



## บทที่ 2

### กายภาพของระบบก๊าซซิไฟแบบฟลูอิดไคซ์

#### (Physical of fluidized Gasification System)

ปรากฏการณ์ทางกายภาพที่เกิดขึ้นในขบวนการก๊าซซิไฟมีความสำคัญพอ ๆ กับปรากฏการณ์ทางเคมี สิ่งสำคัญที่ควรพิจารณาได้แก่ ความดันที่ต้องการเพื่อจะให้เกิดการไหลของสารที่ทำปฏิกิริยาและผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นผ่านชั้นของก้อนเชื้อเพลิง การเคลื่อนที่ของของไหลและอนุภาคของแข็งเพื่อให้เกิดการผสมกันโดยตรงอย่างทั่วถึง ทั้งในแนวตามความยาวและในแนวรัศมีของเครื่องปฏิกรณ์เคมี อัตราการถ่ายเทความร้อนและมวลสารที่พื้นผิวสัมผัส อิทธิพลของแพคเกจจิ้งเหล่านี้ย่อมส่งผลถึงปรากฏการณ์ทางเคมีของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น นอกจากนี้อัตราการลดลงของความดันการถ่ายเทมวลสารและความร้อนยังมีความสัมพันธ์อย่างสลับซับซ้อนต่ออุณหภูมิ ความเร็วของก๊าซ คุณสมบัติทางกายภาพของของไหลและคุณสมบัติในการเคลื่อนที่ของของไหล ความหนาแน่น ความหนืด ค่าการนำความร้อนและความสามารถในการแพร่กระจายมวลสาร ส่วนคุณสมบัติของของแข็ง ได้แก่ ความหนาแน่นโดยรวม (Bulk Density) ขนาดและปริมาณพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific Area) ปริมาตรของช่องว่าง (Void Volume) ความสามารถแพร่กระจายความร้อน (Thermal Diffusivity) และตัวแปรอื่น ๆ

#### 2.1 ปรากฏการณ์ฟลูอิดไคซ์เซชัน (13)

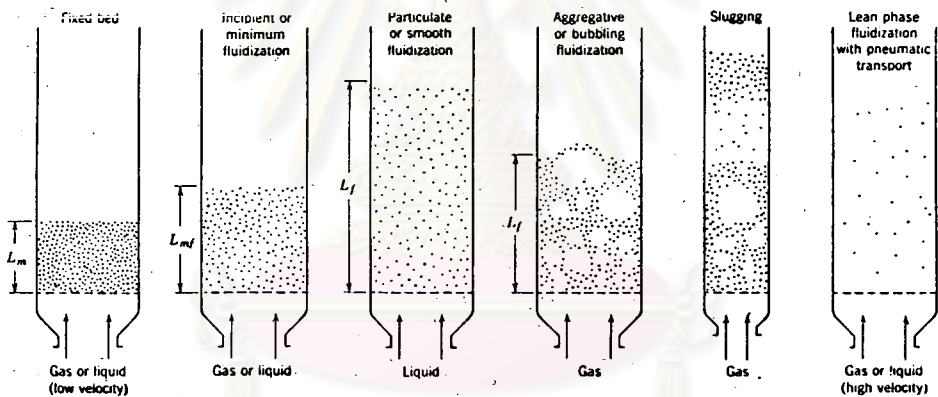
เมื่อผ่านของไหลขึ้นมาจากตอนล่างของชั้นอนุภาคของแข็งดังแสดงในรูปที่ 2.1 ที่อัตราการไหลของของไหลต่ำ ๆ ของไหลจะแทรกตัวผ่านไปตามช่องว่างระหว่างอนุภาคของแข็งที่หยุดนิ่ง จุดนี้เรียกว่า "เบด-นิ่ง" (Fixed-Bed)

เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของของไหลให้มากขึ้น อนุภาคของแข็งจะเริ่มเคลื่อนตัวออกห่างจากกัน และบางอนุภาคจะมีการสั่นและเคลื่อนตัวได้ในเนื้อที่จำกัด จุดนี้เรียกว่า "เบด-ขยาย" (Expanded-Bed) ถ้ายังคงเพิ่มความเร็วของของไหลให้มากขึ้นไปอีก จนถึงจุดหนึ่งซึ่งอนุภาคจะแทรกตัวกระจายอย่างทั่วถึง ในกระแสของของไหลที่ผ่านขึ้นมาจากตอนล่าง ที่จุดนี้แรงเนื่องจากความเสียดทานที่เกิดระหว่างของไหลและผิวของอนุภาค จะเท่ากันพอดีกับน้ำหนักของอนุภาค

โดยมีทิศทางส่วนกัน แรงกดดันในแนวตั้งระหว่างอนุภาคที่อยู่ติดกันจะหายไป และความดันลดตลอดชั้นต่าง ๆ ของเบตจะเท่ากับน้ำหนักของของไหลและของอนุภาคในช่วงชั้นนั้น ๆ ซึ่งที่จุดนี้กล่าวได้ว่า เกิดการฟลูอิดิซ หรือเรียกว่าเกิด "ฟลูอิดิซที่น้อยที่สุด" (Minimum Fluidization)

ในกรณีที่ของไหลเป็นก๊าซ เมื่อเพิ่มอัตราการไหลให้สูงกว่าที่จุดฟลูอิดิซที่น้อยที่สุดขึ้นไปอีก จะเกิดปรากฏการณ์ที่แตกต่างกัน 2 ลักษณะ คือ

1. ถ้าพื้นที่หน้าตัดของเบตมีขนาดใหญ่ ชั้นของอนุภาคจะเกิดเป็นฟองก๊าซโดยที่ชั้นอนุภาคจะขยายตัวขึ้นไม่มาก แต่จะเกิดการไหลวนผสมกันอย่างรุนแรง เรียกว่า "เบตฟลูอิดิซแบบฟองก๊าซ" (Bubbling Fluidized-Bed)

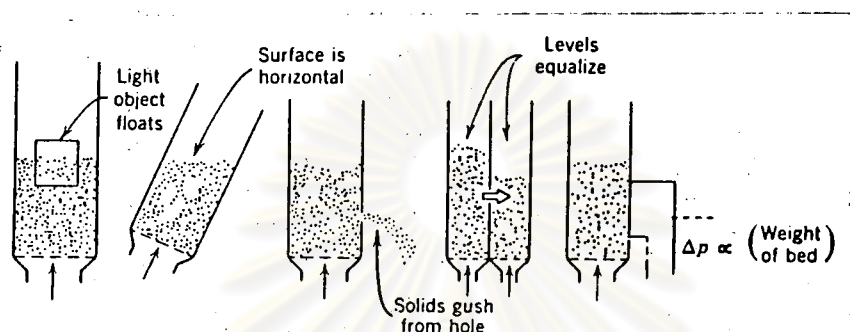


รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะปรากฏการณ์ฟลูอิดิซชนิดต่าง ๆ ของอนุภาคของแข็งด้วยของไหล

2. ถ้าขนาดพื้นที่หน้าตัดของเบตมีขนาดเล็ก ฟองก๊าซที่เกิดจะมีขนาดใหญ่ จนในที่สุดจะรวมตัวกันเท่ากับขนาดของเบต ฟองก๊าซขนาดใหญ่นี้จะทำหน้าที่อุ้มชั้นของอนุภาคที่อยู่ตอนบนให้ลอยตัวขึ้น และตกลงมาเมื่อฟองก๊าซแตกออก เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า "ปรากฏการณ์ลึกลับกึ่ง" (Slugging Phenomena)

ถ้าเพิ่มอัตราการไหลของของไหลต่อไปอีก อนุภาคของแข็งจะเกิดการไหลวนผสมกันอย่างรุนแรงยิ่งขึ้น เกิดการฟลูอิดิซมากขึ้นจนถึงจุดหนึ่ง ความเร็วของของไหลมากพอที่จะอุ้มเอาอนุภาคทั้งหมดให้ไหลตามออกไปพร้อม ๆ กับกระแสของไหล จุดนี้เรียกว่า "เบตฟลูอิดิซแบบวิฏภาคเบาบาง" (Lean-Phase Fluidized-Bed) ซึ่งนำไปใช้ในการถ่ายเทมวลสารของแข็ง

จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง รูปที่ 2.2 แสดงถึงพฤติกรรมต่าง ๆ ที่เหมือนของเหลวของระบบฟลูอิดไคซ์



รูปที่ 2.2 แสดงพฤติกรรมต่าง ๆ ที่เหมือนของเหลวของระบบฟลูอิดไคซ์

## 2.2 พฤติกรรมรวมของระบบฟลูอิดไคซ์-เบด

### (Gross Behavior of Fluidized-Bed)

ปรากฏการณ์การเคลื่อนที่ของของไหลไปตามช่องว่างของอนุภาคในระหว่างการเกิดฟลูอิดไคซ์นั้นเป็นปรากฏการณ์การเคลื่อนที่ที่ลึกลับซับซ้อนมาก ดังนั้นการศึกษาถึงอิทธิพลจากแฟกเตอร์ต่าง ๆ เช่น ขนาดอนุภาค ความหนืดของของไหล ความดันลดที่ขึ้นต่อหน่วยความสูงของเบด และความหนาแน่นของของไหล เป็นต้น เริ่มต้นจากการทดลองและศึกษาถึงปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อของไหลไหลผ่านชั้นของแข็งที่อยู่นิ่งและขนาดอนุภาคมีขนาดสม่ำเสมอ Ergun (9) ได้สรุปความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ดังนี้

$$\Delta \frac{P}{L} \cdot g_c = \frac{150(1-\epsilon_m)}{\epsilon_m^3} \frac{U_o \mu}{(\phi_s D_p)^2} + \frac{1.75(1-\epsilon_m)}{\epsilon_m^3} \frac{U_o \rho g}{\phi_s D_p} \quad (2.2.1)$$

ความดันลดในสมการที่ 2.2.1 ประกอบด้วยเทอม 2 เทอม คือ พลังงานสูญเสียเนื่อง

จากความหนืด (Viscous Energy Loss) และพลังงานสูญเสียทางจลนะ (Kinetic Energy Loss) เมื่อค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number) ต่ำ ๆ ค่าพลังงานสูญเสียเนื่องจากความหนืดก็จะมีค่ามาก ดังนั้นสมการ 2.2.1 สามารถลดรูปได้อย่างง่าย คือ

$$\Delta \frac{P}{L} \cdot g_c = \frac{150(1-\epsilon_m)^2 U_o \mu}{\epsilon_m^3 (\phi_s D_p)^2} \quad R_{ep} < 20 \quad (2.2.2)$$

ในทางตรงกันข้าม เมื่อค่าตัวเลขเรย์โนลด์สูง ๆ พลังงานสูญเสียทางเฉือนก็จะมีค่าสำคัญมาก สมการ 2.2.1 จะลดรูปเป็น

$$\Delta \frac{P}{L} \cdot g_c = \frac{1.75(1-\epsilon_m) U_o^2 \mu}{\epsilon_m^3 (\phi_s D_p)} \quad R_{ep} > 1000 \quad (2.2.3)$$

ส่วนในช่วงความเร็วกลาง ๆ สมการ 2.2.1 จะถูกใช้อธิบาย เนื่องจากพลังงานสูญเสียทั้งสองเทอมมีความสำคัญพอ ๆ กัน

พิจารณาอนุภาคของแข็งที่ลอยอยู่ในกระแสของของไหล ที่ไหลสวนทางกับแรงโน้มถ่วงของโลก ในขณะที่เกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไอส์ การที่อนุภาคสามารถลอยตัวอยู่ได้แสดงว่าเกิดสภาวะสมดุลของแรงขึ้น ดังนั้น

$$\text{Drag Force by upward Moving gas} = \text{Weight of Particle} \quad (2.2.4)$$

$$\left( \text{Pressure Drop} \right) \left( \text{Cross Sectional Area of Tube} \right) = \left( \text{Volume of Bed} \right) \left( \text{Fraction of Solid} \right) \left( \text{Specific Weight of Solid} \right) \quad (2.2.5)$$

$$\Delta P \cdot A_t = W = (A_t \cdot L_{mf}) (1-\epsilon_{mf}) (\rho_s - \rho_g) \frac{g}{g_c} \quad (2.2.6)$$

$$\frac{\Delta P}{L_{mf}} = (1-\epsilon_{mf}) (\rho_s - \rho_g) \frac{g}{g_c} \quad (2.2.7)$$

เมื่อรวมสมการ 2.2.1 เข้ากับสมการ 2.2.7 จะได้สมการทั่วไปดังนี้

$$\frac{1.75}{\phi \epsilon_{mf}^3} \left( \frac{D_p U_{mf} \rho_g}{\mu} \right)^2 + \frac{150(1-\epsilon_{mf})}{\phi^2 \epsilon_{mf}^3} \left( \frac{D_p U_{mf} \rho_g}{\mu} \right) = D_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) \cdot \frac{g}{\mu^2} \quad (2.2.8)$$

สำหรับอนุภาคขนาดเล็ก หรือมีความเร็วต่ำ ๆ สมการ 2.2.1 จะลดรูปลงเป็นสมการที่ 2.2.2

ดังนั้นสมการ 2.2.3 จะกลายเป็น

$$U_{mf} = (\phi_s D_p)^2 (\rho_s - \rho_g) \frac{g}{150\mu(1-\epsilon_{mf})} \frac{\epsilon_{mf}^3}{\mu} \quad R_{ep} < 20 \quad (2.2.9)$$

สำหรับอนุภาคขนาดใหญ่ หรือมีความเร็วสูง ๆ สมการ 2.2.1 จะลดรูปลงเป็นสมการ 2.2.3  
ดังนั้นสมการที่ 2.2.3 จะกลายเป็น

$$U_{mf}^2 = \phi_{SP} \cdot (\rho_s - \rho_g) \cdot \frac{1}{1.75\rho_g} \cdot g \cdot \epsilon_{mf} \quad Re_p > 1000 \quad (2.2.10)$$

ค่า  $\epsilon_{mf}$  และ  $\phi_s$  ของระบบมักเป็นตัวแปรที่ไม่ทราบค่า Wen และ Yu (10) ได้ทำการ  
ทดลองและเสนอความสัมพันธ์โดยทั่วไประหว่าง  $\epsilon_{mf}$  &  $\phi_s$  ดังนี้

$$\frac{1}{\phi_s \epsilon_{mf}^3} = 14 \quad \frac{1 - \epsilon_{mf}}{\phi_s^2 \epsilon_{mf}^3} = 11 \quad (2.2.11)$$

เมื่อแทนค่าสมการ 2.2.11 ลงในสมการทั่วไปที่ 2.2.3 จะได้ว่า

$$D_p \frac{U_{mf} \rho_g}{\mu} = \left\{ (33.7)^2 + 0.0408 D_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) \frac{g}{\mu} \right\}^{1/2} - 33.7 \quad (2.2.12)$$

$$U_{mf} = \frac{D_p^2 (\rho_s - \rho_g) g}{1650 \mu} \quad Re_p < 20 \quad (2.2.13)$$

$$U_{mf}^2 = \frac{D_p (\rho_s - \rho_g) \cdot g}{24.5 \rho_g} \quad Re_p > 1000 \quad (2.2.14)$$

สมการ 2.2.13 และ 2.2.14 ใช้ในการคำนวณค่าความเร็วที่จุดฟลูอิดิซันที่น้อย  
ที่สุดได้โดยประมาณ ซึ่งถ้าข้อมูลเกี่ยวกับ  $\epsilon_{mf}$  และ  $\phi_s$  สามารถทราบค่าแล้ว ควรใช้สมการ  
2.2.3 ในการคำนวณจะให้ผลที่ถูกต้องกว่า

สำหรับความเร็วของของไหลสุดท้ายที่จะเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดิซัน (Terminal Velocity of Fluidization) สามารถหาประมาณได้จากปรากฏการณ์การตกอย่างอิสระของอนุภาค (Free-Fall of Particle)

$$U_t = \left\{ \frac{4 \cdot g \cdot D_p (\rho_s - \rho_g)}{3 C_d \cdot \rho_g} \right\}^{1/2} \quad (2.2.15)$$

$$C_d \cdot Re_p^2 = \frac{4 \cdot g \cdot D_p^3 \cdot (\rho_s - \rho_g) \cdot \frac{1}{\mu^2}}{3} \quad (2.2.16)$$

สำหรับช่วงความเร็วต่าง ๆ สมการ 2.2.16 สามารถสรุปได้ดังนี้

$$C_{d,spherical} = \frac{24}{Re_p} \quad Re_p < 0.4 \quad (2.2.17)$$

$$C_{d,spherical} = \frac{10}{Re_p} \quad 0.4 < Re_p < 500 \quad (2.2.18)$$

$$C_{d,spherical} = 0.43 \quad 500 < Re_p < 200,000 \quad (2.2.19)$$

นำค่า C ในช่วงความเร็วต่าง ๆ ข้างต้นแทนลงในสมการ 2.2.15

$$U_{t,spherical} = \frac{g \cdot (\rho_s - \rho_g) \cdot D_p^2}{18\mu} \quad Re_p < 0.4 \quad (2.2.20)$$

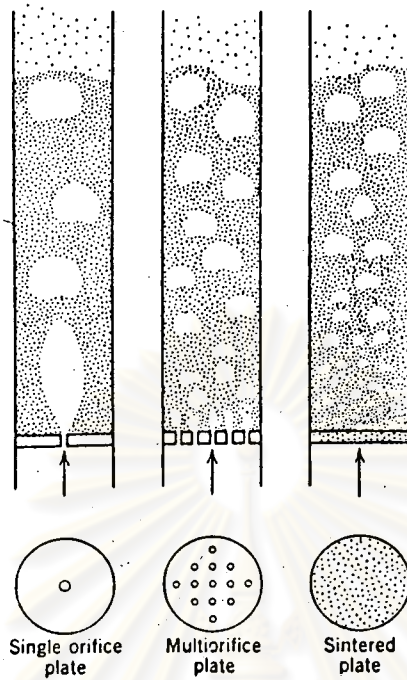
$$U_{t,spherical} = \left\{ \frac{4 \cdot (\rho_s - \rho_g) \cdot g^2}{225 \rho_g \cdot \mu} \right\}^{1/3} \cdot D_p \quad 0.4 < Re_p < 500 \quad (2.2.21)$$

$$U_{t,spherical} = \left\{ 3.1 \frac{g \cdot (\rho_s - \rho_g) \cdot D_p}{\rho_g} \right\}^{1/2} \quad 500 < Re_p < 200000 \quad (2.2.22)$$

### 2.3 การเลือกชนิดของแผ่นกระจายก๊าซ

(Choice of Distributor Type)

ลักษณะการเกิดฟองก๊าซในขณะเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไอซ์ มีผลกระทบต่ออย่างมากจากชนิดของแผ่นกระจายก๊าซที่ใช้ในระบบ พิจารณาจากรูปที่ 2.3 จะเห็นว่าเมื่อแผ่นกระจายก๊าซมีทางให้ก๊าซผ่านได้เพียงช่องทางขนาดใหญ่เพียงช่องทางเดียว ความหนาแน่นของอนุภาคภายในระบบจะมีค่าเปลี่ยนแปลงมากบ้างน้อยบ้าง ตามการเกิดฟองก๊าซภายใน โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าอัตราการไหลของก๊าซมีค่ามาก และอาจเกิดปรากฏการณ์ที่ก๊าซพยายามแทรกตัวไปตามช่องว่างระหว่างอนุภาคกับผนังของเครื่องปฏิกรณ์ หรือฟองก๊าซมีขนาดใหญ่ขึ้นจนเกือบเท่าขนาดท่อเกิดการอุดตันอนุภาคขึ้นไปตามกระแสการไหลของก๊าซ ถ้าขนาดของทางผ่านบนแผ่นกระจายก๊าซมีขนาดเล็ก และมีจำนวนมากขึ้น ในขณะอัตราการไหลของก๊าซมีค่าต่ำ ๆ แล้ว ฟองก๊าซแทบจะไม่เกิดขึ้นเลย หรือเกิดเป็นฟองขนาดเล็กกระจายอยู่ทั่วไปอย่างสม่ำเสมอ ความหนาแน่นของอนุภาคจึงค่อนข้างสม่ำเสมอ การสัมผัสกันของก๊าซและของแข็งจะมีค่ามาก โดยมีปรากฏการณ์แทรกตัวหนีของก๊าซไปตามช่องว่างของผนังที่น้อย แต่ถ้าแผ่นกระจายก๊าซเป็นตัวกลางที่มีรูพรุนขนาดเล็กมากขึ้นไปอีก ความหนาแน่นของอนุภาคในกระแสที่ไหลส่วนทางขึ้นมาจะมีความ



รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะการเกิดฟลูอิดไลซ์ชนิดต่าง ๆ เนื่องจากอิทธิพลของชนิดแผ่นกระจายก๊าซ

ลุ่ม่า ล่อมอ ฟองก๊าซเกิดขึ้นน้อยและมีขนาดเล็ก แต่ข้อเสียของแผ่นกระจายก๊าซแบบนี้ก็คือ ค่าความดันลดที่เกิดขึ้นระหว่างตอนบนและตอนล่างของแผ่นกระจายก๊าซจะมีค่าสูงมาก ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานมาก

#### 2.4 การออกแบบแผ่นกระจายก๊าซ (13)

(Design of distributor Plate)

เมื่อกระแสของก๊าซไหลมาตามท่อส่ง จนถึงตอนล่างของแผ่นกระจายก๊าซ จะเกิดความดันลด ซึ่งมีค่ามากพอที่จะทำให้ก๊าซที่ไหลผ่านรูเปิดของแผ่นกระจายมีอัตราเท่ากับอัตราการไหลของการส่งก๊าซพอดี ทำให้ก๊าซที่เข้ามาถูกจำกัดตัวกันเสียใหม่ตามลักษณะการเรียงตัวของช่องทางเปิดบนแผ่นกระจายก๊าซ

ความต้านทานเนื่องจากการจำกัดตัวใหม่ของก๊าซ จะอยู่ในรูปของการสูญเสียพลังงาน เนื่องจากการขยายตัวเมื่อก๊าซไหลผ่านช่องทางเปิดเล็ก ๆ ของแผ่นกระจายก๊าซ

Richardson (11) ได้แนะนำอัตราส่วนของการสูญเสียพลังงานเนื่องจากแผ่นกระจายก๊าซต่อการสูญเสียพลังงานเนื่องจากการขยายตัว ว่า ควรจะมีค่าเป็น 100 เท่า Agarwal et al.

(12) ได้แนะนำว่า ความดันลดที่เกิดขึ้นบนแผ่นกระจายก๊าซควรมีค่าประมาณ 10% ของความ

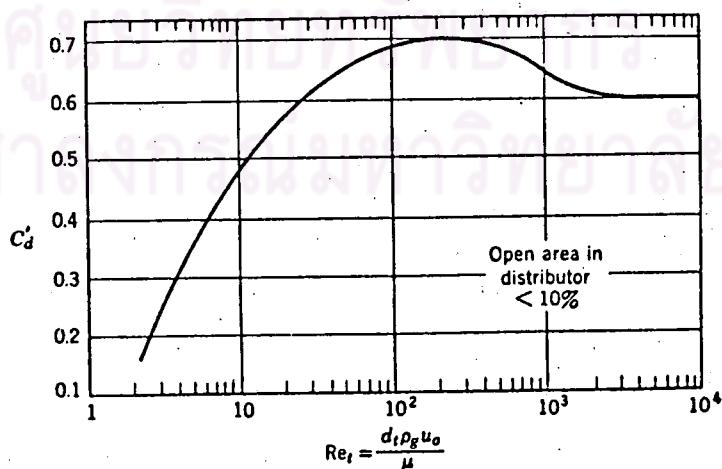
ต้นตลตลอดช่วงความยาวของชั้นอนุภาค และมีค่าอย่างน้อยไม่ต่ำกว่า 35 เซนติเมตรของน้ำ

$$\Delta P_{d,\min} = \text{Max} (0.1\Delta P_{\text{bed}}; 35 \text{ cm.H}_2\text{O}; 100\Delta P_{\text{expansion}}) \quad (2.4.1)$$

สมการ 2.4.1 สามารถนำไปใช้เป็นขอบเขตของการออกแบบความดันตกที่เกิดระหว่างตอนบนและตอนล่างของแผ่นกระจายก๊าซ

แผ่นกระจายก๊าซชนิดแผ่นเรียบ (Perforated Plate) สามารถออกแบบได้โดยตรงโดยอาศัยทฤษฎีออริฟิซ (Orifice Theory) เมื่อความดันที่เกิดขึ้นทั้งหมดมีค่ามากกว่าความดันตกเนื่องจากออริฟิซมาก ๆ โดยมีขั้นตอนการออกแบบดังนี้

1. คำนวณค่าความดันตกที่จำเป็น ซึ่งเกิดระหว่างแผ่นกระจายก๊าซจากสมการ 2.2.7 และสมการ 2.4.1
2. คำนวณค่าจำนวนเลขเรย์โนลด์ เนื่องจากอัตราการไหลทั้งหมดของก๊าซที่มาถึงแผ่นกระจายก๊าซ และหาค่าสัมประสิทธิ์ออริฟิซ (Orifice Coefficient)  $C_d$  จากรูปที่ 2.4
3. หาค่าความเร็วของไหลที่ผ่านช่องเปิดของแผ่นกระจายก๊าซ โดยใช้ความหนาแน่นและอุณหภูมิของก๊าซวัดที่ช่องเปิดพอดี



รูปที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ออริฟิซกับเลขเรย์โนลด์



$$U_{or} = C_d \left( 2 \cdot g_c \cdot \frac{\Delta P_d}{\rho \cdot g} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.4.2)$$

อัตราส่วนของ  $\frac{U_o}{U_{or}}$  คือ เศษส่วนของพื้นที่ของช่องเปิดออร์ฟิซต่อพื้นที่ของแผ่นกระจายก๊าซ

4. เลือกค่า  $N_{or}$  หรือจำนวนรูเปิดต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของแผ่นกระจายก๊าซ และหาค่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของช่องทางเปิดจากสมการ 2.4.3

$$U_o = \frac{\pi \cdot D_{or}^2}{4} \cdot U_{or} \cdot N_{or} \quad (2.4.3)$$

สำหรับอนุภาคที่มีขนาดเล็กมาก ๆ การออกแบบแผ่นกระจายก๊าซที่ดี จะทำหน้าที่คล้าย ๆ กับเครื่องกวนผสม ทำให้การผสมกันของของแข็งดีขึ้น และเกิดฟลูอิดไลซ์ได้อย่างทั่วถึงแพคเตอร์ที่พิจารณา คือ อัตราส่วนของพลังงานจลน์ของกระแสก๊าซ (Gas Jet) ที่ผ่านช่องเปิดของแผ่นกระจายก๊าซต่อความต้านทานที่เกิดขึ้น เนื่องจากน้ำหนักของแข็ง ถ้าพลังงานจลน์มีค่ามากกว่าน้ำหนักของแข็ง กระแสก๊าซจะผลัดดันอนุภาคของแข็งขึ้นไปได้ แต่ถ้าพลังงานจลน์มีค่าน้อย จะเกิดปรากฏการณ์ร่วงหล่นลงของอนุภาคผ่านแผ่นกระจายก๊าซ และไม่เกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไลซ์ตามที่ต้องการ ดังนั้นสัมมูลย์ของแรงสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ (Kinetic Energy Through Orifice) =  $\left( \frac{1}{2} \text{ to } \frac{3}{4} \right)$  (Resistance by Solid Weight) (2.4.4)

$$\frac{\rho_g \cdot U_o^2}{2 \cdot g_c} = \left( \frac{1}{2} \text{ to } \frac{3}{4} \right) \left( \frac{1}{A_t} \cdot W_{bed} \right) \quad (2.4.5)$$

$$U_{or} = (0.7 \text{ to } 0.85) \left( 2 \cdot g_c \cdot \frac{\Delta P_{bed}}{\rho_g} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.4.6)$$

ทั้งสมการ 2.4.2 และ 2.4.6 สามารถนำไปใช้ในการออกแบบแผ่นกระจายก๊าซแบบชนิดแผ่นเรียบได้โดยมีความแตกต่างกันไม่มากนัก