หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ฟลูอิไดเซชัน (Fluidization)

<u>ปรากฏการณ์ของฟลูอิไดเซชัน</u> (8)

เมื่อผ่านของไหลผ่านเบดของอนุภาคของแข็ง เช่นที่แสดงในรูปที่ 2.1 ขณะที่อัตราการไหลของของไหลต่ำ ของไหลจะไหลผ่านช่องว่างระหว่างอนุภาคที่หยุดนิ่ง เรียกเบดแบบนี้ว่าฟิกส์เบด (fixed bed)

เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของของไหล อนุภาคจะเริ่มเคลื่อนไหวออกจากกัน และจะมีอนุภาคบางอนุภาคสั่นและเคลื่อนไหวในบริเวณที่จำกัด เรียกว่าเป็นเบดที่ขยายตัว (expanded bed)

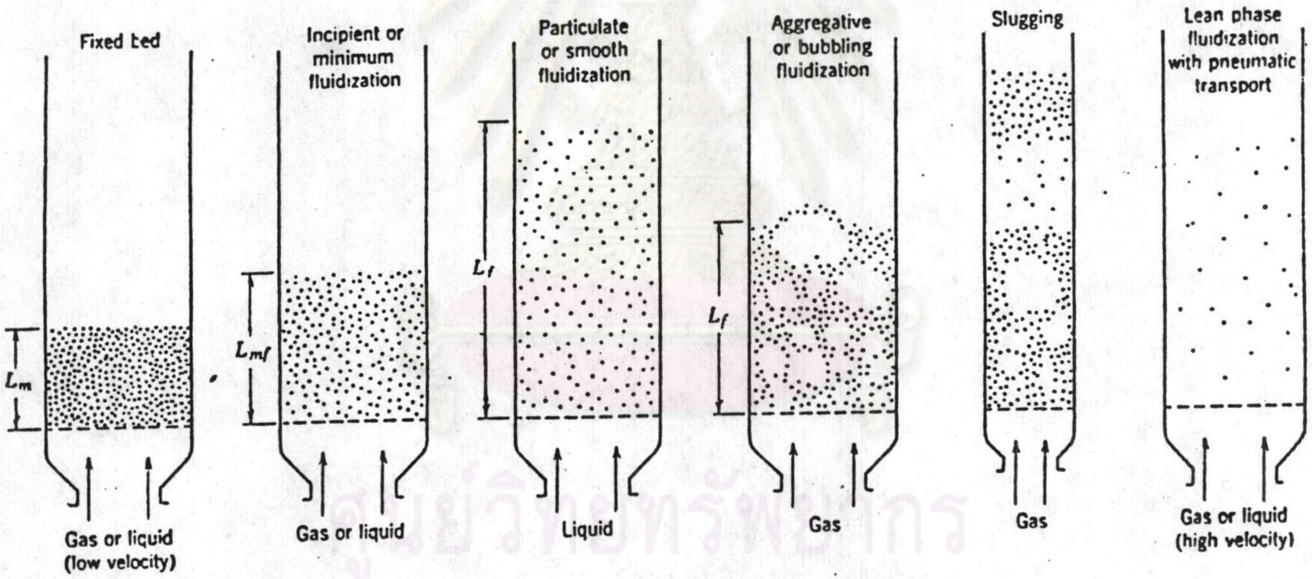
หากเพิ่มความเร็วของของไหลให้สูงขึ้นไปอีก ก็จะถึงจุดหนึ่งซึ่งอนุภาคเริ่มแขวน-ลอยในของไหลที่ไหลผ่านขึ้นไป ที่จุดนี้แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคและของไหลจะสมดุลย์พอดีกับน้ำหนักของอนุภาค ไม่มีแรงกดในแนวดิ่งระหว่างอนุภาคที่อยู่ติดกัน และความดันลด (pressure drop) ในแต่ละช่วงของเบดจะเท่ากับน้ำหนักของของไหลและอนุภาคในช่วงนั้น ที่จุดนี้เรียกว่าจุดฟลูอิไดเซชันต่ำสุด (minimum fluidization)

ในระบบที่ของไหลเป็นของเหลว การเพิ่มอัตราการไหลให้มากกว่าอัตราการไหลที่จุดฟลูอิไดเซชันต่ำสุด มักจะทำให้เบดมีการขยายตัวอย่างสม่ำเสมอ เบดชนิดนี้เรียกว่าฟลูอิไดซ์เบดแบบสม่ำเสมอ (smoothly fluidized bed)

ในระบบที่ของไหลเป็นก๊าซ การเพิ่มอัตราการไหลให้มากกว่าอัตราการไหลที่จุดฟลูอิไดเซชันต่ำสุด จะทำให้เกิดความไม่เสถียร โดยการเกิดฟองก๊าซ (bubbling) และช่องทาง (channeling) ของก๊าซไหลอย่างสะดวก เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น การ-กวนจะยิ่งรุนแรง และอนุภาคของแข็งจะเคลื่อนไหวอย่างรุนแรง นอกจากนี้เบดจะไม่ขยายตัวมากกว่าที่จุดฟลูอิไดเซชันต่ำสุดมากนัก เบดแบบนี้เรียกว่าฟลูอิไดซ์เบดแบบมีฟองก๊าซ (bubbling fluidized bed)

มีบางกรณีที่ระบบซึ่งของไหลเป็นของเหลวไม่ฟลูอิไดซ์อย่างสม่ำเสมอ และมีบาง

รูปที่ 2.1 แสดงปรากฏการณ์ของฟลูอิไดเซชัน



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กรณีที่ระบบซึ่งของไหลเป็นก๊าซไม่ฟลูอิไดซ์แบบมีฟองก๊าซ

ฟลูอิไดซ์เบดจะเรียกว่าเป็นฟลูอิไดซ์เบดแบบเฟสหนาแน่น (dense-phase fluidized bed) ถ้าเบดยังคงมีขอบเขตที่ผิวบนของเบด แต่เมื่อเพิ่มความเร็วของของไหลจนมากกว่าความเร็วสุดท้าย (terminal velocity) ของอนุภาค ผิวบนของเบดจะหายไป โดยที่อนุภาคจะไหลออกไปตามของไหล ในสภาวะเช่นนี้เรียกว่าเป็นฟลูอิไดซ์เบดแบบเฟสเจือจาง (dilute-phase fluidized bed)

<u>ข้อดีและข้อเสียของระบบแบบฟลูอิไดซ์เบดสำหรับการปฏิบัติการในโรงงานอุตสาหกรรม</u>

ข้อดีของฟลูอิไดเซชันพอจะสรุปได้ดังนี้

1. อนุภาคของของแข็งสามารถไหลได้อย่างสม่ำเสมอ ทำให้สามารถถูกส่งถ่ายได้ง่าย

2. การผสมกันอย่างดีของของแข็งทำให้เตาปฏิกรณ์เคมีมีอุณหภูมิสม่ำเสมอทั่วทั้งเตาปฏิกรณ์เคมี ทำให้ควบคุมอุณหภูมิได้ง่าย

3. การไหลเวียนระหว่างฟลูอิไดซ์เบดสองอันทำให้สามารถส่งผ่านความร้อนปริมาณมากที่ผลิตได้ หรือที่ต้องการใช้ในเตาปฏิกรณ์เคมีขนาดใหญ่

4. เหมาะสำหรับการปฏิบัติการขนาดใหญ่

5. อัตราการส่งผ่านความร้อนและมวลระหว่างก๊าซและอนุภาคสูง

6. อัตราการส่งผ่านความร้อนระหว่างเบดและวัตถุที่จุ่มอยู่ในเบดสูง ทำให้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในฟลูอิไดซ์เบดต้องการพื้นที่ผิวน้อย

ระบบแบบฟลูอิไดซ์เบดมีข้อเสียดังต่อไปนี้

1. อธิบายการไหลของก๊าซได้ยาก อาจเป็นการไหลแบบปลั๊ก (plug flow) หรือการเกิดเป็นฟองก๊าซ

2. การผสมอย่างดีของของแข็งในเบดทำให้เวลาเรซิเดนซ์ (residence time) ของของแข็งแต่ละอนุภาคไม่เท่ากัน สำหรับการปฏิบัติการที่ต้องการของแข็งเป็นผลิตภัณฑ์ เช่นการทำให้แห้ง ในระบบแบบต่อเนื่องจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติไม่สม่ำเสมอ แต่ในระบบที่เป็นแบบแบทช์ (batch) ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีคุณสมบัติสม่ำเสมอ

3. อาจมีของแข็งที่ติดไปกับก๊าซ ทำให้ต้องมีการนำเข้าไปใหม่เพื่อชดเชย

ส่วนที่เสียไป

4. เกิดการเสียดสีของอนุภาคกับผนัง ก่อให้เกิดปัญหาการสึกกร่อน

5. สำหรับการปฏิบัติการที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูง จะเกิดการรวมตัวกันและซินเทอริง (sintering) ของอนุภาคเล็กๆ ซึ่งอาจทำให้ต้องใช้อุณหภูมิต่ำลง ซึ่งจะลดอัตราเร็วของปฏิกิริยา

<u>การหาความเร็วของของไหลที่จุดฟลูอิไดเซชันต่ำสุด</u> (8)

ความดันลด (pressure drop) ของฟิกส์เบดสำหรับของแข็งที่มีขนาดเท่ากันสามารถหาได้จาก (6)

$$\frac{\Delta P}{L} g_c = 150 \frac{(1-\epsilon_m)^2}{\epsilon_m^3} \frac{\mu u_o}{(\phi_s d_p)^2} + 1.75 \frac{1-\epsilon_m}{\epsilon_m^3} \frac{\rho_g u_o^2}{\phi_s d_p} \quad \ldots(2.1)$$

โดยที่ ΔP = ความดันลด, กรัม-นน./ตร.ซม.

L = ความสูงของเบด, ซม.

g_c = 980 กรัม.ซม./(กรัม-นน.)(วินาที)^2

ϵ_m = เศษส่วนของที่ว่าง

μ = ความหนืดของของไหล, กรัม.ซม./วินาที

u_o = ความเร็วซุปเปอร์ฟิเชียล (superficial velocity) ของของไหล, ซม./วินาที

d_p = เส้นผ่าศูนย์กลางของทรงกลมที่มีปริมาตรเท่ากับปริมาตรของอนุภาค, ซม.

$$\phi_s = \frac{\text{พื้นที่ผิวของทรงกลมที่มีปริมาตรเท่าปริมาตรของอนุภาค}}{\text{พื้นที่ผิวของอนุภาค}}$$

ความดันลดในสมการที่ 2.1 ประกอบด้วยปัจจัย (factor) สองปัจจัย คือ พลังงานที่สูญเสียเนื่องจากความหนืด (viscous energy losses) และพลังงานสูญเสียเนื่องจากไคเนติก (kinetic energy losses)

ที่เรโนลด์นัมเบอร์ (Renolds number) ต่ำๆ พลังงานจะสูญเสียไปเนื่องจากความหนืดเป็นหลัก จึงสามารถลดสมการลงเหลือเพียง

$$\frac{\Delta P}{L} g_c = 150 \frac{(1-\epsilon_m)^2}{\epsilon_m^3} \frac{\mu u_o}{(\phi_s d_p)^2} \qquad ....(2.2)$$

เมื่อเรโนลด์นัมเบอร์ $\quad Re_p = \frac{d_p \rho_g u_o}{\mu} < 20$

เมื่อเรโนลด์นัมเบอร์มีค่าสูง จะคิดเฉพาะพลังงานสูญเสียเนื่องจากไคเนทิก สมการที่ 2.1 จึงเหลือเพียง

$$\frac{\Delta P}{L} g_c = 1.75 \frac{1-\epsilon_m}{\epsilon_m^3} \frac{\rho_g u_o^2}{\phi_s d_p} \qquad ....(2.3)$$

เมื่อเรโนลด์นัมเบอร์ $\quad Re_p > 1000$

สำหรับอนุภาคที่มีการกระจายของขนาด สมการที่ 2.1 จะกลายเป็น

$$\frac{\Delta P}{L} g_c \cong 150 \frac{(1-\epsilon_m)^2}{\epsilon_m^3} \frac{\mu u_o}{(\phi_s \bar{d}_p)^2} + 1.75 \frac{1-\epsilon_m}{\epsilon_m^3} \frac{\rho_g u_o^2}{\phi_s \bar{d}_p} \qquad ....(2.4)$$

โดยที่ $\bar{d}_p$ = เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาค

เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาคหาได้จาก

$$\bar{d}_p = \frac{1}{\sum^{i} (x/d_p)_i}$$

i = ช่วงของขนาดของอนุภาค

x = เศษส่วนน้ำหนักของอนุภาคที่มีขนาดในช่วง

ตัวอย่างต่อไปนี้แสดงการหาเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาคที่มีการกระจายของของขนาดดังนี้

น้ำหนักสะสม	ที่มี d_p เล็กกว่า,
0	50
60	75
150	100
270	125
330	150
360	175

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ช่วงของ d_{pi} (μ)	d_{pi} (μ)	เศษส่วนน้ำหนักในช่วง (x_i)	$(x/d_p)_i$
50-75	62.5	(60-0)/360- 0.167	0.167/62.5- 0.002668
75-100	87.5	(150-60)/360- 0.250	0.250/87.5- 0.002858
100-125	112.5	0.333	0.002962
125-150	137.5	0.167	0.001212
150-175	162.5	0.083	0.000513
			$\Sigma^i (x/d_p)_i$ = 0.010213

$$\bar{d}_p = \frac{1}{\Sigma^i (x/d_p)_i} = \frac{1}{0.010213} = 98\ \mu$$

ที่จุดฟลูอิไดเซชันต่ำสุด ความดันลดหาได้จาก

$$\frac{\Delta P}{L_{mf}} = (1 - \epsilon_{mf})(\rho_s - \rho_g)\frac{g}{g_c} \qquad ...(2.5)$$

L_{mf} = ความสูงของเบดที่จุดฟลูอิไดเซชันต่ำสุด

ϵ_{mf} = เศษส่วนของที่ว่างที่จุดฟลูอิไดเซชันต่ำสุด

ρ_s = ความหนาแน่นของอนุภาค

ρ_g = ความหนาแน่นของของไหล

ความเร็วซุปเปอร์ฟิเชียลของของไหลที่สภาวะฟลูอิไดเซชันต่ำสุด, u_{mf} หาได้จากสมการที่ 2.6 ซึ่งได้จากการรวมสมการที่ 2.1 เข้ากับสมการที่ 2.5

$$\frac{1.75}{\phi_s \epsilon_{mf}^3}\left(\frac{d_p u_{mf} \rho_g}{\mu}\right)^2 + \frac{150(1 - \epsilon_{mf})}{\phi_s^2 \epsilon_{mf}^3} \cdot \frac{d_p u_{mf} \rho_g}{\mu} = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} \qquad ...(2.6)$$

เมื่ออนุภาคมีขนาดเล็ก จากสมการที่ 2.2 และสมการที่ 2.5 จะได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$u_{mf} = \frac{(\phi_s d_p)^2}{150} \frac{\rho_s - \rho_g}{\mu} \cdot g \cdot \frac{\epsilon_{mf}^3}{1 - \epsilon_{mf}} \qquad ...(2.7)$$

เมื่อ $Re_p < 20$

สำหรับอนุภาคขนาดใหญ่ จากสมการที่ 2.3 และสมการที่ 2.5 จะได้

$$u_{mf}^2 = \frac{\phi_s d_p}{1.75} \frac{\rho_s - \rho_g}{\rho_g} g \epsilon_{mf}^3 \qquad ....(2.8)$$

เมื่อ $Re_p > 1000$

ในกรณีที่ ϵ_{mf} หรือ ϕ_s หรือทั้งสองตัวเป็นค่าที่ไม่ทราบ จะประมาณค่า

$$\frac{1 - \epsilon_{mf}}{\phi_s^2 \epsilon_{mf}^3} \cong 11$$

และ

$$\frac{1}{\phi_s \epsilon_{mf}^3} \cong 14$$

ซึ่งจะแปลงสมการที่ 2.6 ให้เป็น

$$\frac{d_p u_{mf} g}{\mu} = \left[(33.7)^2 + 0.0408 \frac{d_p^3 \rho_g(\rho_s - \rho_g)g}{\mu^2}\right]^{1/2} - 33.7 \qquad ...(2.9)$$

สำหรับอนุภาคขนาดเล็กจะได้

$$u_{mf} = \frac{d_p^2(\rho_s - \rho_g)g}{1650\,\mu} \qquad ...(2.10)$$

เมื่อ $Re_p < 20$

สำหรับอนุภาคขนาดใหญ่จะได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$u_{mf}^2 = \frac{d_p(\rho_s - \rho_g)g}{24.5\,\rho_g} \qquad ...(2.11)$$

เมื่อ $Re_p > 1000$

จากข้อมูลจำนวน 284 ข้อมูล ในช่วงเรโนลด์นัมเบอร์ 0.001 ถึง 4000 สมการที่ 9, 10 และ 11 สามารถทำนายค่า u_{mf} โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน(standard deviation) ± 34%

<u>การหาความเร็วสุดท้าย(terminal velocity)ของอนุภาค</u>

ถ้าความเร็วของของไหลที่ไหลผ่านฟลูอิไดซ์เบด มีค่ามากกว่าความเร็วสุดท้ายของอนุภาค ของไหลจะพาอนุภาคออกไปจากเบด ความเร็วสุดท้ายของอนุภาคหาได้จาก

$$u_t = \left[\frac{4gd_p(\rho_s - \rho_g)}{3\rho_g C_d}\right]^{1/2} \qquad ...(2.12)$$

โดยที่ C_d = สัมประสิทธิ์แดรก (drag coefficient)

สำหรับอนุภาคทรงกลมและไม่กลม ความเร็วสุดท้ายสามารถหาได้จากการใช้รูปที่ 2.2 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของกลุ่มไร้มิติ (dimensionless groups)

$$Re_p = \frac{d_p\rho_g u_t}{\mu} \qquad ...(2.13)$$

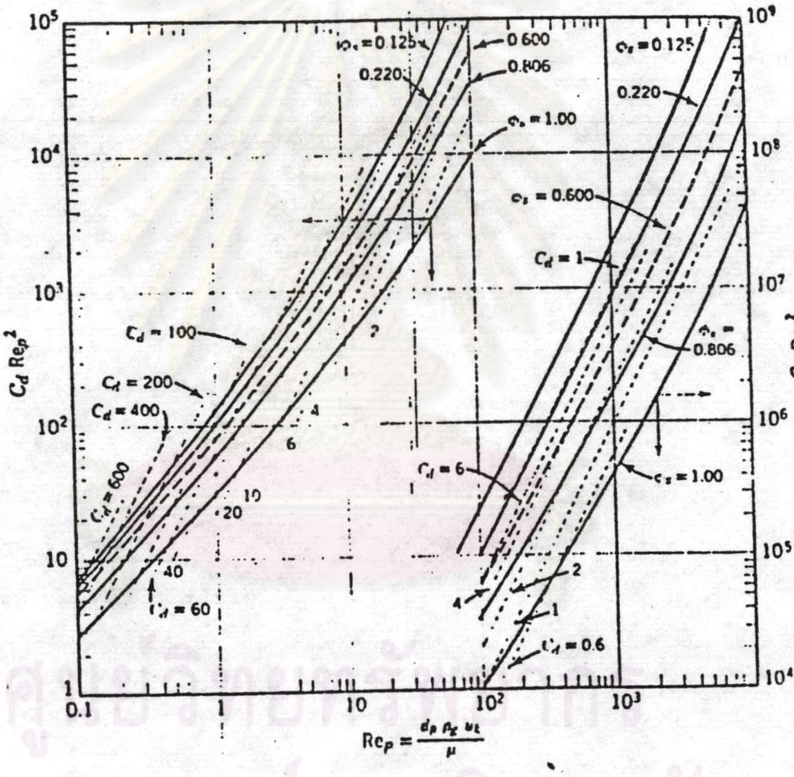
และ

$$C_dRe_p^2 = \frac{4gd_p^3\rho_g(\rho_s - \rho_g)}{3\mu^2} \qquad ...(2.14)$$

ในการหาความเร็วสุดท้าย ก่อนอื่นต้องหา $C_dRe_p^2$ จากค่าที่รู้แล้ว คือ d_p ρ_gและρ_s หลังจากนั้นใช้รูปที่ 2.2 หาค่าRe_p ที่ตรงกับ C_dRe_p ที่คำนวณได้ ก็จะได้ค่าความเร็วสุดท้ายจากสมการที่ 2.13

อีกวิธีหนึ่งสำหรับหาค่าความเร็วสุดท้ายสำหรับอนุภาคทรงกลม คือการแทนค่า C_d

รูปที่ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ของกลุ่มไร้มิติเพื่อหาความเร็วสุดท้ายของอนุภาค



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

008959

ลงในสมการที่ 2.12 โดยที่

$$C_d = \frac{24}{Re_p} \qquad Re_p < 0.4 \qquad \ldots(2.15)$$

$$C_d = \frac{10}{(Re_p)^{1/2}} \qquad 0.4 < Re_p < 500 \qquad \ldots(2.16)$$

$$C_d = 0.43 \qquad 500 < Re_p < 200,000 \qquad \ldots(2.17)$$

ดังนั้นจะได้

$$u_t = \frac{g(\rho_s - \rho_g)d_p^2}{18\mu} \qquad Re_p < 0.4 \qquad \ldots(2.18)$$

$$u_t = \left[\frac{4}{225}\frac{(\rho_s - \rho_g)^2 g^2}{\rho_g \mu}\right]^{1/3} \cdot d_p \qquad 0.4 < Re_p < 500 \qquad \ldots(2.19)$$

$$u_t = \left[\frac{3.1g(\rho_s - \rho_g)d_p}{\rho_g}\right]^{1/2} \qquad 500 < Re_p < 200,000 \qquad \ldots(2.20)$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

<u>การทำนายแบบของฟลูอิไดเซชัน</u>

การทำนายแบบของฟลูอิไดเซชันว่าเป็นแบบสม่ำเสมอ หรือเป็นแบบมีฟองก๊าซ สามารถหาได้จากกลุ่มไร้มิติ 4 กลุ่มคือ

$$Fr_{mf} \, , \, Re_{p,mf} \, , \, \frac{\rho_s - \rho_g}{\rho_g} \, , \, \frac{L_{mf}}{d_t}$$

$Fr_{mf} = \frac{u_{mf}^2}{d_p g}$ คือฟราวด์นัมเบอร์ (Froude number) ที่จุดฟลูอิไดเซชันต่ำสุด

$Re_{p,mf} = \frac{d_p u_{mf} g}{\mu}$ คือเรโนลด์นัมเบอร์ที่จุดฟลูอิไดเซชันต่ำสุด

d_t คือเส้นผ่าศูนย์กลางของเบด

ถ้า

$$(Fr_{mf})(Re_{p,mf}) \frac{\rho_s - \rho_g}{\rho_g} \frac{L_{mf}}{d_t} < 100 \qquad ...(2.21)$$

แสดงว่าเป็นฟลูอิไดเซชันแบบสม่ำเสมอ

ถ้า

$$(Fr_{mf})(Re_{p,mf}) \frac{\rho_s - \rho_g}{\rho_g} \frac{L_{mf}}{d_t} > 100 \qquad ...(2.22)$$

แสดงว่าเป็นฟลูอิไดเซชันแบบมีฟองก๊าซ

<u>การขยายตัวของเบด</u> (9)

ได้มีการศึกษาการขยายตัวของเบดเมื่อผ่านอากาศเข้าไปในเบดของลูกกลมที่ทำด้วยแก้ว ตั้งแต่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.004 นิ้ว จนถึง 0.0224 นิ้ว ในท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 นิ้ว และ 4.5 นิ้ว ผลการทดลองสามารถถูกแทนด้วยรูปที่ 2.3 ยกเว้นอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.0061 นิ้ว ในท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 นิ้ว

L_Q คือความสูงของเบดที่จุดฟลูอิไดเซชันต่ำสุด

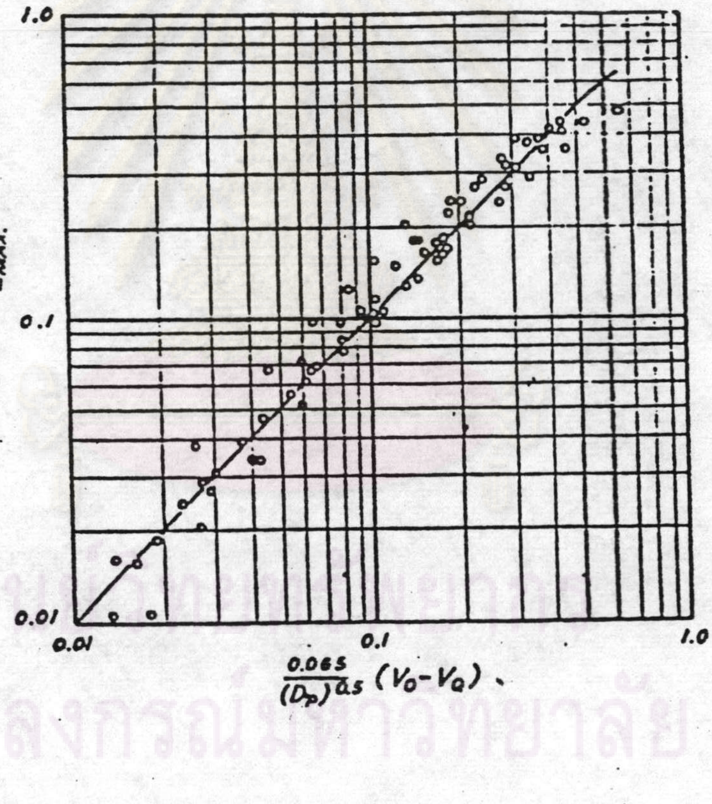
L_{max} คือความสูงสูงสุดของเบด

D_p คือเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาค มีหน่วยเป็นนิ้ว

V_o คือความเร็วซุปเปอร์ฟิเชียลของอากาศ มีหน่วยเป็นฟุตต่อวินาที

V_Q คือความเร็วซุปเปอร์ฟิเชียลที่จุดฟลูอิไดเซชันต่ำสุด มีหน่วยเป็นฟุตต่อวินาที

รูปที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์เพื่อหาการขยายตัวของเบดของลูกกลม ที่ทำด้วยแก้วเมื่อของไหลเป็นอากาศ



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย