จะเปลี่ยนเป็นการไหลแบบเบดเบาบางที่เป็นคอร์-แอนนูลาร์ (Core-Annular dilute-phase flow) เมื่อความเร็วอากาศลดลงจนกระทั่งมีการแขวนลอยของแข็งภายในอากาศอย่างหนาแน่น แต่ยังมีการหลุดออกของของแข็งออกจากคอลัมน์ ที่สภาวะนี้ต้องการความเร็วอากาศ และอัตราการป้อนการไหลป้อนกลับของแข็งที่สูง ซึ่งเรียกความเร็ว

อากาศที่เปลี่ยนจากการขนส่งแบบเบดเบาบางไปเป็นการขนส่งแบบเบดหนาแน่นนี้ว่าความเร็วช็อคกิ้งชนิด A (Type A chocking velocity, V_{CA}) ซึ่งที่ความเร็วช็อคกิ้งชนิด A อาจเกิดการขนส่งแบบเบดหนาแน่นชนิดเบดแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) หรืออาจเป็นเบดแบบฟลูอิไดเซชันที่ความสูง (Fast Fluidization) และเมื่อความเร็วอากาศลดลงจนกระทั่งอากาศไม่สามารถนำพาของแข็งหลุดออกจากคอลัมน์ พบว่าของแข็งเริ่มสะสมอยู่ทางด้านล่างของคอลัมน์ ซึ่งทำให้การขนส่งแบบเบดหนาแน่นสลายไป เรียกความเร็วอากาศนี้ว่าความเร็วช็อคกิ้งชนิด B (Type B chocking velocity, V_{CB}) และในอีกกรณีโดยที่ความเร็วอากาศที่ลดลงยังสูงพอที่จะนำพาของแข็งหลุดออกจากคอลัมน์ และยังมีอัตราการการป้อนของแข็งเข้าสู่คอลัมน์ แต่ไม่สามารถที่เกิดการขนส่งแบบเบดหนาแน่นได้เนื่องจากเกิดสลักกิ้งภายในคอลัมน์ เรียกความเร็วอากาศนี้ว่าความเร็วช็อคกิ้งชนิด C (Type C chocking velocity, V_{CC}) จากแผนผังพบว่าการที่จะทำให้เกิดฟลูอิไดเซชันที่ความเร็วสูงต้องให้ความเร็วอากาศต่ำกว่า V_{CA} โดย Bi และ Fan ได้ประมาณค่า V_{CA} ไว้ดังนี้

$$\left(\frac{V_{CA}}{\sqrt{gd_p}}\right) = 21.6Ar^{0.105}\left(\frac{G}{\rho_g V_{CA}}\right)^{0.542} \qquad (2.17)$$

เมื่อ Ar คือ เลขอาร์คิมิดิส (Archimedes number = $\rho_g(\rho_p - \rho_g)gd_p{}^3/\mu^2)[-]$

G คือ อัตราการหมุนเวียนของของแข็ง (กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที)



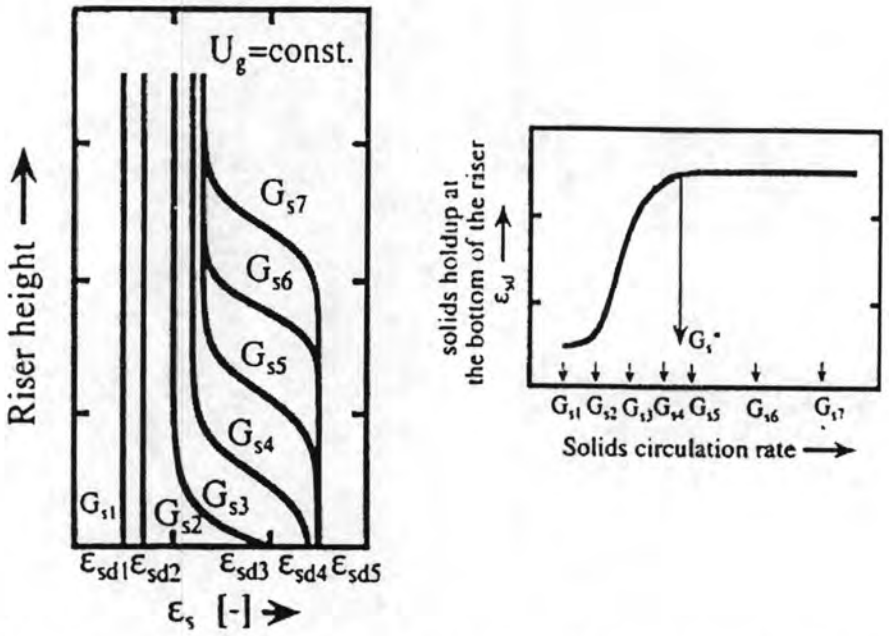
รูปที่ 2.5 แผนผังแสดงขอบเขตการเปลี่ยนแปลงภายในเครื่องฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียนและการขนส่งของแข็งภายในไรเซอร์เมื่อลดความเร็วอากาศ (Bi H.T. และคณะ, 1995)

ในระบบฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียนพบว่าอัตราการหมุนเวียนของของแข็งเป็นตัวแปรสำคัญอีกตัวแปรหนึ่ง เนื่องจากอัตราการหมุนเวียนของแข็งในระบบฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียนต้องมากกว่า Saturation carrying capacity หรือ G_s^* ถึงจะรักษาสภาวะเบดแบบความเร็วสูงให้คงตัวได้ (Smolder K.และคณะ, 2001) โดย Bai และ Kato ได้ทำการทดลองเพื่อหาค่า G_s^* แสดง

ดังรูปที่ 2.6 พบว่า G_s^* คือ อัตราการหมุนเวียนของของแข็งที่น้อยที่สุดที่ทำให้ปริมาณของแข็งที่อยู่ทางด้านล่างไรเซอร์มีค่ามากที่สุด โดยที่อัตราการหมุนเวียนของของแข็งที่มากกว่า G_s^* พบว่าสัดส่วนของแข็งที่สะสมอยู่ทางด้านล่างไรเซอร์จะคงที่เมื่ออัตราการหมุนเวียนหรือปริมาณของของแข็งเริ่มต้นเปลี่ยนแปลงไป และจะสังเกตเห็นลักษณะของการกระจายตัวของแข็งตลอดทั้งไรเซอร์มีลักษณะเป็นรูปตัวเอส (S-Shape) แสดงดังเส้นกราฟ G_{s3}-G_{s7} โดยสามารถแบ่งเบดเป็น 2 ส่วน ได้แก่ เบดหนาแน่นทางด้านล่างคอลัมน์ และเบดเบาบางทางด้านบนของคอลัมน์ ซึ่งเป็นลักษณะพิเศษของขอบเขตฟลูอิไดเซชันที่ความเร็วสูง (Smolder K. และคณะ, 2001) แต่ที่อัตราการหมุนเวียนของของแข็งที่น้อยกว่า G_s^* พบว่าสัดส่วนของแข็งเท่ากันตลอดทั้งไรเซอร์ดังเส้นกราฟ G_{s1}-G_{s2} โดยสามารถคำนวณค่า G_s^* ได้ดังสมการที่ 2.18

$$\frac{G_s^* d_p}{\mu} = 0.125 Fr^{1.85} Ar^{0.63} \left(\frac{\rho_p - \rho_g}{\rho_g} \right)^{-0.44} \qquad (2.18)$$

โดย Fr คือ Froude number (=U/(gD)$^{0.5}$)[-]



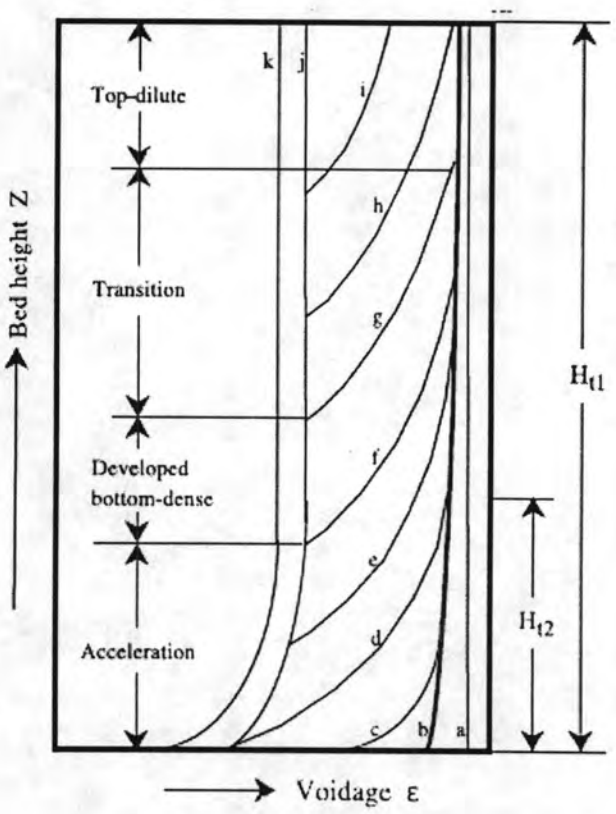
รูปที่ 2.6 การทดลองหา Saturation carrying capacity โดย Bai และ Kato (Smolder K. และคณะ, 2001)

2.2.3 โครงสร้างของเบดที่ความเร็วสูง

ในระบบฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียนนั้น การกระจายตัวของเม็ดของแข็งจะไม่สม่ำเสมอทั้งในแนวแกนและแนวรัศมี

1) โพรไฟล์ของสัดส่วนช่องว่างในแนวแกน (Axial voidage profile)

การกระจายตัวของสัดส่วนช่องว่างเฉลี่ยในพื้นที่หน้าตัดหนึ่งๆ แสดงในรูปที่ 2.7 โดยการเพิ่มขึ้นของอัตราการหมุนเวียนของแข็งที่ความเร็วอากาศคงที่ค่าหนึ่ง รูปแบบสัดส่วนช่องว่างจะเปลี่ยนจากขอบเขตการขนส่งแบบเบดเจือจาง (Dilute phase transport regime)ไปเป็นขอบเขตฟลูอิไดซ์เบดที่สภาวะความเร็วสูง (Fast Fluidized Bed) และรูปแบบการขนส่งแบบเบดหนาแน่น(Dense phase transport regime) ตามลำดับ เมื่อพิจารณาที่อัตราการหมุนเวียนของแข็งต่ำที่สุดพบว่าสัดส่วนช่องว่างของอากาศภายในคอลัมน์มากที่สุด โดยมีโพรไฟล์ของสัดส่วนช่องว่างคงที่ตลอดทั้งแนวแกน แสดงดังเส้นกราฟที่ a-b ซึ่งเป็นรูปแบบการขนส่งแบบเบดเจือจาง โดยเมื่ออัตราการหมุนเวียนของของแข็งเพิ่มขึ้นพบว่าโพรไฟล์สัดส่วนช่องว่างตลอดแนวแกนเปลี่ยนเป็นรูปตัวเอส (S-Shape) ซึ่งเป็นรูปแบบพิเศษในระบบฟลูอิไดเซชันที่ความเร็วสูง แสดงดังเส้นกราฟ c-g โดยสามารถแบ่งเบดออกได้เป็น 2 ส่วน คือ เบดหนาแน่น (Dense Bed) บริเวณด้านล่าง และเบดเบาบาง (Dilute Bed) บริเวณด้านบนของคอลัมน์ ซึ่งจุดเปลี่ยนจากเบดแบบหนาแน่นไปเป็นเบดแบบเบาบางอยู่สูงขึ้นเมื่ออัตราการหมุนเวียนของของแข็งเพิ่มสูงขึ้น นั่นคือบริเวณที่เป็นเบดหนาแน่นจะเพิ่มมากขึ้น และเมื่ออัตราการการหมุนเวียนของของแข็งเพิ่มขึ้นค่าสัดส่วนช่องว่างจะลดลงเนื่องจากมีปริมาณของแข็งสะสมเพิ่มมากขึ้น และลักษณะของกราฟเปลี่ยนจากรูปตัวเอสที่เบดมีการแบ่งชั้นเป็นเบดหนาแน่นและเบดเบาบางอย่างชัดเจน จนโพรไฟด์สัดส่วนช่องว่างเกือบเป็นเส้นตรง นั้นคือสัดส่วนช่องว่างเท่ากันตลอดทั้งคอลัมน์ แสดงดังเส้นกราฟ j-k แสดงถึงรูปแบบการขนส่งแบบเบดหนาแน่น



For operations at a specified U_g but varied G_s

รูปที่ 2.7 โพรไฟล์การกระจายตัวของสัดส่วนช่องว่างตามแนวแกน (Xu G.และคณะ, 2003)

2) โพรไฟล์ของสัดส่วนช่องว่างในแนวรัศมี (Radial voidage profiles)

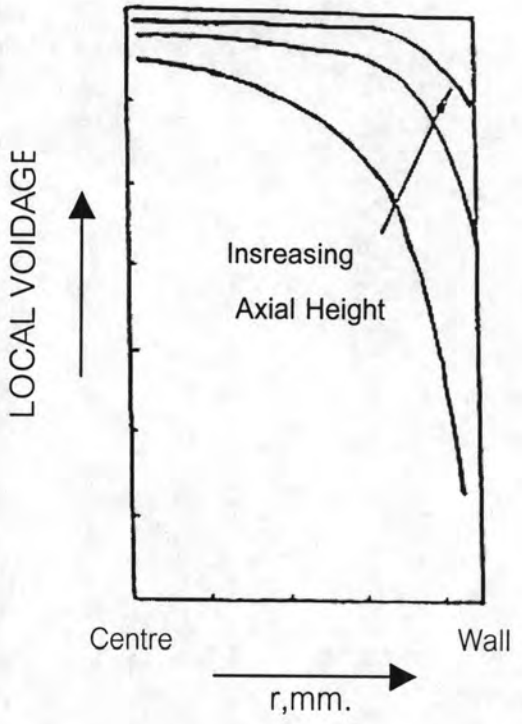
สำหรับการกระจายตัวในแนวรัศมี (Radial Distribution) Bader และคณะ (Bader และคณะ, 1988) ได้ทำการศึกษา และสรุปได้ว่า สัดส่วนโดยปริมาตรของเม็ดของแข็งที่พื้นที่หน้าตัดเดียวกัน (Local Volume Fraction of Solid) จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจากกึ่งกลางของคอลัมน์ไปยังผนังโดยจะมีค่ามากสุดที่ผนัง และมีค่าต่ำสุดที่กึ่งกลางของคอลัมน์ หรือสัดส่วนช่องว่างมีค่ามากที่สุดที่กึ่งกลางท่อ และมีค่าต่ำสุดที่ผนัง และการกระจายตัวในแนวรัศมีจะมีน้อย เมื่ออัตราการป้อนของแข็งมีค่าต่ำลง หรือความเร็วอากาศลดต่ำลง นอกจากนี้แล้วที่บริเวณด้านบนของคอลัมน์การกระจายตัวก็มีน้อยลงเช่นกัน ดังรูปที่ 2.8 Basu P. และ Fraser S.A. เสนอว่าการกระจายตัวในแนวรัศมีหรือสัดส่วนช่องว่างในแนวรัศมีจะขึ้นอยู่กับระยะในแนวรัศมี (r) จากแกนกลาง และสัดส่วนช่องว่างเฉลี่ยตลอดพื้นที่หน้าตัด (ε_{av}) ที่พิจารณาเท่านั้น และสามารถแสดงความสัมพันธ์ของค่าสัดส่วนช่องว่างในแนวรัศมี, $\varepsilon(r)$ ได้ดังนี้ (Basu P. และคณะ, 1991)

$$\varepsilon(r) = \varepsilon_{av}^{[3.6(r/R)^{6.47}+0.191]} \qquad (2.19)$$

โดยที่ ε_{av} คือ สัดส่วนช่องว่างเฉลี่ยในพื้นที่หน้าตัดหนึ่งๆ

r คือ ระยะทางในแนวรัศมีที่ต้องการวัดสัดส่วนช่องว่าง, เมตร

R คือ รัศมีของท่อไรเซอร์, เมตร



รูปที่ 2.8 สัดส่วนช่องว่างตามแนวรัศมีของระบบ Fast Bed (Basu P. และคณะ, 1991)

2.3 การจำแนกชนิดของของแข็ง

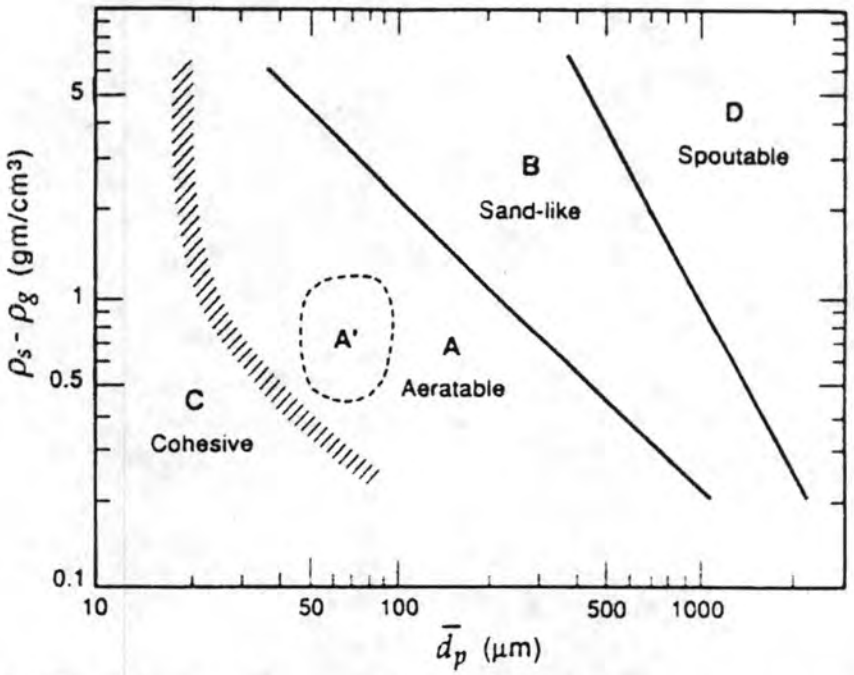
ในระบบฟลูอิไดเซชัน คุณสมบัติของของแข็ง เช่น ขนาด, รูปร่าง และความหนาแน่น มีผลต่อการแขวนลอยของของแข็งในอากาศ หรือการถ่ายโอนมวลและความร้อนระหว่างของแข็งและอากาศ จึงได้มีการศึกษาถึงผลของสมบัติของของแข็ง เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ในการออกแบบหรือปฏิบัติการในเครื่องปฏิกรณ์ในอุตสาหกรรมให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น (Mastellone L.M. และคณะ , 1999) โดยทั่วไปของแข็งในระบบฟลูอิไดเซชัน สามารถจำแนกได้เป็น 4 กลุ่มตามวิธีของ Geldart (Geldart Powder Classification) โดยวิเคราะห์ผลต่างของความหนาแน่นของของแข็งกับอากาศ และขนาดของของแข็งเฉลี่ยดังแสดงในรูปที่ 2.9 ลักษณะของอนุภาคในแต่ละกลุ่มอธิบายได้ดังนี้

Group C คือ Cohesive เป็นของแข็งที่มีขนาดเล็กมาก น้อยกว่า 50 ไมโครเมตร ของแข็งกลุ่มนี้จะเกิดฟลูอิไดเซชันได้ยาก เนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคจะสูงมากและมักจะจับตัวกันเป็นก้อน เช่น ผงแป้ง หรือ ซีเมนส์ เป็นต้น

Group A คือ Aeratable เป็นของแข็งที่มีขนาดเล็กและความหนาแน่นต่ำ สามารถทำให้เกิดฟลูอิไดซ์ได้ง่ายเป็นฟลูอิไดซ์เบดแบบสม่ำเสมอ (Smooth Fluidization) ที่ความเร็วอากาศต่ำๆ และที่ความเร็วอากาศสูงๆ ก็สามารถควบคุมการเกิดฟองอากาศได้ โดยที่ในการเกิดฟลูอิไดเซชันจะไม่เกิดฟองอากาศ เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของไอน้ำมัน (FCC) เป็นต้น

Group B คือ Sandlike เป็นของแข็งที่มีขนาด อยู่ในช่วง $50 < d_p < 500$ ไมโครเมตร. และความหนาแน่นในช่วง $1.4 < \rho_s < 4$ กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร การเกิดฟลูอิไดซ์เซชันยังเกิดได้ง่าย แต่อิทธิพลของฟองอากาศจะสูงขึ้น และฟองจะมีการโต เช่น ทราย เป็นต้น

Group D คือ Spoutable เป็นของแข็งที่มีขนาดใหญ่และหรือความหนาแน่นสูง ดังนั้นจึงเกิดฟลูอิไดซ์เซชันได้ยาก และมักจะเกิดปรากฏการณ์ Spouting หรือ เกิดช่องว่างของทางไหลอากาศ ซึ่งจะเกิดที่บริเวณทางด้านล่างของเบด เช่น เม็ดกาแฟ หรือเม็ดถั่วเขียว เป็นต้น



รูปที่ 2.9 การจำแนกกลุ่มของของแข็งโดยวิธีของ Geldart (Grace, J. R. 1997)

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Choi J.H. และคณะ (1995) ทำการศึกษาอุทกพลศาสตร์ภายในไรเซอร์และท่อป้อนกลับ โดยทำการทดลองในเครื่องฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศในไรเซอร์และท่อป้อนกลับที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 และ 6.8 เซนติเมตร ตามลำดับ และสูง 380

หอสมุดกลาง ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

และ 250 เซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งใช้ผงซิลิกาเจล (Silica gel powder) ที่มีขนาดอนุภาค 46 ไมครอน เป็นวัสดุเบด พบว่าความเร็วอากาศที่ท่อป้อนกลับไม่มีผลต่อปริมาณของของแข็งภายในไรเซอร์และท่อป้อนกลับ ในสภาวะการทดลองในงานวิจัยนี้ปรากฏรูปแบบสัดส่วนช่องว่างตลอดความสูงของไรเซอร์เป็นรูปตัวเอส (S-shape) ซึ่งพบว่าช่วงการเปลี่ยนจากเบดแบบหนาแน่นทางด้านล่างไปเป็นเบดแบบเบาบางทางด้านบนจะอยู่ตำแหน่งสูงขึ้นเมื่อปริมาณของของแข็งเริ่มต้นเพิ่มขึ้นแต่พบว่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วอากาศ

Kim S.H. **และคณะ** (1995) ทำการทดลองในเครื่องฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศในไรเซอร์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร และสูง 250 เซนติเมตร โดยทำการศึกษาผลของอนุภาคขนาดใหญ่ที่ผสมในอนุภาคขนาดเล็กต่อการแกว่งของความดันภายในไรเซอร์ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้ผงพีวีซี (PVC) และผงพอลิเอทิลีน (PE) เป็นวัสดุเบดที่มีขนาดเล็ก และเม็ดแก้วเป็นวัสดุเบดที่มีขนาดใหญ่ พบว่าการผสมอนุภาคขนาดใหญ่ช่วยให้การแกว่งของความดันภายในไรเซอร์ลดลง เนื่องจากอนุภาคขนาดใหญ่ช่วยลดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่หรือคลัสเตอร์ (Cluster) ของอนุภาคขนาดเล็ก

Mastellone L.M., **และคณะ** (1999) ทำการทดลองในเครื่องฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศในไรเซอร์ที่มีขนาด 12 เซนติเมตร และสูง 575 เซนติเมตร เพื่อศึกษาถึงผลของขนาดและความหนาแน่นของอนุภาคต่อการไหลของของแข็งภายในท่อไรเซอร์ ในการศึกษาผลของความหนาแน่นของอนุภาคพบว่าเมื่อความหนาแน่นของอนุภาคเพิ่มขึ้น ทำให้ความหนาแน่นของเบดทางด้านล่างของไรเซอร์เพิ่มมากขึ้น โดยอนุภาคที่มีความหนาแน่นสูงจะมีบริเวณของแอนนูลาร์ (Annular) กว้างเพิ่มขึ้น ซึ่งอนุภาคที่อยู่ในบริเวณนี้จะไหลตกกลับไปยังทางด้านล่างของท่อไรเซอร์ และในการศึกษาถึงผลของขนาดของอนุภาคพบว่าอนุภาคที่มีขนาดเล็กจะมีบริเวณของแอนนูลาร์ที่มากกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่

Parssinen J.H. **และคณะ** (2001) ศึกษาความเร็วของอนุภาคในแนวรัศมีของเครื่องฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่มีความหนาแน่นของอนุภาคสูง ทำการทดลองในไรเซอร์ขนาด 7.6 เซนติเมตร และสูง 1000 เซนติเมตร โดยใช้ Five-fiber Optic Velocity Probes ในการวัดความเร็วของอนุภาค จากการทดลองพบว่าสามารถแบ่งช่วงการไหลในแนวแกนของไรเซอร์ได้ 4 ช่วง ได้แก่ ช่วงหนาแน่นทางด้านล่าง (Bottom Dense section), ช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงบริเวณกลางไรเซอร์ (Middle Intermediate Dense Section), ช่วงเบดเบาบาง (Dilute Section) และช่วงทางออก (Exit Section) และพบว่าการไหลของของแข็งภายในไรเซอร์เริ่มที่บริเวณกึ่งกลางไรเซอร์และขยายบริเวณเข้าใกล้ผนังมากขึ้นเมื่อความสูงของไรเซอร์เพิ่มสูงขึ้น

Zhang M. **และคณะ** (2003) ทำการศึกษารูปแบบการไหลภายในไรเซอร์และท่อป้อนกลับโดยทำการทดลองในเครื่องฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่อุณหภูมิและความดัน

บรรยากาศในไรเซอร์และท่อป้อนกลับที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 42 เซนติเมตร และสูง 1800 และ 650 เซนติเมตร ตามลำดับ พบว่าภายในไรเซอร์ประกอบด้วย 2 วัฏภาค ได้แก่ วัฏภาคคลัสเตอร์ (Cluster phase) และวัฏภาคการกระจายตัว (Dispersed phase) แต่ภายในท่อป้อนกลับประกอบด้วยวัฏภาคการกระจายตัวเพียงอย่างเดียว ซึ่งรูปแบบการไหลภายในไรเซอร์และท่อป้อนกลับที่แตกต่างกันเนื่องจากการไหลของของแข็งภายในไรเซอร์มีทิศทางตรงข้ามกับแรงโน้มถ่วงของโลก แต่การไหลของของแข็งภายในท่อป้อนกลับมีทิศทางเดียวกับแรงโน้มถ่วงของโลก

Xu G., **และคณะ** (2003) เสนอการทดลองในเครื่องฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของตัวแปรอื่นที่มีผลต่อรูปแบบการไหลภายในไรเซอร์นอกจากความเร็วอากาศ และอัตราการหมุนเวียนของของแข็ง พบว่าการเปลี่ยนแปลงความสูงเบดในท่อป้อนกลับ หรือวาล์วที่ควบคุมการไหลของของแข็งที่ท่อส่งผ่านมีผลให้รูปแบบสัดส่วนช่องว่างตลอดความสูงของไรเซอร์เปลี่ยนแปลง ซึ่งสามารถแบ่งรูปแบบการไหลภายในไรเซอร์จากลักษณะของรูปแบบสัดส่วนช่องว่างตลอดความสูงของไรเซอร์ได้ 3 รูปแบบ ได้แก่ การไหลแบบเบาบาง (Dilute Suspension Flow), การไหลไม่สม่ำเสมอในแนวแกน (Axially Nonuniform Flow) และการไหลแบบหนาแน่น (Fully Dense Flow)

Pandey P., **และคณะ** (2004) ศึกษาผลของอัตราการไหลของอากาศ และอัตราการไหลป้อนกลับของไม้คอร์กต่อความเร็วของไม้คอร์กขนาด 812 ไมโครเมตรที่อยู่ใกล้ ๆกับผนังท่อไรเซอร์ในเครื่องฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่มีท่อไรเซอร์ขนาด 30.5 เซนติเมตร และสูง 1520 เซนติเมตร ผลการทดลองพบว่าความเร็วเฉลี่ยของไม้คอร์กเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศและเมื่อลดอัตราการการหมุนเวียนของของแข็ง และความเร็วเฉลี่ยของไม้คอร์กที่กำลังเคลื่อนที่ในทิศลงหรือตรงข้ามกับอากาศคงที่ตลอดเวลาไม่เปลี่ยนตามภาวะที่ทดลอง นอกจากนี้ยังได้ทำการทดลองเพื่อหาขนาดและความเร็วของคลัสเตอร์ (Cluster) ที่เกิดขึ้นพบว่าความเร็วของคลัสเตอร์ทั้งหมดอยู่ในทิศสวนทางกับอากาศในช่วง 0.8-1.4 เมตรต่อวินาที และขนาดของคลัสเตอร์ จะเพิ่มขึ้นเมื่อสัดส่วนของไม้คอร์กต่ออากาศที่ป้อนเข้าสู่ระบบเพิ่มมากขึ้น

สมชาย สวยสอาด (2004) ทำการทดลองในเครื่องฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ ในไรเซอร์ขนาด 5 เซนติเมตร สูง 200 เซนติเมตร ใช้สารป้อนผสมระหว่างทรายและชีวมวล 3 ชนิดคือ ขี้เลื่อย แกลบและซานอ้อย ในอัตราส่วนร้อยละ 50 โดยปริมาตร โดยใช้กล้องความเร็วสูงในการคำนวณความเร็วของอนุภาค พบว่าเมื่อความเร็วอากาศคงที่ ความเร็วเฉลี่ยของสารป้อนผสมทุกชนิดลดลงตามความสูงของไรเซอร์ และเมื่อเพิ่มความเร็วอากาศทำให้ความเร็วเฉลี่ยของสารป้อนผสมเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาที่ความเร็วอากาศคงที่และที่ตำแหน่งความสูงเดียวกัน สารป้อนผสมระหว่างทรายกับขี้เลื่อยมีความเร็วเฉลี่ยสูงกว่าความเร็วเฉลี่ยของสารป้อนที่เป็นทรายเพียงอย่างเดียว

Kim S.H. **และคณะ** (2005) ทำการทดลองในเครื่องฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศในไรเซอร์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร และสูง 590 เซนติเมตร โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในการแตกตัวของไอน้ำมัน (Fluid Catalytic Cracking, FCC) ที่มีขนาดอนุภาค 70 ไมครอน เป็นวัสดุเบด พบว่าตัวแปรที่มีผลต่อขนาดของบริเวณแอนนูลาร์ที่มีการเคลื่อนที่ลงของอนุภาค ได้แก่ ความสูงของไรเซอร์และอัตราการหมุนเวียนของของแข็ง โดยความหนาของบริเวณแอนนูลาร์ที่มีการเคลื่อนที่ลงของของแข็งเพิ่มขึ้นเมื่อความสูงของไรเซอร์เพิ่มสูงขึ้น โดยบริเวณแอนนูลาร์จะไม่ปรากฏที่บริเวณด้านล่างของไรเซอร์เมื่อเพิ่มอัตราการหมุนเวียนของแข็งที่ความเร็วอากาศคงที่ โดยเรียกรูปแบบการเคลื่อนที่บริเวณนี้ว่าขอบเขตการไหลขึ้นแบบเบดหนาแน่น (Dense suspension upflow regime)

ศันสนีย์ กำธนาทรัพย์ (2005) ทำการทดลองในเครื่องฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศในไรเซอร์ขนาด 5 เซนติเมตร สูง 200 เซนติเมตร โดยใช้เม็ดแก้วและสารป้อนผสมระหว่างเม็ดแก้วกับแกลบในอัตราส่วนร้อยละ 50 โดยปริมาตร โดยใช้กล้องความเร็วสูงในการคำนวณความเร็วของอนุภาค พบว่าความเร็วของเม็ดแก้วเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วอากาศเพิ่มสูงขึ้น โดยเม็ดแก้วมีความเร็วมากที่สุดบริเวณกึ่งกลางของไรเซอร์ และค่อยๆ ลดลงเมื่อเข้าใกล้ผนังมากขึ้น และที่ความเร็วอากาศคงที่พบว่าความเร็วของสารป้อนผสมระหว่างเม็ดแก้วกับแกลบมีค่าน้อยกว่าความเร็วของเม็ดแก้วเพียงอย่างเดียว