

บทที่ 2

ทฤษฎี

ในการขนถ่ายวัสดุโดยใช้อากาศนั้น จีนวัตุที่เป็นของแข็งจะถูกขนถ่ายโดยการแขวนตัวอยู่ใน การไหลปั่นป่วนของอากาศ ซึ่งในการไหลนั้นแรงดันของอากาศนั้นจะต้องเอาชนะค่าแรงเสียดทาน อันเนื่องมาจากผิวท่อและแรงเสียดทานอันเนื่องมาจากจีนวัตุที่ทำการขนถ่าย ระบบการขนถ่าย ของจีนวัตุนั้นจะประกอบไปด้วย

- ส่วนของการสร้างอากาศที่มีแรงดัน โดยอากาศดังกล่าวนี้จะเป็นตัวทำให้วัตุเกิดการ เคลื่อนที่ไปตามแนวท่อขนถ่าย อุปกรณ์ในการสร้างอากาศที่มีแรงดันส่วนมากจะเป็นพัค กมหรือคอมเพรสเซอร์ (Compressor)
- ส่วนของการจ่ายวัตุ
ในส่วนนี้จะเป็นส่วนจ่ายวัตุเข้าไปในระบบขนถ่าย อุปกรณ์ที่ใช้ในการจ่ายวัตุเข้าไปใน แนวท่อขนถ่ายนี้จะมีหลายประเภท โดยจะทำงานที่ค่าความดันของระบบต่างๆกันดังที่ แสดงในตาราง 2.1

ตาราง 2.1 แสดงช่วงความดันในการปฏิบัติงานของอุปกรณ์จ่ายวัตุชนิดต่างๆกัน

อุปกรณ์จ่ายวัตุ	ช่วงความดันของระบบ (bar)
ถังจ่าย (Blow tank)	+0.4 ถึง +5.5+
สกรู (Screw)	-0.5 ถึง +2.5
โรตารี (Rotary)	-0.5 ถึง +1.0
เวนจูรี (Venturi)	0.0 ถึง +0.2
เกทวาล์ว (Gate valves)	-0.5 ถึง +0.5
หัวดูด (Suction nozzle)	-0.6 ถึง 0.0

- ระบบท่อขนถ่าย

ท่อขนถ่ายคือแนวเส้นทางที่วัสดุจากชุดอุปกรณ์จ่ายเกิดการเคลื่อนที่ไป โดยวัสดุจากชุดอุปกรณ์จ่ายวัสดุจะเคลื่อนที่ผ่านแนวท่อขนถ่ายดังกล่าวนี้ไปยังส่วนของการแยกวัสดุออกจากอากาศที่ทำการขนถ่าย

- ส่วนของการแยกวัสดุออกจากอากาศที่ทำการขนถ่าย

ส่วนของการแยกวัสดุออกจากอากาศที่ทำการขนถ่ายจะทำหน้าที่แยกเอาวัสดุออกจากอากาศที่ขนถ่ายเพื่อนำเอาวัสดุที่ขนถ่ายดังกล่าวไปจัดเก็บหรือใช้ประโยชน์ต่อไป อุปกรณ์สำหรับแยกวัสดุออกจากอากาศที่ทำการขนถ่ายนั้นมีหลายชนิด อาทิเช่น อุปกรณ์แยกแบบไซโคลน และถุงผ้ากรอง เป็นต้น

2.1 รูปแบบการไหลในระบบการขนถ่ายวัสดุด้วยอากาศ

รูปแบบของการไหลของของผสมระหว่างชิ้นวัสดุซึ่งเป็นของแข็งกับอากาศในระบบการขนถ่ายวัสดุด้วยอากาศนั้นสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท โดยดูจากความหนาแน่นเฟสซึ่งนิยามโดย

$$\text{ความหนาแน่นเฟส} = \frac{\text{อัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุ}}{\text{อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ}} \quad [2.1]$$

หรือ

$$\phi = \frac{\dot{G}}{3.6\dot{m}_a} \quad [2.2]$$

เมื่อ ϕ = ค่าความหนาแน่นเฟสในการไหล

\dot{G} = ค่าอัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุ, ton/hr

\dot{m}_a = ค่าอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ, kg/s

1. การไหลแบบมีความหนาแน่นเฟสแบบเบาบาง (Dilute Phase)

การไหลในรูปแบบนี้ชั้นวัสดุที่ทำการขนถ่ายนั้นจะลอยแขวนตัวอยู่ในอากาศที่ทำการขนถ่ายอย่างสมบูรณ์ ชั้นวัสดุที่ลอยตัวอยู่นั้นจะสามารถกระทบกันเองและกระทบกับผิวท่อ ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดความเสียหายแก่ชั้นวัสดุในกรณีที่วัสดุที่ทำการขนถ่ายมีความเปราะหรือแตกหักได้ง่าย รวมทั้งยังอาจจะทำให้เกิดการสึกกร่อนที่บริเวณผิวของท่อขนถ่ายถ้าชั้นวัสดุคั่งกต่วนั้นแข็งกว่าผิวของท่อขนถ่าย โดยส่วนใหญ่ค่าความหนาแน่นเฟสสำหรับรูปแบบการไหลแบบความหนาแน่นเฟสแบบเบาบางที่สมบูรณ์นั้นควรมีค่าน้อยกว่า 10 และค่าความเร็วของอากาศที่จะทำให้วัสดุเกิดการแขวนตัวอยู่ในการไหลจะมีค่าประมาณ 13 ถึง 15 เมตรต่อวินาที

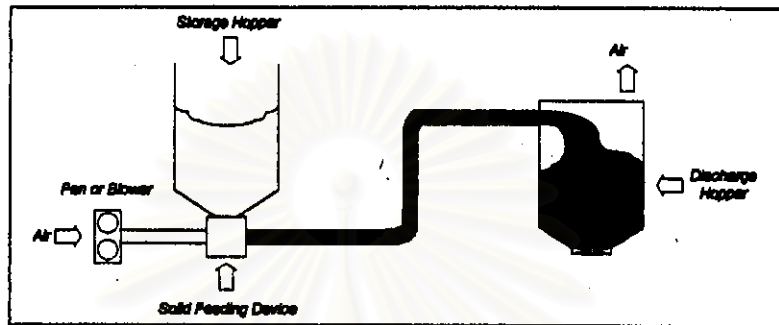
2. การไหลแบบมีความหนาแน่นเฟสแบบหนาแน่น (Dense Phase) หรือการไหลแบบไม่มีการแขวนตัว (Non-suspension flow)

การไหลในรูปแบบนี้วัสดุที่ถูกขนถ่ายจะถูกขนถ่ายอย่างหนาแน่นภายในระบบท่อ ซึ่งค่าความเร็วที่จำเป็นสำหรับการขนถ่ายวัสดุนี้จะมีค่าต่ำกว่าในแบบความหนาแน่นเฟสเบาบาง โดยค่าความหนาแน่นเฟสในการไหลแบบความหนาแน่นเฟสแบบหนาแน่นแบบสมบูรณ์นั้นควรมีค่ามากกว่า 40

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2 ชนิดของระบบการขนถ่ายวัสดุด้วยอากาศ

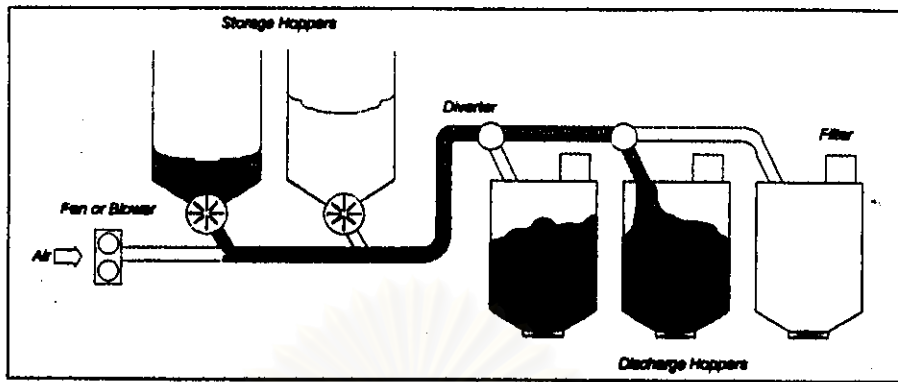
1. ระบบความดันบวก (Positive Pressure System)



รูปที่ 2.1 แสดงระบบการขนถ่ายวัสดุแบบความดันบวกอย่างง่าย (Simple positive pressure systems)

การขนถ่ายชนิดนี้จะใช้ พัดลม เป็นตัวจ่ายอากาศ โดยจะมีค่าความดันสูงสุดไม่เกิน 1 บาร์ เกจ (201.3 kN/m^2) การขนถ่ายโดยระบบดังกล่าวนี้จะสามารถขนถ่ายที่ความหนาแน่นเฟสแบบเบาบางที่ระยะทางการขนถ่ายปานกลาง และที่ความหนาแน่นเฟสแบบหนาแน่นที่ระยะทางการขนถ่ายสั้นๆ รูปที่ 2.1 จะแสดงระบบการขนถ่ายวัสดุด้วยอากาศแบบความดันบวกอย่างง่าย จากรูปวัสดุจะถูกจ่ายผ่านอุปกรณ์จ่ายวัสดุจากนั้นจะถูกทำการขนถ่ายด้วยอากาศอัดแรงดันผ่านแนวท่อขนถ่ายไปยังอุปกรณ์จัดเก็บวัสดุ ซึ่งจะมีจุดกรองเพื่อป้องกันการฟุ้งกระจายของอากาศ

รูปที่ 2.2 จะแสดงระบบการขนถ่ายวัสดุด้วยอากาศแบบซับซ้อน (Complex positive pressure conveying system) ซึ่งถูกดัดแปลงขึ้นเพื่อใช้ในการจัดส่งวัสดุไปยังอุปกรณ์จัดเก็บวัสดุหลายๆจุดได้โดยอาศัยวาล์วเปลี่ยนทิศทาง (Diverter Valve) อย่างไรก็ตามในระบบดังกล่าวนี้ อาจเกิดการรั่วซึมของอากาศที่ในส่วนของโรตารีวาล์วสำหรับจ่ายวัสดุ อันจะเป็นผลต่อค่าปริมาณอากาศที่จำเป็นในการขนถ่ายโดยรวม



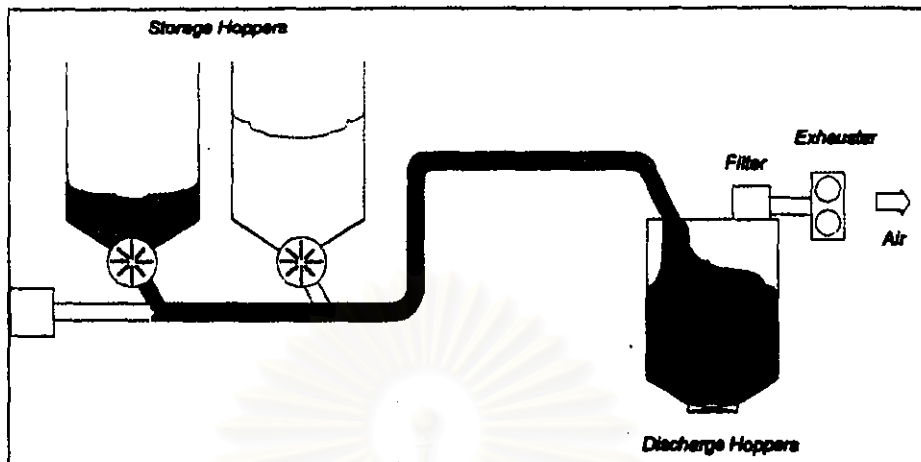
รูปที่ 2.2 แสดงระบบการขนถ่ายวัสดุด้วยอากาศแบบความดันบวกแบบซับซ้อน (Complex positive pressure conveying system)

2. ระบบการขนถ่ายแบบความดันลบ (Negative Pressure System)

การขนถ่ายในระบบนี้จะเป็นการขนถ่ายที่ด้านดูดของตัวพัดลม การขนถ่ายในระบบนี้จะมีข้อจำกัดสำหรับค่าความดันตกจึงไม่สามารถใช้ในระบบที่ต้องการค่าอัตราการขนถ่ายเชิงมวลของวัสดุสูงๆ หรือมีระยะการขนถ่ายยาว เมื่อเทียบกับระบบที่มีความดันบวก นอกจากนี้ยังจะต้องระมัดระวังการหลุดรอดของวัสดุผ่านไปทางด้านอากาศขาออก

ระบบดังกล่าวนี้จะใช้โดยทั่วไปสำหรับการดึงเอาวัสดุจากหลายๆแหล่ง ถ่ายไปยังอุปกรณ์รองรับชุดเดียว แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเทียบกับระบบที่มีความดันบวกชุดอุปกรณ์นั้นจะต้องมีขนาดใหญ่ และปริมาณอากาศที่ต้องกรองนั้นจะมีปริมาณมากกว่าอันเนื่องมาจากสภาวะต่ำกว่าสูญญากาศที่เกิดขึ้นในระบบท่อ

อย่างไรก็ตาม ในระบบนี้อากาศที่รั่วไหลนั้นจะเป็นการรั่วไหลผ่านเข้ามาในระบบ ดังนั้นจึงไม่มีการกระจายของฝุ่นไปยังบรรยากาศภายนอก ซึ่งข้อดีดังกล่าวนี้เป็นสิ่งที่มีความสำคัญในการขนถ่ายวัสดุที่เป็นพิษหรือวัสดุที่สามารถระเบิดติดไฟได้ง่าย

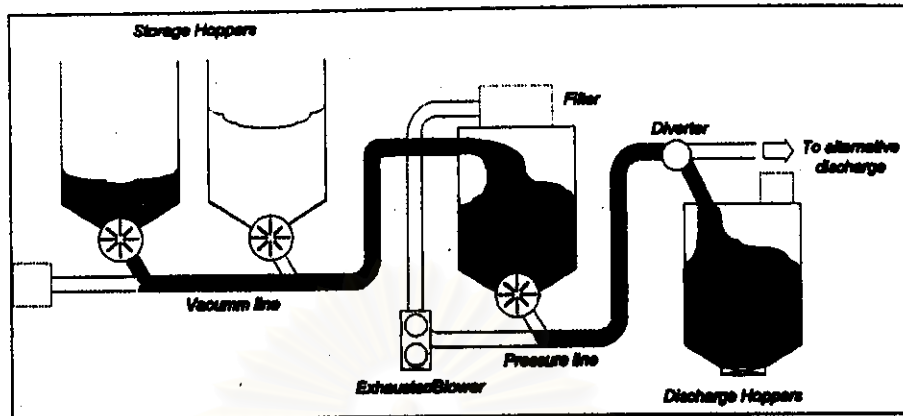


รูปที่ 2.3 แสดงระบบการขนถ่ายแบบความดันลบอย่างง่าย (Simple negative pressure system)

3. ระบบการขนถ่ายแบบผสมระหว่างความดันบวกและความดันลบ (Combined negative and positive pressure system)

การรวมการทำงานของระบบการขนถ่ายแบบความดันบวกและความดันลบนั้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งในระบบดังกล่าวนี้จะสามารถทำการดึงวัสดุจากหลายแหล่งจ่ายไปยังอุปกรณ์รองรับวัสดุหลายๆจุดได้ โดยจะมีการขนถ่ายวัสดุทั้งทางด้านดูดและด้านจ่ายของตัวพัดลม วัสดุที่ขนถ่ายมาจากทางด้านดูดจะถูกพักไว้ที่อุปกรณ์รองรับวัสดุก่อนที่จะถูกขนถ่ายต่อที่ด้านจ่ายของตัวพัดลม โดยไม่ผ่านเข้าไปในตัวพัดลม เนื่องจากอาจจะเกิดปัญหาของการแตกหักของวัสดุและการสึกหรอของตัวพัดลม

การออกแบบโดยใช้ระบบแบบผสมนี้จะยังคำนึงถึงค่ากำลังงานที่จะต้องใช้ในการขนถ่ายวัสดุ เนื่องจากพัดลมจะต้องทำการขนถ่ายวัสดุทั้งทางด้านดูดและทางด้านจ่าย นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงขนาดและระยะของท่อทั้งสองด้านด้วย



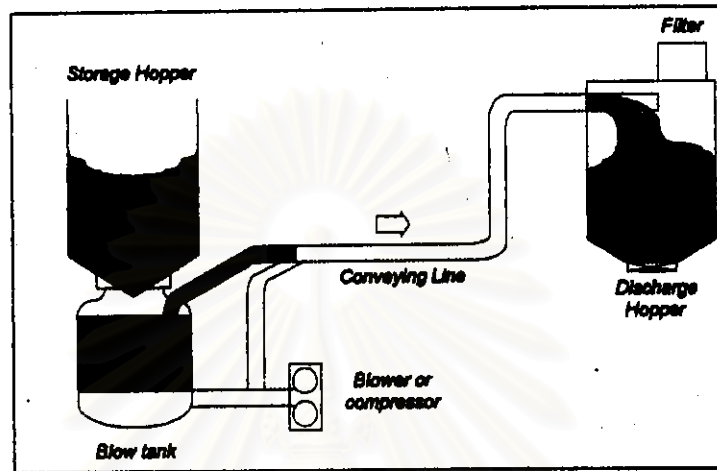
รูปที่ 2.4 แสดงระบบการขนถ่ายแบบผสมระหว่างความดันบวกและความดันลบ (Combined negative and positive pressure system)

4. ระบบการขนถ่ายแบบดึงจ่ายความดันสูง (High pressure blow tank system)

ระบบการขนถ่ายแบบดึงจ่ายความดันสูงนี้จะประกอบไปด้วยถังจ่ายความดันสูงซึ่งสามารถปฏิบัติงานที่ความดันสูงถึง 8 bar (901.3 kNm²) ดังนั้นระบบนี้จึงสามารถทำการขนถ่ายวัสดุที่ระยะทางยาวๆ ได้ ในการปฏิบัติงานคอมเพรสเซอร์จะอัดอากาศเข้ามาในถังจ่ายความดันสูงพร้อมๆ กับที่วัสดุจากอุปกรณ์จัดเก็บจะไหลเข้ามาในถัง เมื่อปริมาณหรือน้ำหนักของวัสดุมีค่าตามที่ต้องการ วัสดุจะหยุดไหลจากอุปกรณ์จัดเก็บ จากนั้นลิ้นวาล์วที่ด้านท่อขนถ่ายจะเปิดจากนั้นวัสดุจะถูกอัดผ่านระบบท่อไปยังอุปกรณ์จัดเก็บด้านขาออก เมื่อวัสดุไหลออกจากถังจนหมด ลิ้นจะปิดและวัสดุจะเริ่มไหลลงมาถึงถังจ่ายความดันใหม่ วัสดุที่ถูกขนถ่ายจะถูกดันให้ไหลผ่านไปเป็นก้อน ดังนั้นการทำงานของระบบนี้จะเป็นแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch) ถ้าต้องการที่จะปฏิบัติงานอย่างต่อเนื่องจะต้องทำการติดตั้งถังจ่ายความดันสูง 2 ชุด และทำการตั้งให้การจ่ายวัสดุของถังจ่ายความดันสูงทั้งสองทำงานสลับไปมาให้พอดีก็จะสามารถจ่ายวัสดุผ่านท่อขนถ่ายได้อย่างต่อเนื่อง

เนื่องจากถังจ่ายความดันสูงถูกใช้เป็นการจ่ายวัสดุทำให้เกิดปัญหาอันเนื่องมาจากความดันแตกต่างที่ตกคร่อมอุปกรณ์จ่ายวัสดุ การสึกหรอของท่อขนถ่าย รวมไปถึงปัญหาการแตกหักของวัสดุในการขนถ่ายอีกด้วย ทั้งนี้เนื่องจากการที่วัสดุถูกขนถ่ายเป็นกลุ่มก้อนทำให้วัสดุไม่เกิดการวิ่งชนกับผิวท่อหรือวิ่งชนกันเอง นอกจากนี้ระบบดังกล่าวยังใช้ปริมาณอากาศในการขนถ่ายน้อยกว่า

ในระบบการขนถ่ายแบบเฟตเวมาบางอันเนื่องมาจากความดันที่มีค่าสูงกว่า ทำให้ชุดอุปกรณ์ตัวกรองนั้นมีขนาดเล็กกว่า และถูกกว่า



รูปที่ 2.5 แสดงระบบการขนถ่ายแบบถังจ่ายความดันสูง (High pressure blow tank system)

2.3 การเคลื่อนที่ของชิ้นวัสดุในการไหล (Particles Dynamic)

ในการขนถ่ายของวัสดุด้วยอากาศนั้น วัสดุจะถูกทำให้เกิดการเคลื่อนที่โดยอากาศ เมื่อความเร็วของอากาศและชิ้นวัสดุมีค่าใกล้เคียงกัน พฤติกรรมของระบบจะมีลักษณะใกล้เคียงกับการไหลของของไหลเฟตเวมา อย่างไรก็ตามพฤติกรรมดังกล่าวก็เป็นไปได้ยากในทางปฏิบัติ ดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้นว่าในการไหลดังกล่าวอากาศจะต้องเอาชนะค่าแรงต้านบนชิ้นวัสดุเพื่อจะทำให้วัสดุเกิดการเคลื่อนที่ไปในการไหล ค่าแรงต้านบนชิ้นวัสดุสามารถแสดงได้โดยสมการดังนี้

$$F_D = C_D \frac{\rho_a}{2} w^2 A^* \quad [2.3]$$

$$F_D = C_D \frac{\rho_a}{2} (v_g - c)^2 A^* \quad [2.4]$$

เมื่อ F_D - ค่าแรงต้านที่เกิดบนชิ้นวัสดุ

w - ค่าความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างของแข็งและอากาศในการไหล

- A' = ค่าของพื้นที่ตามแนวตั้งฉากกับแนวการไหล
- C_D = ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน
- v_g = ค่าความเร็วที่แท้จริงของก๊าซที่ไหลผ่านช่องว่างระหว่างชิ้นวัสดุ
- ρ_a = คือค่าความหนาแน่นของอากาศ
- c = ค่าความเร็วของชิ้นวัสดุ

ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านดังกล่าวนี้จะเป็นตัวบ่งชี้ถึงความสามารถในการเคลื่อนที่ของวัสดุในการไหล สำหรับการไหลในระบบท่อขนถ่ายของของผสมระหว่างของแข็งและอากาศ ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านนั้นจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังนี้

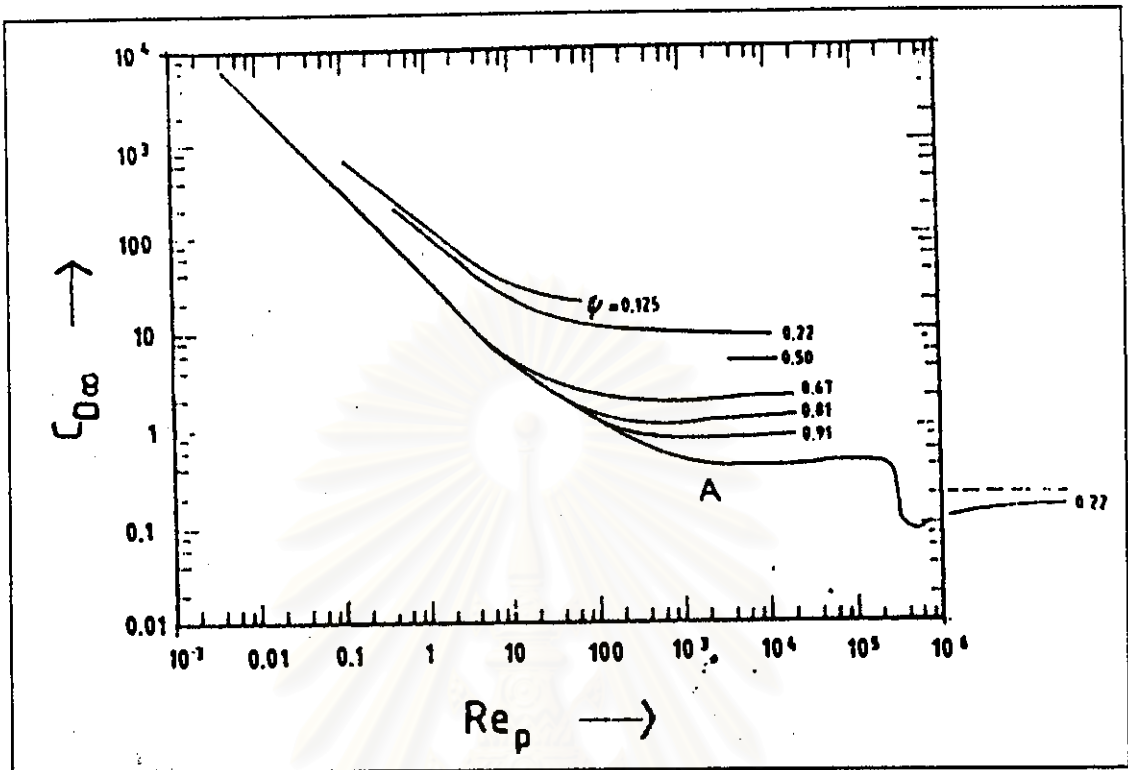
1. รูปร่างของวัสดุ

รูปร่างของวัสดุที่แตกต่างกันจะส่งผลให้มีค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านแตกต่างกัน เพื่อความสะดวกในการระบุรูปร่างของวัสดุเราจะใช้ค่าตัวประกอบรูปร่าง (Shape factor) มาระบุลักษณะรูปร่างของชิ้นวัสดุ โดย

$$\text{Shape factor} = \psi = \frac{\text{ค่าพื้นที่ผิวของทรงกลมที่มีปริมาตรเท่ากับวัสดุนั้นๆ}}{\text{ค่าพื้นที่ผิวของวัสดุ}} = \frac{4\pi d_v^2}{S} \quad [2.5]$$

- โดยที่ d_v = ค่าเส้นผ่าศูนย์กลางเทียบเท่า (Equivalent diameter) ของชิ้นวัสดุ
- S = ค่าพื้นที่ผิวของชิ้นวัสดุ

ค่าตัวประกอบรูปร่าง (Shape factor) จะมีความสัมพันธ์กับค่าตัวเลขเรย์โนลด์ดังที่แสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งในกราฟจะแสดงค่าความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของชิ้นวัสดุ (C_{Doo}) และค่าตัวเลขเรย์โนลด์สำหรับรูปร่างของชิ้นวัสดุต่างๆกัน โดยทำการวัดค่าจากชิ้นวัสดุชิ้นเดี่ยวที่อยู่ในการไหลแบบเบ็ด ภายใต้การไหลที่สม่ำเสมอ



รูปที่ 2.6 แสดงรูปกราฟของค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านที่รูปร่างต่างๆกัน [9]

จากรูป เราจะเห็นได้ว่าเมื่อวัตถุยังมีรูปร่างกลมขึ้นหรือค่าตัวประกอบรูปร่าง (Shape factor, ψ) เข้าใกล้ 1 เท่าใดค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านบนชั้นวัตถุจะลดลง ที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์สูงขึ้น

สำหรับค่าตัวเลขเรย์โนลด์ของชั้นวัตถุนั้นจะมีค่า

$$Re_p = \frac{wd}{V}$$

[2.6]

โดยที่ $w = v_e - c$ = ค่าความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างของแข็งและของไหล (m/s)

v_e = ค่าความเร็วที่แท้จริงของอากาศที่ไหลผ่านช่องว่างระหว่างชั้นวัตถุ (m/s)

c = ค่าความเร็วของชั้นวัตถุ (m/s)

V = ค่าความหนืดไคแนแมติก (m^2/s) ของอากาศ

ในปี 1954 Hinkel [10] ได้สร้างความสัมพันธ์สำหรับการหาค่าความเร็วของจีนวัสดุในการไหลในท่อขนาดดังนี้

$$c = \bar{v} (1 - 0.008 d^{0.3} \rho_p^{0.5}) \quad [2.7]$$

ซึ่งต่อมาได้ถูกทำการดัดแปลงโดย Institute of Gas Technology (IGT) [1978] [11] ดังนี้

$$c = \bar{v} (1 - 0.68 d^{0.92} \rho_p^{0.5} \rho_a^{-0.2} D^{-0.54}) \quad [2.8]$$

โดยที่ ρ_a = ค่าความหนาแน่นของอากาศ

ρ_p = ค่าความหนาแน่นของจีนวัสดุ

d = ค่าเส้นผ่าศูนย์กลางของจีนวัสดุ

D = ค่าเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ

\bar{v} = ค่าความเร็วเฉลี่ยของอากาศที่ไหลภายในท่อขนาด = \dot{V} / A

\dot{V} = ค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ

A = พื้นที่หน้าตัดของท่อขนาด

2 ค่าระดับของการไหลปั่นป่วน

จากการทดลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านบนจีนวัสดุขึ้นอยู่กับค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number) ค่าระดับของการไหลปั่นป่วนและค่า λ_i / d โดยที่ค่า λ_i คือค่าระยะห่างระหว่างจีนวัสดุ

หรือจะเขียนได้ว่า

$$C_{Doo} = f(Re_p, I_R, \lambda_i / d) \quad [2.9]$$

โดยที่ค่า Re_p = ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ของจีนวัสดุ

d = ค่าเส้นผ่าศูนย์กลางกลางของรีนิววัตถุ

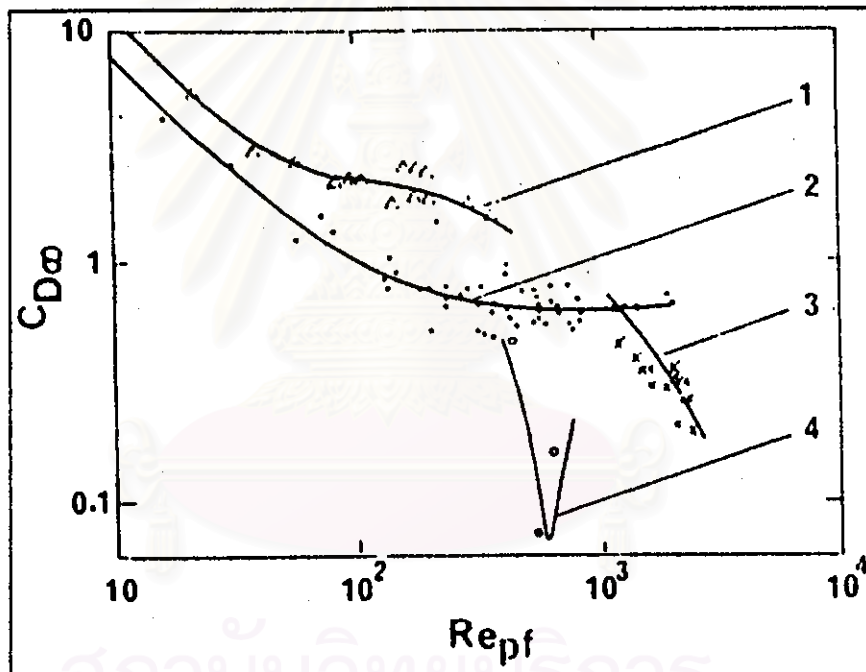
I_R = ค่าระดับของการไหลปั่นป่วน $= (v_y^2/w)^{1/2}$

v_y = ค่าความเร็วที่เปลี่ยนแปลงไปมาของของไหล (fluctuating velocity)
ในทิศทางของการไหลเฉลี่ย

โดยจากการทดลองของ Torobin และ Gauvin [13] พบว่า

$$(Re_p)_{crit} I_R^2 = 45$$

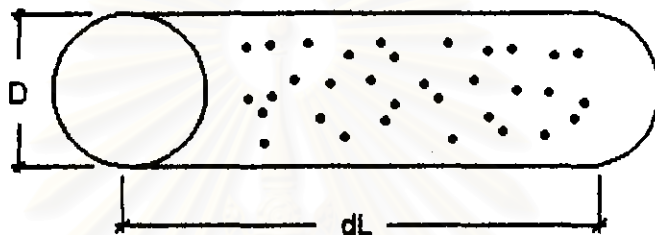
[2.10]



รูปที่ 2.7 แสดงการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงต้านที่ระดับความเข้มข้นของการไหลปั่นป่วนต่างๆ กัน จากการทดสอบของผู้ทดสอบแตกต่างกัน โดย 1. $I_R = 0.4$ [12], 2. $I_R = 0.1$ [12], 3. $I_R = 0.1$ [13], 4. $I_R = 0.4$ [13]

3 ค่าช่องว่างระหว่างวัสดุที่เป็นของแข็ง (Voidage)

ในปี 1971 Wen C.Y. [16] ได้ให้คำจำกัดความของค่าช่องว่างระหว่างวัสดุที่เป็นของแข็ง (Voidage) โดยพิจารณาจำนวนของชั้นวัสดุในปริมาตรหนึ่งๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ซึ่งประกอบไปด้วยปริมาตรความยาว dL และมีจำนวนของชั้นวัสดุ n ชั้น ดังนี้



รูปที่ 2.8 แสดงปริมาตรที่มีชั้นวัสดุอยู่

ค่าช่องว่างระหว่างวัสดุที่เป็นของแข็ง (Voidage) จะมีค่า

$$\epsilon = \frac{V - V_s}{V} = 1 - \frac{V_s}{V} \quad [2.11]$$

เมื่อ V = ปริมาตรของท่อ = AdL

V_s = ปริมาตรของชั้นวัสดุทั้งหมดในปริมาตรของท่อดังกล่าว

A = พื้นที่หน้าตัดของท่อขนถ่าย

โดย

$$V_s = nV_p = \frac{\dot{G}}{\rho_p c} dL \quad [2.12]$$

เมื่อ V_p = ปริมาตรของชั้นวัสดุ

\dot{G} = อัตราการไหลเชิงมวลของชั้นวัสดุ

n = จำนวนชั้นวัสดุ

ดังนั้นจะได้

$$\varepsilon = 1 - \frac{\dot{G}}{A\rho_f c} \quad [2.13]$$

จากความสัมพันธ์ข้างต้นจะเห็นได้ว่าจะสามารถหาค่าช่องว่างระหว่างวัสดุที่เป็นของแข็ง (Voidage) ได้เมื่อทราบค่าต่างๆดังที่ระบุในความสัมพันธ์ดังกล่าว และเมื่ออากาศไหลผ่านเข้าไปในระบบ อากาศจะไหลผ่านช่องว่างของชิ้นวัสดุ ซึ่งค่าความเร็วที่แท้จริงของอากาศขณะไหลผ่านช่องว่างระหว่างชิ้นวัสดุนั้นจะมีความสัมพันธ์กับค่าช่องว่างระหว่างวัสดุที่เป็นของแข็ง (Voidage) ดังนี้

$$v_\varepsilon = \frac{\bar{v}}{\varepsilon} \quad [2.14]$$

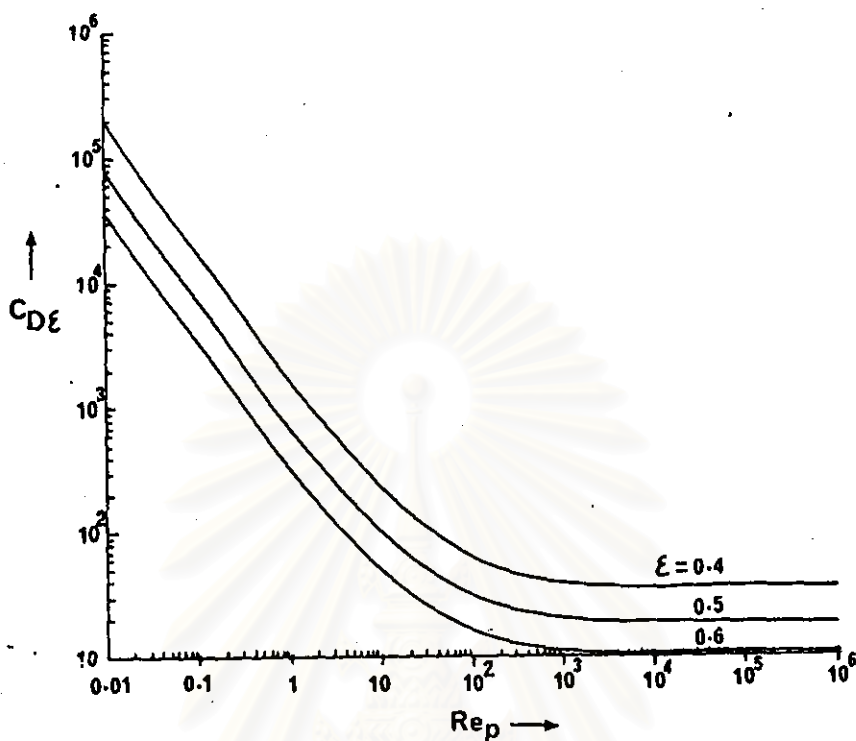
โดย \bar{v} = ค่าความเร็วเฉลี่ยของอากาศที่ไหลภายในท่อขนถ่าย = \dot{V}/A

\dot{V} = ค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ

A = พื้นที่หน้าตัดของท่อขนถ่าย

v_ε = ค่าความเร็วที่แท้จริงของอากาศที่ไหลผ่านช่องว่างระหว่างชิ้นวัสดุ (m/s)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.9 แสดงความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของจีนัวตตุที่ค่าช่องว่างระหว่างจีนัวตตุ
ต่างๆ กัน

ถ้าจีนัวตตุที่มีการเคลื่อนที่ไปกับการไหล จากการทดลองของ Wen และ Yu [14] โดย
สมมติให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านขึ้นอยู่กับช่องว่างระหว่างจีนัวตตุแต่เพียงอย่างเดียว จะได้ค่า
สัมประสิทธิ์แรงต้านคือ

$$C_{DE} = \epsilon^{-4.7} C_{D\infty} \quad [2.15]$$

จากกราฟความสัมพันธ์ รูปที่ 2.9 จะเห็นได้ว่าถ้าเราจะเห็นได้ว่าเมื่อค่าช่องว่างระหว่างจีนัวตตุ
ที่เป็นของแข็ง (Voidage) ลดลงหรือจำนวนจีนัวตตุที่อยูในการไหลเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่า
สัมประสิทธิ์แรงต้านของจีนัวตตุเพิ่มขึ้น

4 ความเร่งของวัตถุ

เมื่อวัตถุมีความเร่งหรือความหน่วงในการไหลค่าแรงต้านบนวัตถุจะเปลี่ยนแปลงไปอันเนื่องมาจากค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านที่เปลี่ยนไป

5 ความหยาบของผิววัตถุ

ความหยาบของผิววัตถุมีผลกับค่าตัวเลขเรย์โนลด์วิกฤต (Critical Reynolds number) (ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number) ที่ช่วงของการเปลี่ยนการไหลแบบทรานซิชัน (Transition) เป็นการไหลแบบปั่นป่วน)

6 การหมุนตัวของชิ้นวัตถุ

จากการทดลองของ Torobin และ Gauvin [13] พบว่าการหมุนตัวของชิ้นวัตถุจะให้ผลน้อยต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number) สูงๆ

7 ผนัง

ในการขนถ่ายวัตถุด้วยอากาศนั้น ผลของผนังนั้นจะ ไม่ต่อมมีความสำคัญเมื่อเทียบกับผลของการรบกวนกันของชิ้นวัตถุที่อยู่ใกล้เคียงกันในการไหล ยกเว้นบริเวณที่อยู่ติดกับผนัง

8 ค่าแรงไฟฟ้าสถิตย์

ถ้าชิ้นวัตถุมีขนาดเล็กและถูกขนถ่ายด้วยอากาศที่แห้ง ผลของค่าไฟฟ้าสถิตย์จะมีความสำคัญซึ่งจะส่งผลให้ค่าความดันตกเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามกระบวนการที่ทำให้เกิดความดันตกอันเนื่องมาจากผลของค่าแรงไฟฟ้าสถิตย์นั้นยังไม่ชัดเจน

2.4 ค่าความดันตกของการไหลผ่านชั้นของชั้นวัสดุ

จากสมการของ Evgun (1952) [15] ที่ใช้ในการคาดคะเนค่าความดันตกของการไหลผ่านชั้นของชั้นวัสดุหยาบ

$$\frac{\Delta P}{\Delta Z} = 150 \frac{(1-\epsilon)^2}{\epsilon^3} \frac{\mu \bar{v}}{(\psi d_v)^2} + 1.75 \frac{1-\epsilon}{\epsilon^3} \frac{\rho_s \bar{v}^2}{\psi d_v} \quad [2.16]$$

- โดยที่ \bar{v} = ค่าความเร็วเฉลี่ยของอากาศ
 ϵ = ค่าช่องว่างระหว่างวัสดุที่เป็นของแข็ง
 μ = ค่าความหนืดไดนามิกของอากาศ (Dynamic viscosity), Ns/m^2
 ψ = ค่า คิวประกอบรูปร่าง (Shape Factor)
 d_v = ค่าเส้นผ่าศูนย์กลางเทียบเท่า (Equivalent diameter) ของชั้นวัสดุ, mm
 ρ_s = ค่าความหนาแน่นของอากาศ, kg/m^3
 ΔP = ค่าความดันตก
 ΔZ = ค่าความหนาของชั้น Packed bed

ในการไหลแบบกระแสการไหลราบเรียบ (Streamline flow) เทอมแรกด้านขวามือของสมการ 2.16 จะให้ผลเด่นชัดกว่าเทอมที่สองโดย

$$\frac{\Delta P}{\Delta Z} = 150 \frac{(1-\epsilon)^2}{\epsilon^3} \frac{\mu \bar{v}}{(\psi d_v)^2} \quad \text{โดย } \frac{\rho_s \bar{v} \psi d_v}{\mu} < 20 \quad [2.17]$$

สำหรับการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) เทอมที่สองด้านขวามือของสมการ 2.16 จะให้ผลเด่นชัดกว่าเทอมแรกโดย

$$\frac{\Delta P}{\Delta Z} = 1.75 \frac{1-\epsilon}{\epsilon^3} \frac{\rho_s \bar{v}^2}{\psi d_v} \quad \text{โดย } \frac{\rho_s \bar{v} \psi d_v}{\mu} > 100 \quad [2.18]$$

สมการของ Eugen [15] ดังกล่าวนี้สามารถใช้คาดคะเนค่าความดันตกได้ในช่วง $\pm 25\%$ ในการไหลผ่านชั้นของชั้นวัสดุที่มีค่าช่องว่างระหว่างวัสดุที่เป็นของแข็ง (Voidage) ต่ำกว่า 0.6 ถ้าชั้นของชั้นวัสดุมีค่าช่องว่างระหว่างวัสดุที่เป็นของแข็ง (Voidage) สูงกว่าค่าดังกล่าว ค่าความดันตกที่เกิดขึ้นจริงจะมีค่าสูงกว่าค่าที่คาดคะเนจากสมการของ Eugen



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย