บทที่ 3

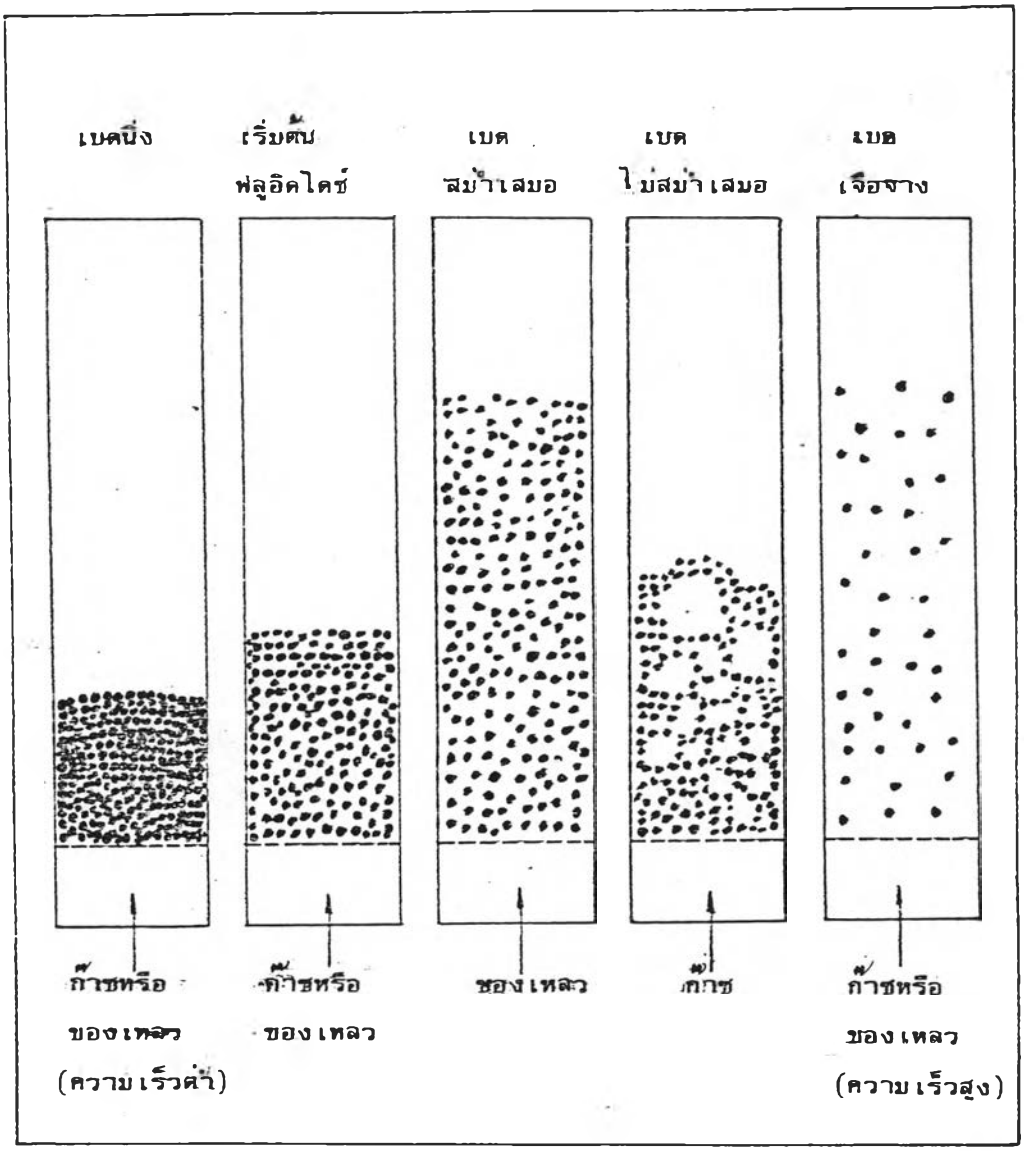
ฟลูอิดไดเซชั่น

3.1 ปรากฏการณ์ของฟลูอิดไดเซชั่น

เมื่อมีของไหลเช่น ก๊าซหรือของเหลว ไหลผ่านอนุภาคที่บรรจุอยู่ในภาชนะรูปทรงกระบอกหรือรูปทรงอื่น ๆ ขณะที่ของไหลมีอัตราการไหลต่ำก็จะค่อย ๆ ไหลผ่านช่องว่างระหว่างอนุภาคที่คงที่นั้นคล้ายกับการกรอง ขณะนี้จะเรียกอนุภาคทั้งหมดว่า เบดนิ่ง (Fixed bed) และเมื่อเพิ่มความเร็วของของไหลขึ้นอีก อนุภาคก็จะค่อย ๆ เคลื่อนตัวแยกออกจากกัน บางส่วนของอนุภาคจะเกิดการสั่นไหวและเคลื่อนที่อยู่ในอาณาเขตจำกัด ซึ่งสภาพของเบดขณะนี้จะเรียกว่า เบดขยายตัว (expanded bed)

เมื่อความเร็วของของไหลเพิ่มมากขึ้นจนถึงจุดหนึ่ง อนุภาคจะถูกแขวนลอยหรือลอยตัวเป็นอิสระอยู่ในของไหลที่ไหลผ่านอนุภาคนั้น และที่จุดนี้เองแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาคและของไหลจะเท่ากับน้ำหนักของอนุภาคทั้งหมดนั้น นั่นคือแรงกดระหว่างอนุภาคจะหายไปด้วย และความดันตกที่หน้าตัดใด ๆ ของเบดจะเท่ากับน้ำหนักของของไหลและอนุภาคที่หน้าตัดนั้น ๆ สภาพของเบดขณะนี้จะเป็นการเริ่มต้นของฟลูอิดไดซ์เบดหรือเบดที่อยู่ภาวะเริ่มต้นของปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชั่น เมื่อเลยจุดนี้ไปแล้วถ้าเพิ่มความเร็วของไหลมากขึ้นจะทำให้เบดขยายตัวมากขึ้นตามความเร็วของของไหล แต่อนุภาคยังเคลื่อนไหวแบบรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนอยู่ เบดลักษณะนี้เรียกว่า ฟลูอิดไดซ์เบดแบบหนาแน่น (Dense-phase fluidized bed) และถ้าความเร็วของของไหลเพิ่มขึ้นไปอีก ของไหลก็จะพยายามพาอนุภาคของแข็งให้ลอยสูงขึ้น และแยกตัวห่างออกจากกันมากขึ้น เบดลักษณะนี้เรียกว่า ฟลูอิดไดซ์เบดเจือจาง (Diluted-phase fluidized bed) หลังจากนี้ถ้าความเร็วของของไหลเพิ่มขึ้นอีกเพียงเล็กน้อย อนุภาคของแข็งจะหลุดลอยออกจากภาชนะบรรจุไป ซึ่งในลักษณะนี้จะเป็นลักษณะคล้ายส่งของแข็งด้วยอากาศ (Pneumatic transport) และถ้าเป็นของเหลวจะเรียกว่า ขนส่งด้วยของเหลว (Hydraulic transport) ฟลูอิดไดซ์เบดที่ของไหลเป็นของเหลว การขยายตัวของเบดเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ การแขวนลอยตัวและการหมุนรอบตัวเองของอนุภาคของแข็งเป็นไปอย่างช้า ๆ เรียกเบดนี้ว่า เบดสม่ำเสมอหรือเบดที่เป็นเนื้อเดียวกัน (Particulated bed of homogeneously bed or Smoothly fluidized bed or Liquid fluidized bed) สำหรับฟลูอิดไดซ์เบดที่

ของไหล เป็นก๊าซลักษณะของ เบดจะแตกต่างจากปรากฏการณ์ของของ เหลว ทั้งนี้ เพราะ เมื่อ ความ เร็วของก๊าซสูงกว่าความ เร็วที่ทำให้ เกิดฟลูอิดไดซ์ เบดแล้ว ก๊าซส่วนหนึ่งจะทำหน้าที่ให้ เกิดการลอยตัวของอนุภาคของแข็ง แต่อีกส่วนหนึ่งจะรวมตัวกัน เกิด เป็นฟองก๊าซแทรกขึ้นมา ยังผิวหน้าของ เบด และจะแตกตัวไปในที่สุด ขณะที่ฟองก๊าซลอยขึ้นมาจะมีอนุภาคของแข็งลอย ตามขึ้นมาด้วย และ เมื่อฟองอากาศแตกออกอนุภาคของแข็งนี้จะตกกลับมายัง เบดอีกครั้ง ถ้า สัง เกตดูใน เบดขณะนี้จะพบว่า การ เคลื่อนที่ของของแข็ง เป็นไปอย่างชุลมุนวุ่นวาย เบดชนิด นี้ เรียกว่า ฟลูอิดไดซ์ เบดวุ่นวาย สำหรับขั้นตอนต่าง ๆ ของการ เกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชั่นจะแสดงโบรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการ เกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชั่นของอนุภาคของแข็ง

3.2 การแบ่งประเภทของฟลูอิดไดเซชั่น

ฟลูอิดไดเซชั่นอาจแบ่งเป็นประเภทต่าง ๆ ได้ดังนี้

3.2.1 ฟลูอิดไดเซชั่นสองสถานะ

หมายถึงภายในภาชนะบรรจุหรือหอทดลองจะประกอบด้วยสสารสองสถานะคือของแข็งและของไหล ของไหลอาจเป็นก๊าซหรือของเหลวก็ได้ ถ้าเป็นก๊าซจะเรียกว่า ก๊าซฟลูอิดไดเซชั่นและถ้าเป็นของเหลวจะเรียกว่า ฟลูอิดไดเซชั่นของเหลว (Liquid fluidization)

3.2.2 ฟลูอิดไดเซชั่นสามสถานะ (Three phase Fludization)

หมายถึงภายในภาชนะบรรจุจะประกอบด้วยสสารสามสถานะอยู่ด้วยกัน คือ ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ กลไกของกระบวนการเกิดฟลูอิดไดเซชั่นสามสถานะนี้ สลับซับซ้อนมาก บางครั้งอาจพัฒนาไปสู่ฟลูอิดไดเซชั่นสองสถานะ

3.3 ก๊าซฟลูอิดไดเซชั่น

ฟลูอิดไดเซชั่นสองสถานะที่ประกอบด้วยสารที่เป็นของแข็งและก๊าซหรือที่เรียกว่าก๊าซฟลูอิดไดเซชั่นนั้น กลไกของกระบวนการดังกล่าวจะสลับซับซ้อนมากกว่าฟลูอิดไดเซชั่นของของเหลว กล่าวคือ ในขณะที่เบดเริ่มมีลักษณะการเป็นฟลูอิดไดเซชั่นใหม่ ๆ จะมีส่วนคล้ายกับลักษณะของเบดที่เกิดขึ้นในฟลูอิดไดเซชั่นของเหลว แต่เมื่อความเร็วของก๊าซเพิ่มขึ้นจะมีก๊าซบางส่วนรวมตัวกัน แล้วก่อตัวเหมือนถุงอากาศซึ่งเรียกว่า ฟองอากาศหรือฟองก๊าซ และส่วนที่มีแต่อนุภาคของแข็งแขวนลอยตัวอยู่เรียกว่า เบดหนาแน่น (Dense bed) หรือวัฏภาคของอีมัลชั่น (Emulsion phase) และถ้าเรียกรวมกันจะเรียกว่า เบดรวมกลุ่ม (Aggregate bed)

เมื่อความเร็วของก๊าซเพิ่มขึ้น จำนวนฟองก๊าซจะมีมากขึ้น และจะรวมตัวกันใหญ่ขึ้นจนกระทั่งลอยถึงผิวหน้าก็จะแตกกระจายออก และอนุภาคที่ถูกพาขึ้นมาด้วยจะตกกลับลงไปยังเบดใหม่ บริเวณที่มีฟองก๊าซและบริเวณเหนือผิวหน้าของเบดที่มีฟองก๊าซแตกกระจายจะเรียกว่า เบดที่มีของแข็งน้อย (Lean bed) ปรากฏการณ์ของก๊าซฟลูอิดไดเซชั่นนี้จะเกี่ยวข้องกับงานวิจัยครั้งนี้เป็นอย่างมาก

3.4 ฟลูอิดไดซ์เบด

ฟลูอิดไดซ์หมายถึงการที่ของแข็ง (Solid) มีพฤติกรรมต่าง ๆ ที่คล้ายกับของ

ไหล (Fluid) ส่วนที่เป็น เบด (Bed) หมายถึงบริเวณหรืออาณาเขตในหอทดลองที่มีปริมาณอนุภาคของแข็งบรรจุอยู่ ไม่ว่าอนุภาคเหล่านั้นจะอยู่นิ่งหรือเคลื่อนไหวด้วยของไหลก็ตามจะมีระดับตั้งแต่แผ่นกระจายของไหล (Distributor plate) จนถึงระดับสูงสุดคือผิวหน้าที่อนุภาคบรรจุอยู่ในหอทดลอง

ปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดพฤติกรรมของฟลูอิดไดซ์ที่ดีคือ [6]

ก. อนุภาคควรมีขนาดเล็กและเหมาะสมกับขนาดของหอทดลอง

ข. ขนาดของอนุภาคต้องไม่แตกต่างกันมากเกินไป

ค. รูปร่างทางกายภาพของอนุภาคควรใกล้เคียงกับทรงกลม

ง. ตัวกระจายของของไหล (Distributor) ต้องสามารถกระจายของของไหลได้อย่างสม่ำเสมอ

จ. ความเร็วของของไหลภายในเบดต้องพอเหมาะกับขนาดของเบดที่ใช้ทดลอง อย่างไรก็ตามถ้าอนุภาคมีขนาดเล็กมาก และมีแรงดึงดูดระหว่างผิวของอนุภาคสูงก็อาจทำเกิดฟลูอิดไดซ์ได้ยาก อีกประการหนึ่งถ้าอนุภาคมีความหนาแน่นต่ำมากเกินไปแรงโน้มถ่วงของโลกที่กระทำต่ออนุภาคจะลดน้อยลง ดังนั้นโอกาสที่ของไหลจะผ่านทะลุขึ้นมาเป็นช่อง (Channeling) นั้นง่ายและรุนแรงมาก

3.5 พฤติกรรมต่าง ๆ ของฟลูอิดไดซ์เบด

3.5.1 ความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดซ์เบด

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่า เมื่อปรับความเร็วของของไหลสูงขึ้นถึงจุดหนึ่งจะเริ่มปรากฏการณ์ของฟลูอิดไดเซชั่น พฤติกรรมที่เห็นได้ชัดเจนคือ

ก. ลักษณะของวัสดุที่ใช้เป็นเบดจะสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกันตลอดทั้งเบด

ข. ผิวหน้าของอนุภาคในเบดจะราบเรียบและอยู่ในแนวระดับ

ค. อนุภาคของของแข็งจะเริ่มลอยอยู่ในกระแสของของไหล และมีระยะห่างกันระหว่างอนุภาคน้อยมาก แต่การสัมผัสระหว่างอนุภาคจะลดลงอาจมีการเคลื่อนไหวบ้างเล็กน้อย และอยู่ในวงจำกัด

ง. ถ้าเป็นก๊าซฟลูอิดไดเซชั่นจะไม่มีฟองของก๊าซเกิดขึ้น โดยก๊าซจะเคลื่อนที่ผ่านอนุภาคในเบดอย่างสม่ำเสมอ และไม่มีการรวมตัวของก๊าซเกิดขึ้นจนมองเห็นได้

3.5.1.1 การหาค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดซ์เบด

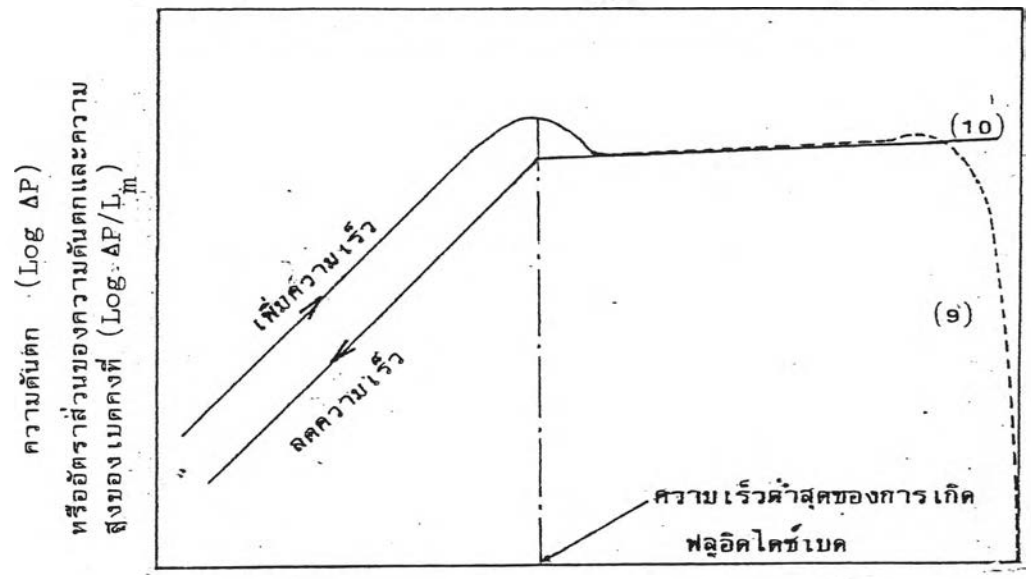
การหาค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดซ์เบดนั้น หา

009376

ได้ 2 วิธีคือ

3.5.1.1.1 โดยวิธีกราฟ

วิธีดังกล่าวนี้จะอาศัยหลักที่ว่า เมื่อความเร็วของของไหลเพิ่มขึ้นทีละน้อยนั้น ความดันตก (Pressure drop) จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นพร้อมกับการเพิ่มความเร็วของของไหล ดังนั้นถ้าวาดกราฟระหว่างความดันตกกับความเร็วของอากาศ หรืออัตราส่วนของความดันตกและความสูงของเบดคงที่กับความเร็วของอากาศดังแสดงในรูปที่ 3·2 ก็จะสามารถหาค่าความเร็วต่ำสุดของของไหลได้[9][10]



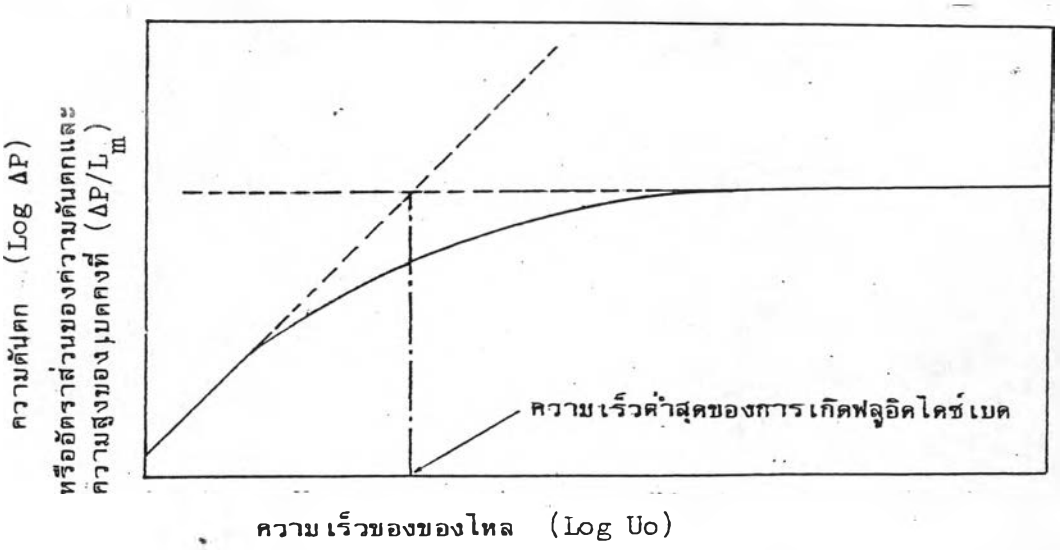
รูปที่ 3·2 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันตก (หรืออัตราส่วนของความดันตกต่อความสูงของเบดคงที่) กับความเร็วของของไหล

จากรูปที่ 3·2 นั้นเป็นการทดลองเมื่ออนุภาคมีขนาดใกล้เคียงกัน ซึ่งจะสังเกตุได้ว่าเส้นกราฟจะมีความแตกต่างกัน เมื่อเพิ่มและลดความเร็วของของไหล โดยเส้นกราฟที่แสดงถึงการเพิ่มความเร็วของของไหลจะมีส่วนที่โค้งขึ้น บริเวณดังกล่าวนี้แสดงว่าต้องใช้แรงดันมากเป็นพิเศษที่จะใช้กระจาย หรือแยกอนุภาคให้ออกจากกันและจัดเรียงตัวให้เป็นระเบียบ เมื่อเรียงตัวเรียบร้อยแล้วความดันตกจะค่อย ๆ ลดลง และคงที่ตลอดไป

สำหรับเส้นกราฟที่แสดงถึงการลดความเร็วนั้นช่วงแรกจะคงที่ ส่วนช่วงหลังจะค่อย ๆ ลดลงโดยเส้นกราฟจะขนานกันกับเส้นกราฟเพิ่มความเร็ว แต่จะมีค่าความดันตกน้อยกว่า จากการทดลองพบว่า ความดันตกในการเพิ่มความเร็วจะมากกว่าความดันตกในการลดความเร็วประมาณร้อยละ 5 ถึง 10 [5] ทั้งนี้เป็นเพราะขณะที่เบดเปลี่ยนจากฟลูอิดไดซ์

เบดเข้าสู่เบดนิ่ง อนุภาคของแข็งจะเรียงตัวเองแล้ว และไม่ต้องสูญเสียพลังงานในการจัดช่วงว่างในเบดให้เป็นระเบียบอีก และเมื่อใดก็ตามถ้าเราทดลองซ้ำในเบดเดิมอีก เส้นกราฟที่แสดงการเพิ่มความเร็วใหม่นี้จะเดินตามเส้นลดความเร็วในการทดลองครั้งแรก

สำหรับอนุภาคที่มีขนาดแตกต่างกันมากหรือมีขนาดกระจาย (Size distribution) ลักษณะของกราฟที่ได้จะดูราบเรียบกว่า และจากกราฟดังกล่าวก็จะสามารถหาค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดซ์เบดได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.3 (6) (9) (10)



รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันตก (หรืออัตราส่วนของความดันตกและความสูงความเบดคงที่) กับความเร็วของของไหล เมื่ออนุภาคมีขนาดแตกต่างกันมากหรือมีขนาดกระจาย

การใช้อนุภาคที่มีขนาดแตกต่างกันมาก ๆ เช่น มีอนุภาคขนาดเล็กมากปนกับขนาดใหญ่มาก และรวมอยู่เพียง 2 ขนาด ก็อาจทำให้เกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชั่นเฉพาะขนาดเล็กขึ้นในช่วงว่างระหว่างอนุภาคขนาดใหญ่ ในขณะที่อนุภาคขนาดใหญ่ยังอยู่กับที่และยังไม่เคลื่อนไหวเลย ปรากฏการณ์เช่นนี้มักจะเกิดขึ้นเมื่อความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคทั้งสองในอัตราส่วน 6:1 หรือมากกว่า (9)

สิ่งที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือ การหาค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดซ์เบดจากรูปที่ 3.2 และ 3.3 โดยวิธีกราฟนั้น ควรจะหาขณะที่ใส่เบดครั้งแรก เพราะเมื่อทดลองซ้ำครั้งที่ 2 เบดบางส่วนที่หายไปในการทดลองครั้งแรกหรือเกิดการจับตัวกันหรือเกิดการหดตัว หรือเกิดปฏิกิริยากันก็จะเป็นเหตุให้ได้ค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดซ์เบดแตกต่างกับครั้งแรก ทั้งนี้ปรากฏการณ์ดังกล่าวมักจะเกิดขึ้นได้ง่าย เมื่อใช้อนุภาคที่มีขนาดเล็กมาก

หรือมีอนุภาคหลาย ๆ ขนาดรวมกัน [9]

3.5.1.1.2 โดยวิธีคำนวณ

จากที่ได้กล่าวแล้วว่า ขณะ เมื่อ เริ่ม เกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชั่นนั้น อนุภาคของของแข็งจะ เริ่มลอยตัว เป็นอิสระอยู่ในกระแสการไหลของของไหลหรือก๊าซ การที่อนุภาคลอยอยู่ได้นั้น เนื่องมาจากของแข็งอยู่ในสภาวะสมดุลย์ของแรงสองแรงที่มีทิศทางตรงกันข้าม คือแรงที่ เกิดจากน้ำหนักของอนุภาคของแข็ง เอง และแรงพยุง เนื่องจากของไหลหรือ เกิดจากแรง เสียดทานกับแรงด้านของของไหล ซึ่งจะ เขียน เป็นสมการได้ดังนี้คือ

แรงพยุง (แรง เสียดทาน + แรงด้าน) = น้ำหนักของอนุภาค (3.1)

หรือ (ความดันตกในพื้นที่ภาคตัดขวางของ เบด) (พื้นที่ภาคตัดขวางของหอทดลอง) =

(ปริมาตรของ เบด) (เศษส่วนของอนุภาคใน เบด) (ความถ่วงจำเพาะของของแข็ง) (3.2)

หรือ $$\Delta P.A_t = W = (A_t.L_{mf})(1-\varepsilon_{mf})(\rho_s-\rho_g)\ g/gc \qquad (3.3)$$

จัดสมการใหม่ เพื่อให้ได้สภาวะต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชั่น

$$\frac{\Delta P}{L_{mf}} = (1-\varepsilon_{mf})\ (\rho_s-\rho_g)\ g/gc \qquad (3.4)$$

จากสมการของ ERGUN[12] ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของความดันตกในขณะ เบดนิ่งไว้ดังนี้

$$\frac{\Delta P_c}{L} = 150\ \frac{(1-\varepsilon_m)^2}{\varepsilon_m^3}.\ \frac{\mu Uo}{(\phi_s d_p)^2} + 1.75\ \frac{(1-\varepsilon_m)}{\varepsilon_m^3}\ .\ \frac{\rho_g Uo^2}{\phi_s d_p} \qquad (3.5)$$

ซึ่งสมการดังกล่าวนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้ขณะที่ เริ่ม เกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชั่น ทั้งนี้ เพราะปริมาณช่องว่างขณะที่ เริ่ม เกิดนั้นจะมีค่ามากกว่าปริมาณช่องว่างในขณะ เบดนิ่งเล็กน้อย ดังนั้นจากสมการที่ (3.5) จึง เขียนใหม่ได้ดังนี้ [9]

$$\frac{1.75}{\phi_s \varepsilon_{mf}^3}\left(\frac{d_p U_{mf}\rho_g}{\mu}\right)^2 + \frac{150(1-\varepsilon_{mf})}{\phi_s^2 \varepsilon_{mf}^3}\left(\frac{d_p U_{mf}\rho_g}{\mu}\right)$$

$$= \frac{d_p^3\ \rho_g(\rho_s-\rho_g)\ g}{\mu^2} \qquad (3.6)$$

ใน เบดที่มีขนาดอนุภาค เล็กจะทำให้สามารถใช้ความ เร็วของของไหล เพียง เล็กน้อยก็ทำให้ เกิดฟลูอิดไดเซชั่นแล้ว เพราะฉะนั้นความ เร็วต่ำสุดที่จะทำให้ เกิดฟลูอิดไดซ์ เบดสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$U_{mf} = \frac{(\phi s\ dp)^2}{150} \cdot \frac{(\rho_s-\rho_g)}{\mu} \cdot g\left(\frac{\varepsilon_{mf}^3}{1-\varepsilon_{mf}}\right) \text{ เมื่อ } Re_p < 20 \qquad (3.7)$$

และสำหรับ เบดที่มีขนาดอนุภาคขนาดใหญ่ ซึ่งต้องใช้ความ เร็วของของไหลสูงมากจึงจะทำให้อนุภาคของแข็งลอยตัว เป็นอิสระได้ กล่าวคือ ค่าของพลังงานจลน์จะ เป็นจุด เด่นในกรณีนี้ ดังนั้นความ เร็วต่ำสุดของของไหลที่จะทำให้ เกิดฟลูอิดไดซ์ เบดจึงคำนวณจากสมการ

$$U_{mf}^2 = \frac{\phi s dp}{1.75} \cdot \frac{(\rho_s-\rho_g)}{\rho_g} \cdot g \cdot \varepsilon_{mf}^3 \text{ เมื่อ } Re_p > 1000 \qquad (3.8)$$

การหาค่าความ เร็วต่ำสุดในการ เกิดฟลูอิดไดซ์ เบด (U_{mf}) นั้นบางครั้งการหาค่าแฟค เตอร์รูปร่าง (ϕs) และค่าสัดส่วนของช่องว่างต่ำสุดของ เบด (ε_{mf}) อาจทำได้ยาก ดังนั้นจึงมีผู้พยายามที่จะหลีก เลี่ยงการใช้ค่าทั้งสองโดยตรง ทั้งนี้มักจะทำสมการข้างต้นให้อยู่ในเทอมของขนาด เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็ง เช่น สมการของ C.Y. Wen และ Y.H. YU เป็นต้น[13] ซึ่งได้ เสนอผลคูณของช่องว่างต่ำสุด และแฟค เตอร์รูปร่างมีค่าคงที่ ซึ่งได้จากการวิ เคราะห์จากข้อมูลต่าง ๆ รวมทั้งผลการทดลองที่ได้กระทำ เอง ทำให้สรุปได้ว่า

ค่าของ $\frac{1}{\phi_s \varepsilon_{mf}^3} \approx 14$ $\qquad$ $\frac{1-\varepsilon_{mf}}{\phi_s^2 \varepsilon_{mf}^3} \approx 11$

ดังนั้น เมื่อนำค่าดังกล่าวแทนลงในสมการที่ (3.6) (3.7) และ (3.8) ก็สามารถ เขียนสมการได้ใหม่ คือ

$$\frac{d_p U_{mf} \rho_g}{\mu} = \left[(33.7)^2 + 0.0408 \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_s-\rho_g) g}{\mu^2}\right]^{\frac{1}{2}} - 33.7 \qquad (3.9)$$

สำหรับ เบดที่มีขนาดของอนุภาคใหญ่ สามารถ เขียนสมการได้ใหม่คือ

$$U_{mf}^2 = \frac{d_p(\rho_s-\rho_g)g}{24.5\ \rho_g} \text{ เมื่อ } Re_p > 1000 \qquad (3.10)$$

และสำหรับ เบดที่มีขนาดของอนุภาค เล็กสามารถ เขียนสมการได้คือ

$$U_{mf} = \frac{d_p^2 (\rho_s-\rho_g)g}{1650\ \mu} \text{ เมื่อ } Re_p < 20 \qquad (3.11)$$

อย่างไรก็ตาม จากการวิเคราะห์ความแม่นยำของสมการใหม่นี้ โดยการเปลี่ยนแปรค่าความหนาแน่นขนาดของอนุภาค ความหนืดของก๊าซ และใช้ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ ตั้งแต่ 0.001 ถึง 4000 นั้น ค่าความเร็วต่ำสุด (Umf) ที่คำนวณได้จะมีค่าเบี่ยงเบนประมาณร้อยละ 34[9]

นอกจากนี้ก็มีผู้เสนอสมการสำหรับคำนวณค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดซ์เบด (Umf) ดังนี้คือ

Miller และ Logwinuk[14] ได้ทำการทดลองกับอนุภาคหลายชนิดและพยายามรวมตัวแปรเป็นกลุ่มแบบไม่มีหน่วยแล้วดัดแปลงมาเพื่อคำนวณค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดซ์เบดดังนี้

$$U_{mf} = \frac{0.00125\, d_p^2\, (\rho_s - \rho_g)^{0.9}\ \rho_g^{0.1}\, g}{\mu} \qquad (3.12)$$

Johnson[15] ได้ทำการทดลองในระบบของก๊าซและของแข็ง โดยพยายามศึกษาถึงคุณสมบัติต่าง ๆ ของเบด อาทิเช่น ความหนาแน่น และความหนืด เป็นต้น โดยศึกษาขณะเบดอยู่ในลักษณะฟลูอิดไดเซชั่น และได้เสนอสมการสำหรับคำนวณค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดซ์เบดดังนี้คือ

$$U_{mf} = \frac{d_p^2\, \phi_s^2\, g(\rho_s - \rho_g)}{18\mu} \cdot \frac{\varepsilon_{mt}^3}{1+0.5(1-\varepsilon_{mt})} \qquad Re_p < 2 \qquad (3.13)$$

และ

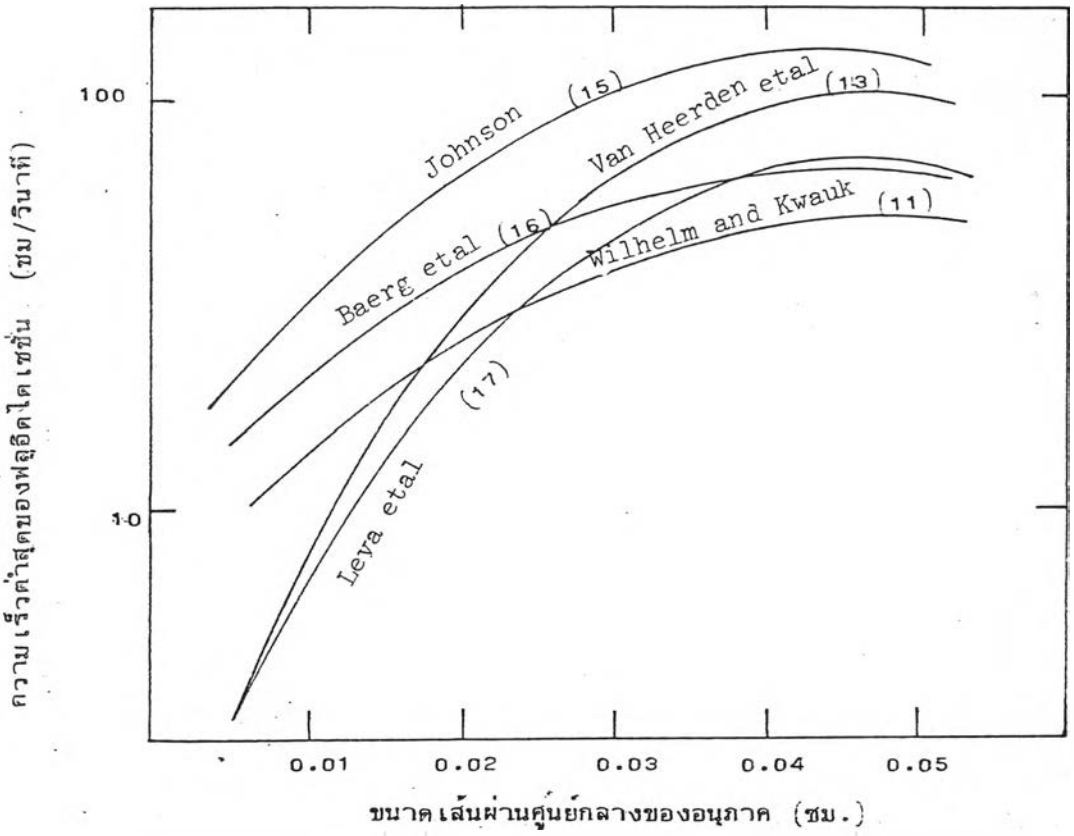
$$U_{mf} = 0.171\, d_p\, \phi_s\, (\varepsilon_{mt})^3 \cdot \frac{g^2 \rho_s\, \varepsilon_{mf}^6}{\mu(1-\varepsilon_{mf})(1+0.5)(1-\varepsilon_{mf})} \qquad Re_p > 2 \qquad (3.14)$$

Baerg และผู้ร่วมงาน[16] ได้ศึกษาถึงไฮโดรไดนามิคของเบด และได้สรุปเป็นสูตรสำหรับคำนวนค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไดซ์เบด คือ

$$U_{mf} = 1.8 \times 10^2\, (dp\, \rho_b)^{1.23} \qquad (3.15)$$

สมการต่าง ๆ ที่กล่าวมาแล้วทั้งหมดจะสังเกตได้ว่าค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดซ์เบดนั้น จะขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคเป็นสำคัญ เพราะค่าอื่น ๆ เช่น ความหนาแน่นของอนุภาค ความหนาแน่นของของไหล และความหนืดของของไหล มักจะคงที่ขณะทำการทดลอง ดังนั้นเมื่อเปลี่ยนขนาดของอนุภาคให้โตขึ้น หรือเล็กลงก็จะทำให้

ค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไดซ์เบดเปลี่ยนแปลงไปด้วย ดังจะสังเกตได้จากรูปที่ 3•4 ส่วนขนาดของเบดนั้นจะไม่มีผลต่อค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไดเซชั่นแต่อย่างใด



รูปที่ 3•4 แสดงผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชั่นกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็ง

3.5.2 ความเร็วตกอิสระของอนุภาคของแข็งในของไหลที่อยู่นิ่ง

ในฟลูอิดไดซ์เบดนั้น ความเร็วของเร็วสองความเร็วคือ ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไดซ์เบด และความเร็วของไหลที่เพิ่มขึ้นจากความเร็วต่ำสุดจนกระทั่งทำให้อนุภาคของแข็งหลุดลอยออกจากหอทดลองไป ซึ่งความเร็วนี้จะมีค่าเท่ากับความเร็วตกอิสระของอนุภาคในของไหลที่อยู่นิ่งพอดี

แต่โดยทั่วไปมักจะจำกัดความเร็วของไหลไม่ให้เกินความเร็วอันหลังนี้ ทั้งนี้เพื่อป้องกันการสูญหายของเบด เนื่องจากการหลุดลอยของอนุภาค ซึ่งจะทำให้ปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชั่นเปลี่ยนแปลงไปในขณะทดลอง

สำหรับความเร็วตกอิสระของอนุภาคนั้นสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการซึ่งได้จากการศึกษาเกี่ยวกับการไหลของของไหล คือ [19]

$$Ut = \left[\frac{4gdp(\rho_s-\rho_g)}{3\rho_g Cd}\right]^{\frac{1}{2}} \qquad (3.16)$$

เมื่อ Cd คือสัมประสิทธิ์ของการเสียดทาน (Drag coefficient) จากการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์ของการเสียดทานของอนุภาคทรงกลมโดยนักวิทยาศาสตร์หลายท่านพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวนี้จะแปรผันตามขนาดของอนุภาค และเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้คือ

$$Cd = \frac{24}{R_{ep}} \quad \text{เมื่อ} \quad R_{ep} < 0.4 \qquad (3.17)$$

$$Cd = \frac{10}{R_{ep}^{\frac{1}{2}}} \quad \text{เมื่อ} \quad 0.4 < R_{ep} < 500 \qquad (3.18)$$

และ $$Cd = 0.43 \quad \text{เมื่อ} \quad 500 < R_{ep} < 200{,}000 \qquad (3.19)$$

เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงการสูญเสียวัสดุที่เป็นเบดในขณะทดลองก็ต้องระมัดระวังการใช้ความเร็วของของไหลที่ผ่านเข้าไปในเบดโดยพยายามควบคุมไม่ให้เกินความเร็วตกอิสระของอนุภาคของแข็งดังกล่าวนี้

Pinchbeak และ Popper [18] ได้เสนออัตราส่วนของความเร็วตกอิสระและความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชั่น (U_t/U_{mf}) ดังนี้คือ

สำหรับอนุภาคขนาดเล็ก และค่าเรย์โนล์ดนัมเบอร์ (Re_p) ไม่เกิน 0.4

อัตราส่วน $$U_t/U_{mf} = 91.6 \qquad (3.20)$$

และสำหรับอนุภาคขนาดใหญ่ และค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Re_p) เกินกว่า 1000

อัตราส่วน $$U_t/U_{mf} = 8.72 \qquad (3.21)$$

อย่างไรก็ตามในการทดลองทั่วไปจะใช้ความเร็วของก๊าซประมาณ 2 ถึง 3 เท่าของความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดซ์เบด

3.5.3 การผสมผสานของของแข็งในฟลูอิดไดซ์เบด

จากที่ได้กล่าวในตอนต้นแล้วว่าเมื่อเพิ่มความเร็วของก๊าซที่ผ่านเข้าไปในเบดให้สูงกว่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์เบดแล้ว ก็จะทำให้ก๊าซส่วนหนึ่งรวมตัวกันเป็นฟองก๊าซลอยแทรกขึ้นมายังผิวหน้าของเบด และจะแตกตัวไปในที่สุด ขณะที่ฟองก๊าซลอยตัวขึ้นก็จะมีอนุภาคของแข็งลอยตามขึ้นมาด้วย และเมื่อฟองก๊าซแตกออกอนุภาคของแข็งก็จะตกกลับมายัง

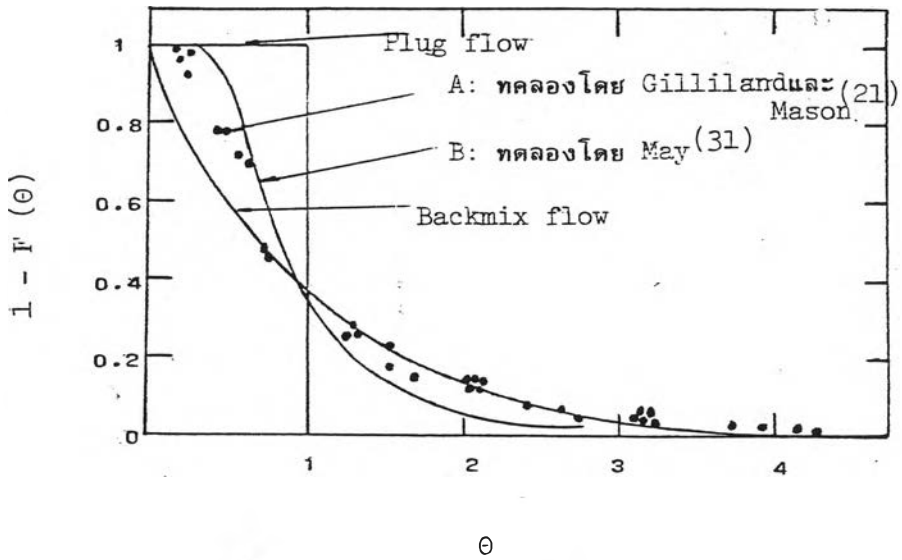
เบดอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งอนุภาคดังกล่าวบางส่วนมีโอกาสที่ฟองก๊าซที่ เกิดขึ้นใหม่จะพากลับขึ้นไปอีกและ อนุภาคบางส่วนก็ตกลงด้านล่างของ เบด ดังนั้นอนุภาคของแข็งจึงมีโอกาสกระจายไปทุกหนทุกแห่ง ใน เบดได้ เสมอ กล่าวสรุปคือ อนุภาคของแข็งและก๊าซจะผสมผสานกันอย่างสม่ำ เสมอทุกส่วนของ เบด และมีพฤติกรรมต่าง ๆ คล้ายกับของไหล

Kondukov และผู้ร่วมงาน[20] ได้ศึกษาการ เดินทางของอนุภาคของแข็ง ภายใน เบดพบว่าการ เคลื่อนที่ของอนุภาคของแข็งจะ เป็นไปอย่างรวด เร็วขณะ เคลื่อนตัวขึ้นด้าน บน และจะวน เวียนอยู่ส่วนบนของ เบดช่วงระยะ เวลาหนึ่ง จากนั้นจะตกลงสู่ด้านล่างของ เบดด้วย อัตราความ เร็วช้ากว่าตอน เคลื่อนที่ขึ้น ดังนั้นอนุภาคของแข็งจะใช้ เวลามากขณะตกลงสู่ เบื้องล่าง ของ เบด แต่ถ้าตัวกระจายก๊าซไม่ดีจะมีการหมุน เวียนของอนุภาคอยู่ เหนือตัวกระจายก๊าซ เป็น เวลานานกว่าปกติ แล้วจึงหลุดจากการหมุน เวียนและ เคลื่อนที่สู่ส่วนบนของ เบด

3.5.4 ลักษณะการไหลของก๊าซในฟลูอิดไดซ์ เบด

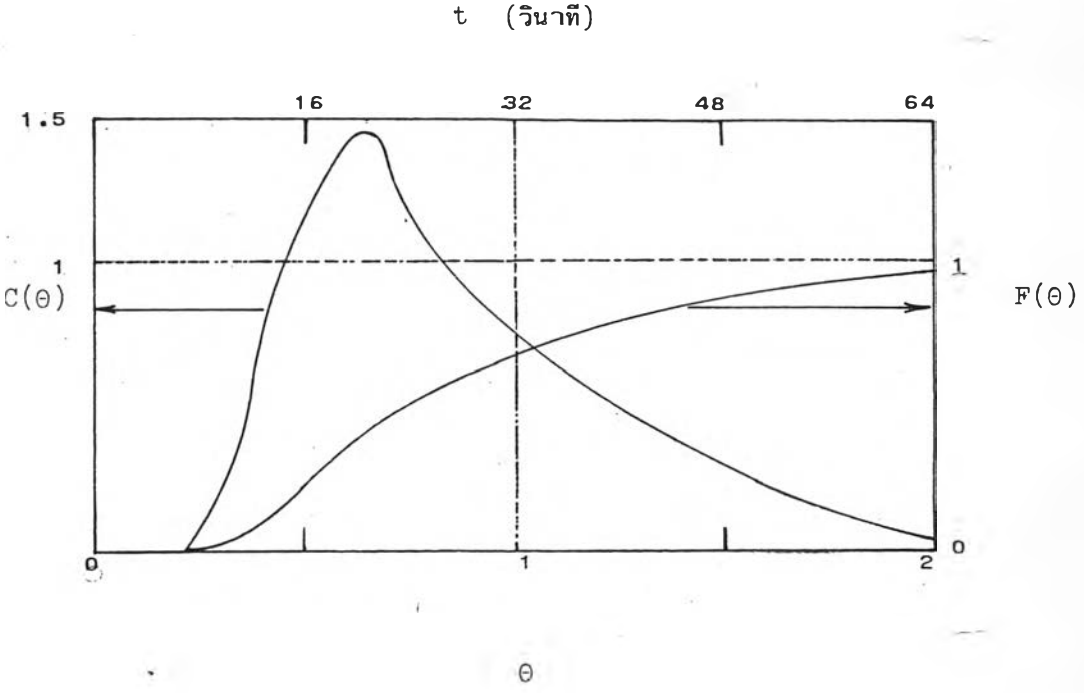
การไหลของก๊าซในฟลูอิดไดซ์ เบดนั้น ได้มีผู้ทำการศึกษาด้วยวิธีต่าง ๆ หลายวิธีที่นิยมกันมากคือ การใช้ เทคนิคตัวนำ (tracer) ทั้งแบบต่อ เนื่องและไม่ต่อ เนื่อง สาร ตัวนำอาจ เป็นก๊าซหรือของแข็งก็ได้ ซึ่งผลการทดลองของนักวิจัยหลายท่านปรากฏดังนี้

Gilliland และ Mason[21] ได้ทำการทดลองใน เบดขนาดต่าง ๆ ด้วย ความ เร็วของก๊าซต่าง ๆ กัน พบว่าการไหลของก๊าซใน เบดนั้น เป็นการไหลอยู่ในระหว่างแบบ (Plug flow) กับการไหลย้อนกลับ (Backmix flow) ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 F-diagram สำหรับก๊าซฟลูอิดไดซ์ เบด

Danckwerts และผู้ร่วมงาน[22] ได้ทำการทดลองรวมกับอนุภาคของแข็งที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและพบลักษณะการไหลของก๊าซคล้ายกับการไหลย้อนกลับ ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 C และ F diagram สำหรับก๊าซฟลูอิดไดซ์เบดทดลอง โดย Danckwerts และผู้ร่วมงาน