



บทที่ 3

ฟลูอิด เซชัน

ฟลูอิด เซชัน เป็นการปฏิบัติการแบบหนึ่งซึ่งทำให้เม็ดของแข็งที่บรรจุอยู่ภายในคอลัมน์ และวางอยู่บนตะแกรง เปลี่ยนสถานะจาก เม็ดของแข็งที่อยู่นิ่ง เป็น เม็ดของแข็งที่มีสถานะคล้ายของไหล เมื่อมีของไหลไหลสัมผัสผ่าน เม็ดของแข็งในคอลัมน์นั้น⁽²⁶⁾ บริเวณที่เม็ดของแข็งครอบครอง อยู่ภายในคอลัมน์นั้นนิยม เรียกว่า เบด (Bed) ลักษณะปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นได้โดยอัดของไหล ที่มีทิศทางการไหลตรงข้ามกับแรงโน้มถ่วงให้ไหลผ่านตะแกรง และไหลสัมผัสผ่าน เม็ดของแข็ง ในเบดนั้น ของไหลนี้อาจเป็นของเหลว ก๊าซ หรือของเหลวกับก๊าซก็ได้ รูปที่ 3.1 แสดงองค์ ประกอบที่เอื้ออำนวยให้เกิดฟลูอิด เซชัน

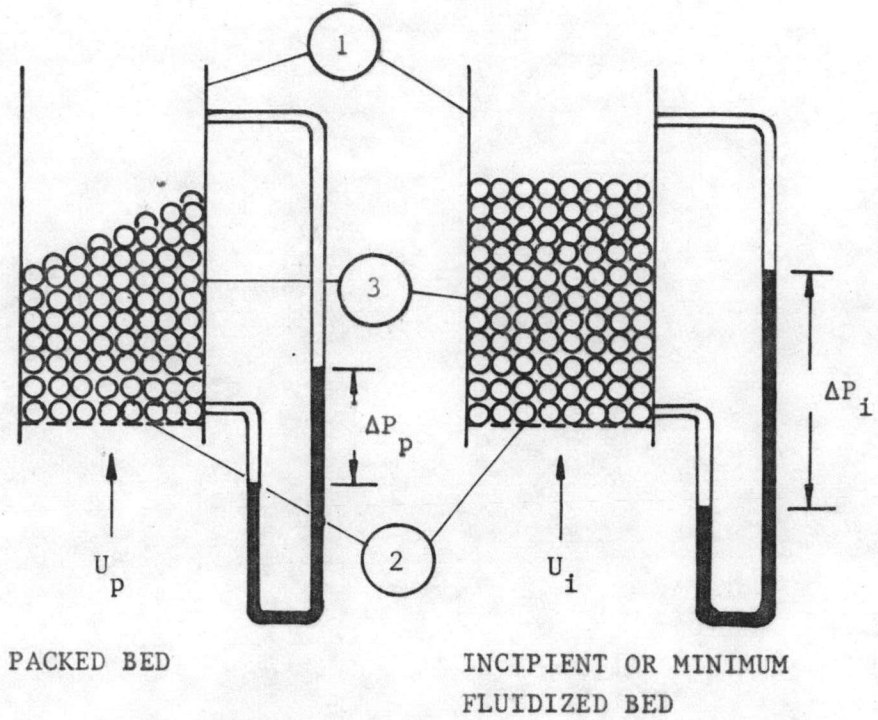
3.1 ปรากฏการณ์ฟลูอิด เซชัน

ปรากฏการณ์ฟลูอิด เซชัน เกิดขึ้นได้หลายลักษณะสอดคล้องกับความเร็วของของไหลที่ ไหลผ่านเบดของ เม็ดของแข็ง รูปที่ 3.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันตก (Pressure Drop) ภายในเบดกับความเร็วของของไหลที่ไหลผ่านเบด และรูปที่ 3.3 แสดงปรากฏการณ์ ฟลูอิด เซชันที่ความเร็วของของไหลต่าง ๆ กัน จากรูปที่ 3.2 และ 3.3 อาจสรุปปรากฏการณ์ ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นได้ดังนี้⁽²⁶⁾

3.1.1 เมื่อมีของไหลผ่านเบดด้วยความเร็วต่ำ ๆ ของไหลจะผ่านช่องว่างระหว่าง เม็ดของแข็งไปโดยไม่ทำให้เม็ดของแข็งเคลื่อนที่ เบดในลักษณะนี้เรียกว่า เบดนิ่ง (Fixed Bed)

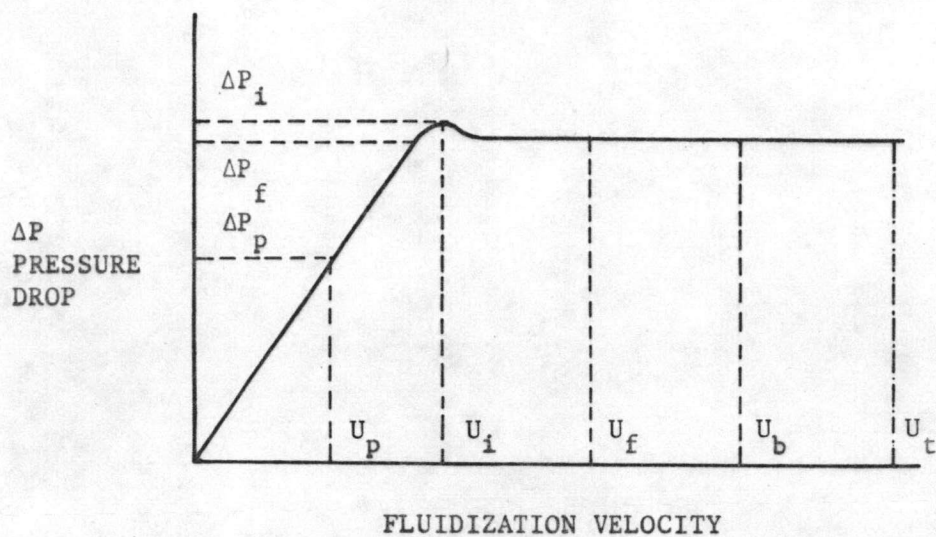
3.1.2 เมื่อความเร็วของของไหลสูงขึ้นอีก เม็ดของแข็งจะเคลื่อนตัวห่างออกจากกัน และมีบางส่วนเคลื่อนไหวในขอบเขตจำกัด ลักษณะนี้เรียกว่า เบดขยายตัว (Expanded Bed)

3.1.3 เมื่อเพิ่มความเร็วของของไหลขึ้นอีกจนถึงจุด ๆ หนึ่ง ซึ่งแรงเสียดทาน ระหว่างเม็ดของแข็งกับของไหลสมดุลกับน้ำหนักของเม็ดของแข็ง และแรงกระทำระหว่าง เม็ด ของแข็งในแนวตั้งลดหายไป เม็ดของแข็งที่ประกอบกันเป็น เบดจะลอยตัว เป็นอิสระ แรงกระทำ เนื่องจากความดันตกระหว่างหน้าตัดใดๆของเบดจะ เท่ากับน้ำหนักของของไหล และ เม็ดของแข็ง-



- 1 ภาชนะรูปทรงต่าง ๆ กัน เช่น ทรงกระบอก นิยมเรียกว่าคอลัมน์
- 2 แผ่นกระจายของไหล (Distributor)
- 3 เม็ดของแข็งที่ประกบกันเป็นเบด

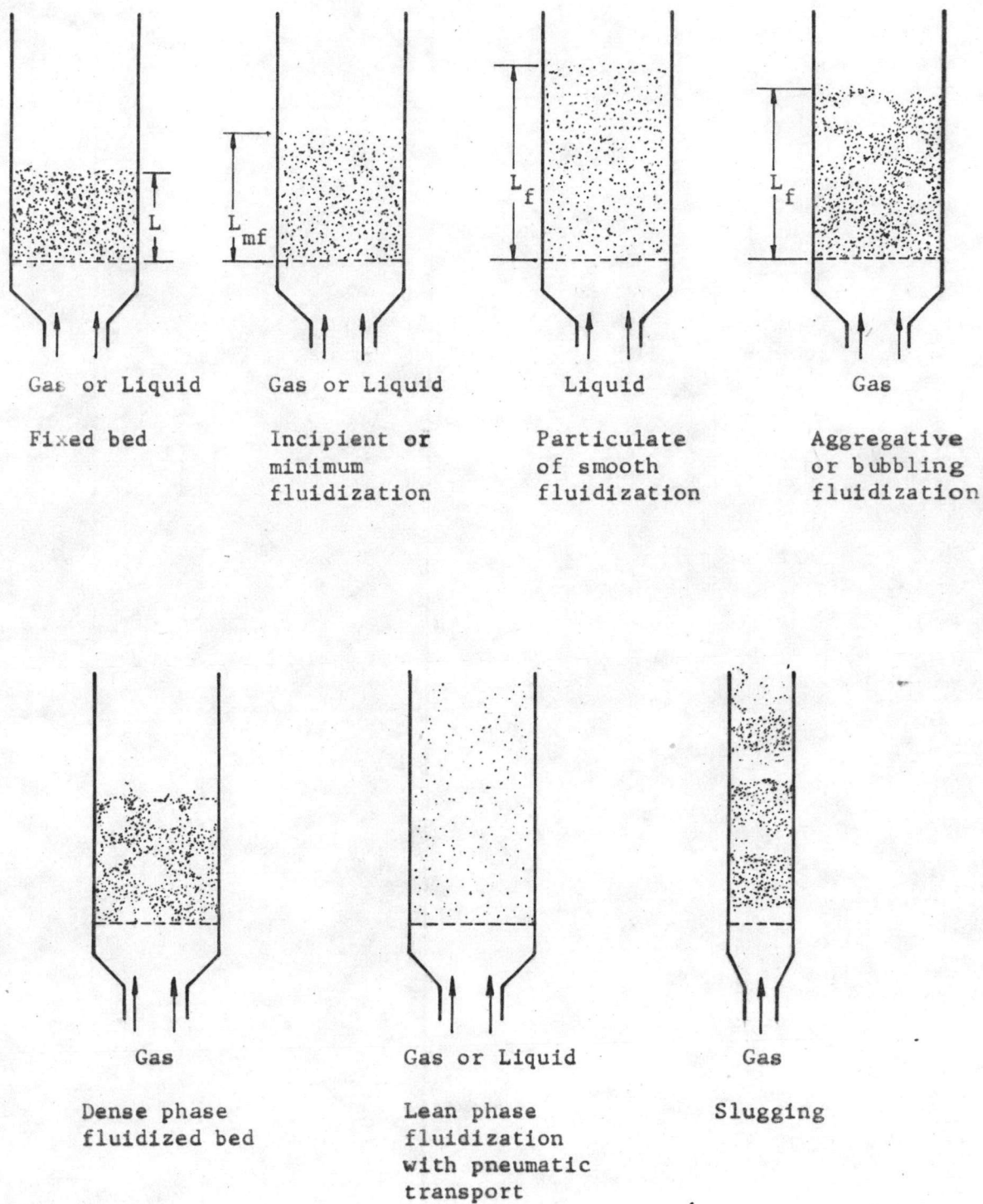
รูปที่ ๑.๑ แสดงองค์ประกอบที่เอื้ออำนวยให้เกิดฟลูอิดไลเซชัน



- U_p = Fluidization velocity for Packed Bed
- U_i = Fluidization velocity for Incipient Fluidized Bed
- U_f = Fluidization velocity for Fluidized Bed
- U_b = Fluidization velocity for Bubbling Fluidized Bed
- U_t = Fluidization velocity for Transported Bed

รูปที่ 3.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันตก (Pressure Drop)

กับความเร็วของของไหลที่ไหลผ่านเบด



รูปที่ 3.3 แสดงปรากฏการณ์ฟลูอิดเซชันที่ความเร็วของของไหลต่าง ๆ กัน

ระหว่างหน้าตัดนั้นๆ เบดในสภาพเช่นนี้เป็นเบดเพิ่งเริ่มฟลูอิดไรซ์ เรียกเบดในลักษณะนี้ว่า อินซิ-
เพียนฟลูอิดไรซ์เบด (Incipiently Fluidized Bed) หรือเบดที่สภาพฟลูอิดไรซ์ขั้นต่ำสุด

3.1.4 เมื่อความเร็วของของไหลเลยจุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไรซ์ เม็ดของแข็ง
จะเคลื่อนตัวห่างกันมากขึ้น และเริ่มมีฟองก๊าซ (Gas Bubbles) เกิดขึ้น เม็ดของแข็งเริ่ม
ไหลหมุนเวียนดียิ่งขึ้น เมื่อความเร็วของของไหลสูงขึ้นอีกการผสมผสานและการไหลหมุนเวียน
ของเม็ดของแข็งจะรุนแรงยิ่งขึ้น เบดในลักษณะนี้เรียกว่า บับบลิ้งฟลูอิดไรซ์เบด (Bubbling
Fluidized Bed) ส่วนของเบดที่ไม่รวมฟองก๊าซเรียกว่า อิมัลชันเฟส (Emulsion Phase)

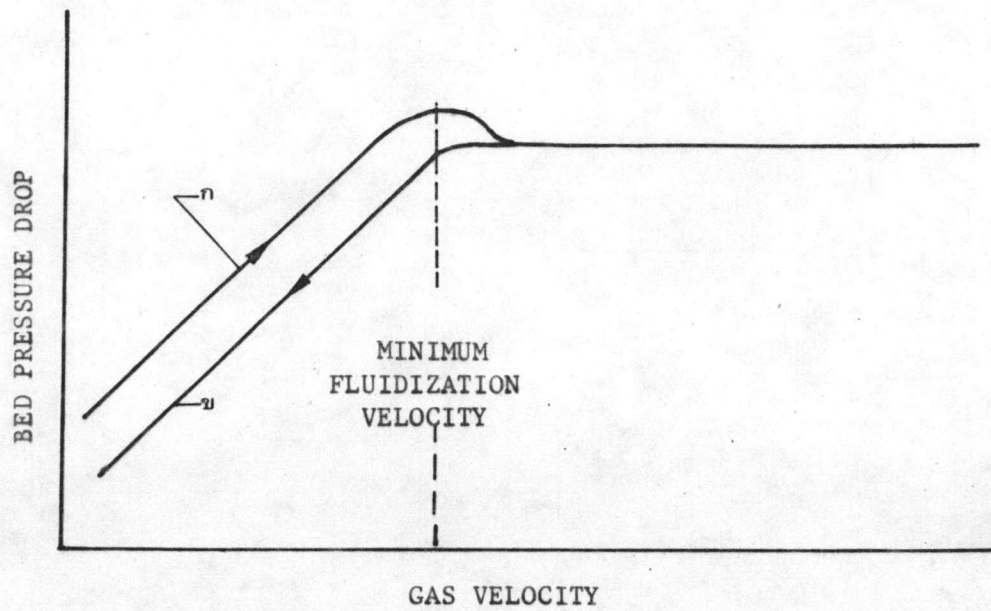
3.1.5 ฟลูอิดไรซ์เบดที่ยังสามารถบ่งบอกระดับผิวหน้าของเบดได้นิยมเรียกว่า ฟลู-
อิดไรซ์เบดแบบหนาแน่น (Dense Phase Fluidized Bed) อย่างไรก็ตามเมื่อความเร็วของ
ของไหลสูงเกินกว่าความเร็วเริ่มหลุดลอยของเม็ดของแข็ง (Terminal Velocity) เม็ดของ
แข็งจะหลุดลอยไปกับกระแสการไหลของของไหล สถานะนี้เรียกว่าฟลูอิดไรซ์เบดแบบเจือจาง
(Lean Phase Fluidized Bed) หรือการขนถ่ายด้วยของไหล (Pneumatic or Hydraul-
ic Transport)

3.2 ความเร็วต่ำสุดของของไหลที่ทำให้เกิดฟลูอิดไรซ์ (U_{mf})

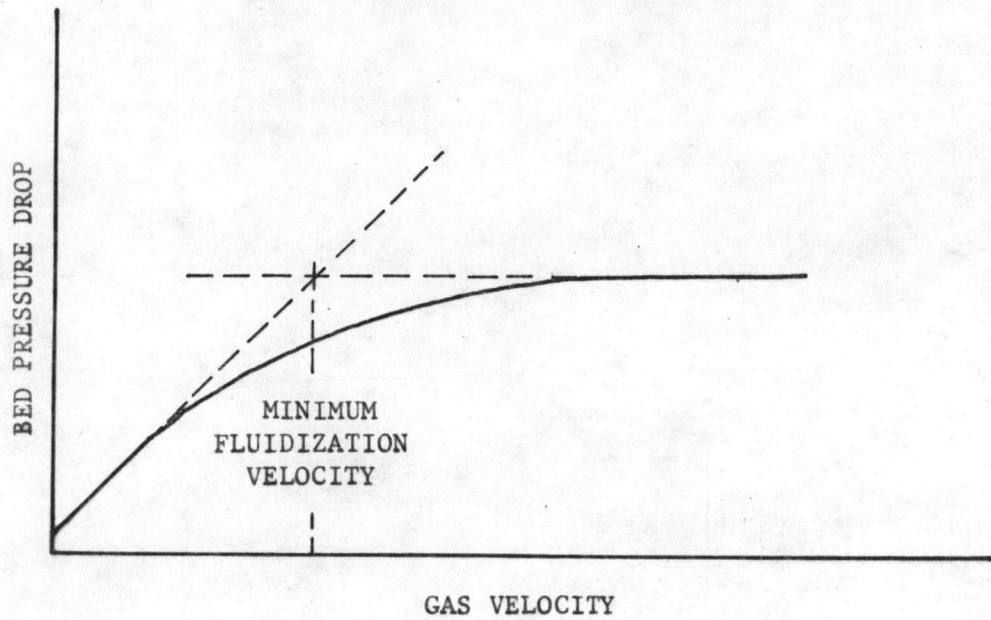
การหาความเร็วดังกล่าวนี้สามารถทำได้ 2 วิธี คือ วิธีการทดลอง และวิธีการคำนวณ

3.2.1 วิธีการทดลอง

ทำการทดลองและบันทึกค่าความเร็วของของไหลที่ไหลผ่านเบดและค่าความ
ดันตกในเบด แล้วนำมาพลอตกราฟในกระดาษกราฟลอก-ลอก ค่าของ U_{mf} สามารถหาได้จาก
กราฟดังแสดงในรูปที่ 3.4 และ 3.5 รูปที่ 3.4 นั้นเป็นการทดลองของเม็ดของแข็งที่มีขนาดใกล้เคียงกัน
จะสังเกตเห็นว่าเส้นกราฟมีความแตกต่างระหว่างขณะเพิ่มและลดความเร็วของของไหล
เส้นกราฟขณะเพิ่มความเร็วเส้น ก. ในบริเวณที่ใกล้เคียงกับความเร็ว U_{mf} ความดันในเบดจะ
โคดสูงขึ้น (Bump) เนื่องจากในช่วงนี้จะต้องใช้แรงดันมากเป็นพิเศษในการเอาชนะแรงยึด
เหนี่ยวระหว่างเม็ดของแข็งให้แยกออกจากกัน เมื่อเกิดการจัดเรียงตัวเรียบร้อยแล้วความดัน
ตกจะค่อย ๆ ลดลงและคงที่ตลอดในช่วงความเร็วของของไหลช่วงหนึ่ง



รูปที่ 3.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกภายในเบดกับความเร็วของของไหล
ที่ไหลผ่านเบด เมื่อเม็ดของแข็งมีขนาดใกล้เคียงกัน



รูปที่ 3.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกภายในเบดกับความเร็วของของไหล
ที่ไหลผ่านเบด เมื่อเม็ดของแข็งมีการกระจายขนาดที่ดี

สำหรับเส้นกราฟขณะลดความเร็วลงนั้น (เส้น ข.) ในช่วงที่ความเร็วเกินกว่าความเร็ว U_{mf} เส้นกราฟจะใกล้เคียงกับเส้น ก. แต่ในช่วงหลังเส้น ข. จะขนานกับเส้น ก. ความดันตกขณะลดความเร็วจะมีค่าน้อยกว่า ทั้งนี้เป็นเพราะขณะที่เบคเปลี่ยนจากฟลูอิดซ์เบคเข้าสู่เบคหนึ่งนั้น เม็ดของแข็งจะเกิดการจัดเรียงตัวเองแล้วทำให้ไม่ต้องสูญเสียพลังงานในการจัดช่องว่างในเบคให้เป็นระเบียบอีก และถ้าทำการทดลองซ้ำในเบคเดิมอีก เส้นกราฟขณะเพิ่มความเร็วของของไหลจะใกล้เคียงกับเส้น ข. ขณะลดความเร็วในการทดลองครั้งแรก

สำหรับเม็ดของแข็งที่มีการกระจายขนาดที่ดี (Size Distribution) ลักษณะของกราฟที่ได้จะรวมเรียกว่า ดังรูปที่ 3.5

3.2.2 วิธีการคำนวณ

ขณะที่เม็ดของแข็ง เริ่มลอยตัว เป็นอิสระนั้นแสดงว่า เม็ดของแข็งกำลังอยู่ในสมดุลย์ของแรง ซึ่งได้แก่แรงที่เกิดจากน้ำหนักของเม็ดของแข็ง แรงพยุงของของไหล (Bouyance Force) และแรงต้านทานการไหล (Drag force)⁽²⁶⁾ อาจเขียนสมการสมดุลย์ของแรงต่าง ๆ ได้ดังนี้

$$\left[\begin{array}{c} \text{แรงพยุง} \\ \text{ของของไหล} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{แรงต้านทาน} \\ \text{การไหล} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{น้ำหนักของเม็ด} \\ \text{ของแข็งในเบค} \end{array} \right] \dots\dots\dots 3.1$$

หรือ

$$\Delta P \cdot A_b = (A_b \cdot L_{mf}) (1 - \epsilon_{mf}) (\rho_s - \rho_g) \frac{g}{g_c} \dots\dots\dots 3.2$$

จัด เทอมใหม่

$$\frac{\Delta P}{L_{mf}} \cdot g_c = (1 - \epsilon_{mf}) (\rho_s - \rho_g) g \dots\dots\dots 3.3$$

Ergun⁽⁴³⁾ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันตก (ΔP) ในเบคหนึ่งกับความเร็วของของไหลที่ไหลผ่านเบคและขนาดของเม็ดของแข็งโดยสมการ

$$\frac{\Delta P}{L} \cdot g_c = \frac{150 (1 - \epsilon_m)^2 \mu U_o}{\epsilon_m^3 (\phi_{s,p} d_p)^2} + \frac{1.75 (1 - \epsilon_m) \rho_g U_o^2}{\epsilon_m^3 \phi_s d_p} \dots\dots 3.4$$

เทอมแรกด้านขวามือของสมการที่ 3.4 เป็นการสูญเสียความดันเนื่องจากผลของความเสียดทาน เทอมที่สอง เป็นผลของการสูญเสียพลังงานจลน์ ที่ $Re_p < 20$ ผลของแรงเสียดทานจะมีมากกว่า

ดังนั้นสมการ 3.4 สามารถละทิ้ง เทอมที่สองได้เป็น

$$\frac{\Delta P}{L} \cdot g_c = \frac{150 (1 - \epsilon_m)^2 \mu U_o}{\epsilon_m^3 (\phi_s d_p)^2} \dots\dots\dots 3.4.1$$

ที่ $Re_p > 1,000$ ผลของการสูญเสียพลังงานจลน์จะมีค่ามากกว่า สมการที่ 3.4 จะยุบเหลือ

$$\frac{\Delta P}{L} \cdot g_c = \frac{1.75 (1 - \epsilon_m) \rho_g U_o^2}{\epsilon_m^3 \phi_s d_p} \dots\dots\dots 3.4.2$$

ซึ่งสมการของ Ergun นี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในสมการที่ 3.3 ได้ เมื่อเบคอยู่ที่จุดเริ่ม ฟลูอิดเซชัน เมื่อแทนค่าสมการ 3.4 ลงในสมการ 3.3 จะได้

$$\frac{1.75}{\phi_s \epsilon_{mf}^3} \left[\frac{d_p U_{mf} \rho_g}{\mu} \right]^2 + \frac{150 (1 - \epsilon_{mf}) (d_p U_{mf} \rho_g)}{\phi_s^2 \epsilon_{mf}^3 \mu} = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} \dots\dots\dots 3.5$$

ที่ $Re_p < 20$ และ เม็ดของแข็งมีขนาดเล็ก ๆ แทนค่าสมการ 3.4.1 ในสมการ 3.3 แล้วหาค่า U_{mf} จะได้

$$U_{mf} = \frac{(\phi_s d_p)^2}{150} \cdot \frac{\rho_s - \rho_g}{\mu} \cdot g \cdot \frac{\epsilon_{mf}^3}{1 - \epsilon_{mf}} \dots\dots\dots 3.6$$

สำหรับเม็ดของแข็งขนาดใหญ่และ $Re_p > 1,000$ แทนค่าสมการ 3.4.2 ในสมการ 3.3 แล้วหาค่า U_{mf} จะได้

$$U_{mf} = \left[\frac{\phi_s d_p}{1.75} \cdot \frac{\rho_s - \rho_g}{\rho_g} \cdot g \cdot \epsilon_{mf}^3 \right]^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots 3.7$$

ถ้าไม่ทราบค่าของ ϵ_{mf} และ ϕ_s , Wen และ Yu⁽⁴⁴⁾ แนะนำให้ใช้สมการดังต่อไปนี้

$$\frac{1}{\phi_s \epsilon_{mf}^3} \approx 14 \dots\dots\dots 3.8$$

$$\frac{1 - \epsilon_{mf}}{\phi_s^2 \epsilon_{mf}^3} \approx 11 \dots\dots\dots 3.9$$

แทนค่าสมการ 3.8 และ 3.9 ลงในสมการ 3.5 แล้วหาค่า U_{mf} จะได้

$$U_{mf} = \frac{\mu}{d_p \rho_g} \left[\left\{ (33.7)^2 + \frac{0.0408 d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu} \right\}^{\frac{1}{2}} - 33.7 \right] \quad \dots\dots\dots 3.10$$

จากข้อมูลการทดลอง 284 ข้อมูล พบว่าสมการ 3.10 มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน $\pm 34\%$ ในช่วง Re_p ตั้งแต่ 0.001 ถึง 4,000

3.3 ความเร็วเริ่มหลุดลอยหรือความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็ง (U_t)

อัตราการไหลของของไหลที่ไหลผ่านฟลูอิดซ์เบดถูกจำกัดด้วยความเร็ว U_{mf} และความเร็ว U_t ความเร็ว U_t นี้สามารถหาได้จากวิธีการของกลศาสตร์ของไหล ซึ่งแสดงไว้ดังสมการ

$$U_t = \left[\frac{4g \cdot d_p (\rho_s - \rho_g)}{3\rho_g C_d} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \dots\dots\dots 3.11$$

โดยที่ C_d เป็นค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ซึ่งหาได้จากการทดลอง

จากการทดลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานขึ้นอยู่กับค่า Re_p ดังแสดงในสมการ

$$C_d = \frac{24}{Re_p} \quad \text{เมื่อ } Re_p < 0.4 \quad \dots\dots 3.12$$

$$C_d = \frac{10}{Re_p^{\frac{1}{2}}} \quad \text{เมื่อ } 0.4 < Re_p < 500 \quad \dots\dots 3.13$$

$$C_d = 0.43 \quad \text{เมื่อ } 500 < Re_p < 200,000 \quad \dots\dots 3.14$$

แทนค่าของ C_d จากสมการ 3.12, 3.13 และ 3.14 ลงในสมการ 3.11 แล้วหาค่า U_t จะได้

$$U_{t,\text{spherical}} = \frac{g(\rho_s - \rho_g)d_p^2}{18\mu} \quad \text{เมื่อ } Re_p < 0.4 \quad \dots 3.15$$

$$U_{t,\text{spherical}} = \left[\frac{4(\rho_s - \rho_g)^2 g^2}{225 \rho_g \mu} \right]^{\frac{1}{3}} d_p \quad \text{เมื่อ } 0.4 < Re_p < 500 \quad \dots 3.16$$

$$U_{t,\text{spherical}} = \left[\frac{3.1g(\rho_s - \rho_g)d_p}{\rho_g} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{เมื่อ } 500 < Re_p < 200,000 \quad \dots 3.17$$

เพื่อหลีกเลี่ยงมิให้เม็ดของแข็งหลุดลอยออกจากเบด ความเร็วของของไหลที่ใช้ในระบบฟลูอิดิซเบดจะต้องมีค่าอยู่ระหว่างความเร็ว U_{mf} และความเร็ว U_t ในการหาความเร็ว U_{mf} ขนาดของเม็ดของแข็งจะใช้ค่าเฉลี่ยของเม็ดของแข็ง เนื่องจากเม็ดของแข็งมีการกระจายขนาด สำหรับการคำนวณความเร็ว U_t จะใช้ขนาดของเม็ดของแข็งที่เล็กที่สุดที่ปะปนอยู่ในเบด