



ไฮโดรโซโคลน

โดยธรรมชาติ (46) ดินขาวที่เกิดขึ้นมักจะมีขนาดเล็กมากจนเกือบเรียกได้ว่า เป็นอนุภาค (Colloidal) และมักจะเกิดร่วมกับแร่ลทินอื่น ๆ เช่น ควออตซ์ ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่า เนื่องจากดินขาวโดยเฉพาะอย่างยิ่งแบบฉบับหาดสัมปันธ์ ซึ่งเกิดจากการแปรสภาพของแร่เฟลด์สปาร์ด้วยกระบวนการเคโอไลไนเซชัน มีความคงทนต่อการผุพังน้อยกว่าควออตซ์ ดังตารางที่ 3.1 ซึ่งแสดงความคงทนของแร่ในหินอัคนีต่อการผุพังอยู่ที่ (Weathering) ทางเคมี

ตารางที่ 3.1 ความคงทนของแร่ในหินอัคนีต่อการผุพังอยู่ที่ทางเคมี (46)

Least	Stable	Olivine	Ca-Plagioclase	High Temperature
		Pyroxene	Ca-Na Plagioclase	Formation
		Amphibole	Na-Ca Plagioclase	
		Biotite	Na-Plagioclase	
			K-Feldspar, Muscovite	
			Quartz	
Most	Stable			Lower Temperature
				Formation

ดังนั้นการคัดขนาด (61-67) จึงเป็นพื้นฐานในการแต่งดินขาว การใช้ตะแกรง (Screens) ในการคัดขนาดเป็นวิธีที่รู้จักกันดี และค่อนข้างจะทำได้ง่าย แต่อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดในการใช้ตะแกรงคัดขนาดในงานอุตสาหกรรม ก็คือ ไม่สามารถที่จะคัดขนาดดินขาว ซึ่งมีขนาดเล็กกว่า 0.2 มม. (200 ไมครอน) ได้อย่างรวดเร็ว (66) เนื่องจากอนุภาคดินขาว ซึ่งมีขนาดเล็กมากมักจะไปเกาะผิวดินซึ่งมีขนาดหยาบด้วยแรงทางไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic Force) หรือเกาะกันเนื่องจากความชื้น (Moisture) ของดิน ทำให้ไม่สามารถผ่านรูดรูตะแกรงได้ดี มีปัญหาในการอุดตัน และทำให้ประสิทธิภาพการคัดขนาดตกต่ำลงด้วย การคัดขนาดดินขาวที่มีขนาดเล็กมาก ๆ จะใช้หลักการตกตัวของอนุภาคในของไหล (Medium Fluid) ที่เรียกว่า Classification แทน

3.1 การัดขนาดด้วยวิธี Classification

การัดขนาดด้วยวิธี Classification เป็นการัดขนาดโดยอาศัยความแตกต่างของอัตราการตกตัว (Settling Rate) ของอนุภาคที่มีขนาดต่างกันของไหล (66-68) นั่นคือเมื่อปล่อยให้อนุภาคชนิดเดียวกันตกตัวในของไหลที่เป็นตัวกลางพร้อมกัน อนุภาคที่มีขนาดใหญ่จะตกตัวด้วยความเร็วสูงกว่าอนุภาคที่มีขนาดเล็ก เนื่องจากอัตราความเร็วในการตกตัวของอนุภาคไม่ได้ขึ้นอยู่กับขนาดเพียงอย่างเดียว แต่ขึ้นอยู่กับความถ่วงจำเพาะของอนุภาคด้วย ดังนั้นการัดขนาดด้วยวิธีนี้จึงไม่ใช่เป็นการัดขนาดโดยตรงแต่เป็นการัดเลือก (Sorting) อนุภาคออกเป็นกลุ่ม ๆ ที่มีความเร็วสุดท้าย (Terminal Velocity) ในการตกตัวเท่า ๆ กัน ซึ่งแตกต่างไปจากการใช้ตะแกรงที่ถือเอาขนาดรูตะแกรงเป็นเกณฑ์ ในการัดขนาด แร่ป้อน (Feed) ที่ป้อนเข้าสู่เครื่องัดขนาด (Classifiers) จะถูกแยกออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ ๆ คือ ส่วนทราย ซึ่งประกอบไปด้วยอนุภาคที่มีอัตราการตกตัวเร็ว เรียกส่วนนี้ว่า Sand, Underflow หรือ Oversize และส่วนละเอียดจะประกอบไปด้วยอนุภาคที่มีอัตราการตกตัวช้า เรียกส่วนนี้ว่า Slime, Overflow หรือ Undersize

3.1.1 ทฤษฎีเบื้องต้นของการัดขนาดด้วยวิธี Classification (66-68)

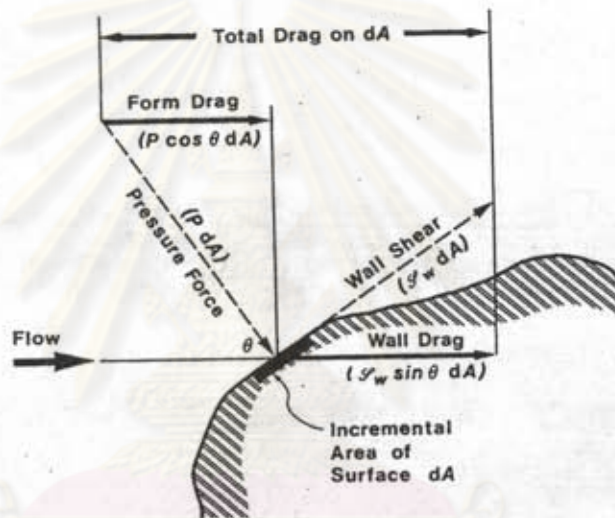
เมื่อปล่อยให้อนุภาคของแข็งตกตัวอย่างอิสระในสูญญากาศ อนุภาคจะเคลื่อนที่ด้วยความเร่ง (Acceleration) คงที่ นั่นคือ ความเร็ว (Velocity) ของอนุภาคจะเพิ่มขึ้นอย่างไม่มีการสิ้นสุด ซึ่งการเคลื่อนที่นั้นจะไม่ขึ้นกับขนาดและความถ่วงจำเพาะของอนุภาค แต่ถ้าปล่อยให้อนุภาคของแข็งให้ตกตัวในของไหล (Fluid) เช่น อากาศหรือน้ำ ซึ่งมีแรงต้านทานการตกตัวของอนุภาค การเคลื่อนที่ของอนุภาคจะเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อยจนถึงความเร็วสุดท้าย (Terminal Velocity) ซึ่งเป็นความเร็วที่คงที่ เนื่องจากแรงต้านทานของของไหลที่เรียกว่าแรงลากของของไหล (Drag Force) สมดุลกับแรงเนื่องจากความโน้มถ่วงของอนุภาค (Gravitational Force) หรือ แรงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal Force)

3.1.1.1 แรงลากของของไหล

ความเข้าใจเกี่ยวกับแรงลากของของไหล และผลของแรงลากของของไหลที่มีต่อความเร็วสุดท้าย เป็นพื้นฐานสำคัญที่จะใช้ทำนายลักษณะการทำงานของเครื่อง

คัตขนาดด้วยวิธี Classification

เมื่อพิจารณาอนุภาคของแข็งที่เคลื่อนที่ในของไหล พบว่ามีแรงต้านทานการเคลื่อนที่ของอนุภาคของแข็งเกิดขึ้น 2 แรง คือแรงต้านทานเนื่องจากความเสียดทานระหว่างอนุภาคของแข็งกับของไหล หรือแรงต้านทานเนื่องจากความหนืดของของไหล (Viscous Drag หรือ Wall Drag) และแรงต้านทานเนื่องจากความดันของของไหล (Pressure Drag หรือ Form Drag) เมื่อรวมแรงทั้งสองนี้เข้าด้วยกันจะได้แรงลากของของไหล (Drag Force) ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แรงลากที่เกิดขึ้นบนผิวอนุภาคของแข็งที่เคลื่อนที่ในของไหล (66)

แรงลากของของไหล มีความสัมพันธ์กับความเร็วสัมพัทธ์ (Relative Velocity) ของอนุภาคของแข็งและของไหล โดยจะเป็นไปตามทฤษฎีของ Boundary Layer กล่าวคือที่ความเร็วต่ำ ๆ ชั้นของของไหล (Layer of Fluid) ที่สัมผัสกับอนุภาคของแข็งจะเคลื่อนที่ตามอนุภาคนั้น ในขณะที่อีกชั้นหนึ่งซึ่งอยู่ติดกันจะไม่มีอาการเคลื่อนที่ ทำให้เกิดแรงเฉือน (Wall Shear) ขึ้นบริเวณระหว่างชั้นของของไหล นั่นคือเกิดแรงต้านทานเนื่องจากความหนืดของของไหลขึ้น สำหรับที่ความเร็วสัมพัทธ์ของอนุภาคของแข็งและของไหลสูง ๆ จะเกิดแรงต้านทานเนื่องจากความดันของของไหลขึ้น เนื่องจากมีการเคลื่อนที่ของของไหลนั่นเอง นอกจากนี้ แรงต้านทานเนื่องจากความหนืดและความดันของของไหล มีความสัมพันธ์กับรูปทรงของอนุภาคของแข็งด้วย พบว่าอนุภาคที่เป็นรูปทรงกลม แรงต้านทานเนื่องจากความหนืดของของไหลจะมาก ในขณะที่แรงต้านทานเนื่องจากความดันของของไหลจะมาก

ถ้าอนุภาคเต็มมีรูปทรงเหลี่ยม แต่อย่างไรก็ตาม แรงต้านทานเนื่องจากความหนืดหรือความดันของของไหล ก็มีผลทำให้อนุภาคของแข็งเคลื่อนที่ในของไหล ด้วยความเฉื่อยจนถึงความเร็วสุดท้ายได้ทั้งสิ้น

เรโนลด์ (Reynold) (68-69) พบว่าพฤติกรรมของของไหล มีความสัมพันธ์กับความต้านทานเนื่องจากการไหล (Flow Resistance) นั่นคือ มีความสัมพันธ์กับกลุ่มไร้มิติ (Dimensionless Group) กลุ่มหนึ่ง ซึ่งต่อมาเรียกกลุ่มไร้มิตินี้ว่าเรโนลด์นัมเบอร์ (Reynold's Number) สามารถให้นิยามของเรโนลด์นัมเบอร์ ดังต่อไปนี้

$$Re = \frac{wd\rho}{\mu} \quad \dots (3.1)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} Re &= \text{เรโนลด์นัมเบอร์} \\ w &= \text{ความเร็วสัมพัทธ์ของอนุภาคของแข็งและของไหล} \\ d &= \text{เส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคของแข็ง} \\ \rho &= \text{ความหนาแน่นของของไหล} \\ \mu &= \text{ความหนืดของของไหล} \end{aligned}$$

พบว่า

$$\begin{aligned} Re < 0.2 & \quad \text{พฤติกรรมการไหลจะเป็นแบบลามินาร์ (Laminar)} \\ 0.2 < Re < 1 \times 10^3 & \quad \text{พฤติกรรมการไหลจะเป็นแบบแทรนซิชัน (Transition)} \\ 1 \times 10^3 < Re < 2.5 \times 10^5 & \quad \text{พฤติกรรมการไหลจะเป็นแบบเทอร์บิวเลนต์ (Turbulent)} \\ Re < 2.5 \times 10^5 & \quad \text{พฤติกรรมการไหลจะเป็นแบบเหนือวิกฤต (Supercritical)} \end{aligned}$$

จากการวิเคราะห์เชิงมิติ (Dimensional Analysis) (68) แสดงให้เห็นว่าแรงลากของของไหลสำหรับพฤติกรรมการไหลแบบต่าง ๆ มีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$F_d = \frac{C_D A \rho w^2}{2} \quad \dots (3.2)$$

โดยที่

$$F_d = \text{แรงลากของของไหล}$$

$$C_D = \text{สัมประสิทธิ์ของการลาก (Drag Coefficient)}$$

$$A = \text{พื้นที่เงา (Projected Area) ของอนุภาค}$$

$$\text{ของแข็ง}$$

$$\frac{\rho w^2}{2} = \text{ความดันพลวัต (Dynamic Pressure)}$$

และสำหรับอนุภาคทรงกลม

$$F_d = \frac{C_D \pi d^2 \rho w^2}{24} \quad \dots (3.3)$$

สำหรับของไหลที่มีพฤติกรรมการไหลแบบลามินาร์ แรงลากของของไหลที่กระทำบนอนุภาคทรงกลม เป็นผลเนื่องมาจากแรงต้านทานเนื่องจากความหนืดของของไหล สามารถแสดงกฎของสโตก (Stokes' Law) ดังสมการ

$$F_d = 3\pi \mu d w \quad \dots (3.4)$$

และ

$$C_D = \frac{24}{Re} \quad \dots (3.5)$$

สำหรับของไหลที่มีพฤติกรรมการไหลแบบเทอร์นิชัน แรงลากของของไหลที่กระทำบนอนุภาคทรงกลม เป็นผลเนื่องมาจากแรงต้านทานเนื่องจากความหนืดและความดันของของไหล สามารถแสดงสูตรเอมพิริคัล (Empirical Equation) ได้ดังนี้

$$F_d = \frac{C_D \pi d^2 \rho w^2}{24}$$

โดยที่

$$C_D = \frac{21}{Re} + \frac{6}{Re^{0.5}} + 0.28 \quad \dots (3.6)$$

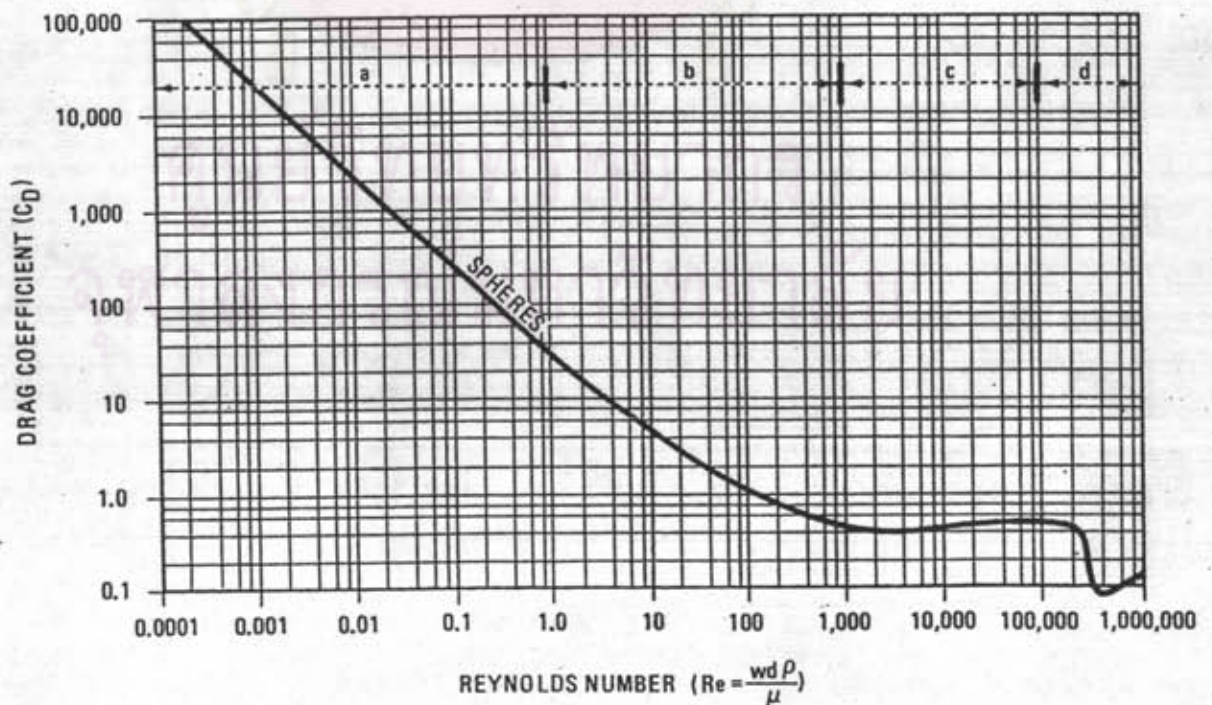
สำหรับของไหลที่มีพฤติกรรมการไหลแบบเทอร์บีวเลนต์ แรงลากของของไหลที่กระทำบนอนุภาคทรงกลม เป็นผลเนื่องมาจากแรงต้านทานเนื่องจากความดันของของไหล สามารถแสดงกฎของนิวตัน (Newton's Law) ดังสมการ

$$F_d = \frac{C_D \pi d^2 \rho w^2}{2 \cdot 4}$$

โดยที่

$$C_D = 0.4 \quad \dots (3.7)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การลาก และเรโนลด์สเบอร์ แสดงไว้ในกราฟรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง C_D และ Re สำหรับอนุภาคทรงกลม (69)

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง C_D และ Re สำหรับอนุภาคทรงกลม ซึ่งแบ่งค่าเรโนลด์เบอร์ออกเป็น 4 ช่วง คือ

1. ช่วง a คือ ช่วงที่มีค่าเรโนลด์เบอร์ต่ำกว่า 0.2 ($Re < 0.2$) ซึ่งพฤติกรรมการไหลของของไหลจะเป็นแบบลามินาร์ และความสัมพัทธ์ระหว่าง C_D และ Re จะเป็นไปตาม กฎของสโตก ซึ่งแสดงไว้ในสมการที่ (3.5)
2. ช่วง b คือ ช่วงที่มีค่าเรโนลด์เบอร์อยู่ระหว่าง 0.2 และ 1×10^3 ($0.2 < Re < 1 \times 10^3$) ซึ่งพฤติกรรมการไหลของของไหลจะเป็นแบบแทนซิชั่น นั่นคือ มีพฤติกรรมการไหลก้ำกึ่งกันระหว่างกฎของสโตกและกฎของนิวตัน ความสัมพันธ์ระหว่าง C_D และ Re จะเป็นไปตามสมการที่ (3.6)
3. ช่วง c คือช่วงที่มีค่าเรโนลด์เบอร์อยู่ระหว่าง 1×10^3 และ 2.5×10^5 ($1 \times 10^3 < Re < 2.5 \times 10^5$) ซึ่งพฤติกรรมการไหลของของไหลจะเป็นแบบเทอร์บิวเลนต์ และความสัมพันธ์ระหว่าง C_D และ Re จะเป็นไปตามกฎของนิวตัน พบว่า C_D ในช่วงนี้มีค่าค่อนข้างคงที่ คือ ประมาณ 0.4 ตามสมการที่ (3.7)
4. ช่วง D คือช่วงที่มีค่าเรโนลด์เบอร์มากกว่า 2.5×10^5 ($Re > 2.5 \times 10^5$) ซึ่งพฤติกรรมการไหลของของไหลจะเป็นแบบเหนือวิกฤต นั่นคือมีพฤติกรรมการไหลเบี่ยงเบนไปจากกฎของนิวตัน

3.1.1.2 ความเร็วสุดท้ายของอนุภาคของแข็ง (68-69)

การตัดขนาดด้วยวิธี Classification ขึ้นอยู่กับขนาด (Magnitude) ของความเร็วสุดท้ายในการเคลื่อนที่ของอนุภาคของแข็ง ว่ามีขนาดมากหรือน้อยกว่าขนาดความเร็วของของไหลที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ ส่วนหยาบจะประกอบไปด้วยอนุภาคที่มีขนาดความเร็วสุดท้ายมากกว่าความเร็วของของไหล และส่วนละเอียดจะประกอบไปด้วยอนุภาคที่มีขนาดความเร็วสุดท้ายน้อยกว่าความเร็วของของไหล

ความเร็วสุดท้ายในการเคลื่อนที่ของอนุภาคของแข็ง จะเกิดขึ้นภายใต้สภาวะสมดุลของแรงที่ทำให้อนุภาคของแข็งเคลื่อนที่ ซึ่งได้แก่แรงเนื่องจากความโน้มถ่วงหรือแรงหนีศูนย์กลาง กับแรงลอยตัว (Buoyancy Force) และแรงลากของของไหล

เมื่อพิจารณาอนุภาคทรงกลมซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลาง d มีความหนาแน่น σ เคลื่อนที่ด้วยแรงเนื่องจากความโน้มถ่วงในของไหลที่มีความหนาแน่น ρ พบว่าแรงที่กระทำบนอนุภาคจะประกอบไปด้วย แรงเนื่องจากความโน้มถ่วง แรงลอยตัว และแรงลาก

ของของไหล สามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่ของอนุภาคทรงกลมได้ดังนี้

$$m \frac{dw}{dt} = mg - mg \frac{\rho}{\sigma} - F_d \quad \dots (3.8)$$

โดยที่

$$m = \text{มวลของอนุภาคทรงกลม} = \frac{\pi d^3 \sigma}{6}$$

$$w = \text{ความเร็วสัมพัทธ์ของอนุภาคของแข็งและของไหล}$$

$$g = \text{ความเร่งเนื่องจากความโน้มถ่วงของโลก}$$

$$\sigma = \text{ความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง}$$

$$F_d = \text{แรงลากของของไหล} = C_D A \rho \frac{w^2}{2}$$

$$A = \text{พื้นที่เงาของอนุภาคทรงกลม} = \frac{\pi d^2}{4}$$

นั่นคือ

$$\frac{dw}{dt} = \frac{g(\sigma - \rho)}{\sigma} - \frac{3C_D \rho w^2}{4d\sigma} \quad \dots (3.9)$$

ที่ความเร็วสุดท้ายในการเคลื่อนที่ของอนุภาคทรงกลม $\frac{dw}{dt} = 0$ จะได้

$$w_c = \left[\frac{4g(\sigma - \rho)d}{3C_D \rho} \right]^{0.5} \quad \dots (3.10)$$

โดยที่

$$w_c = \text{ความเร็วสุดท้ายในการเคลื่อนที่ของอนุภาคทรงกลม}$$

จากสมการที่ (3.5) และ (3.10)

$$w_t = \frac{gd^2(\sigma-\rho)}{18\mu} \quad \dots (3.11)$$

สมการที่ (3.11) คือกฎของสโตก ซึ่งใช้หาความเร็วสุดท้ายของอนุภาคทรงกลมที่เคลื่อนที่ในของไหล ที่มีพฤติกรรมการไหลแบบลามินาร์ และใช้ได้กับอนุภาคทรงกลมที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่า 50 ไมครอน

จากสมการที่ (3.10) จะได้

$$C_D = \frac{4g(\sigma-\rho)d}{3\rho w_t^2} \quad \dots (3.12)$$

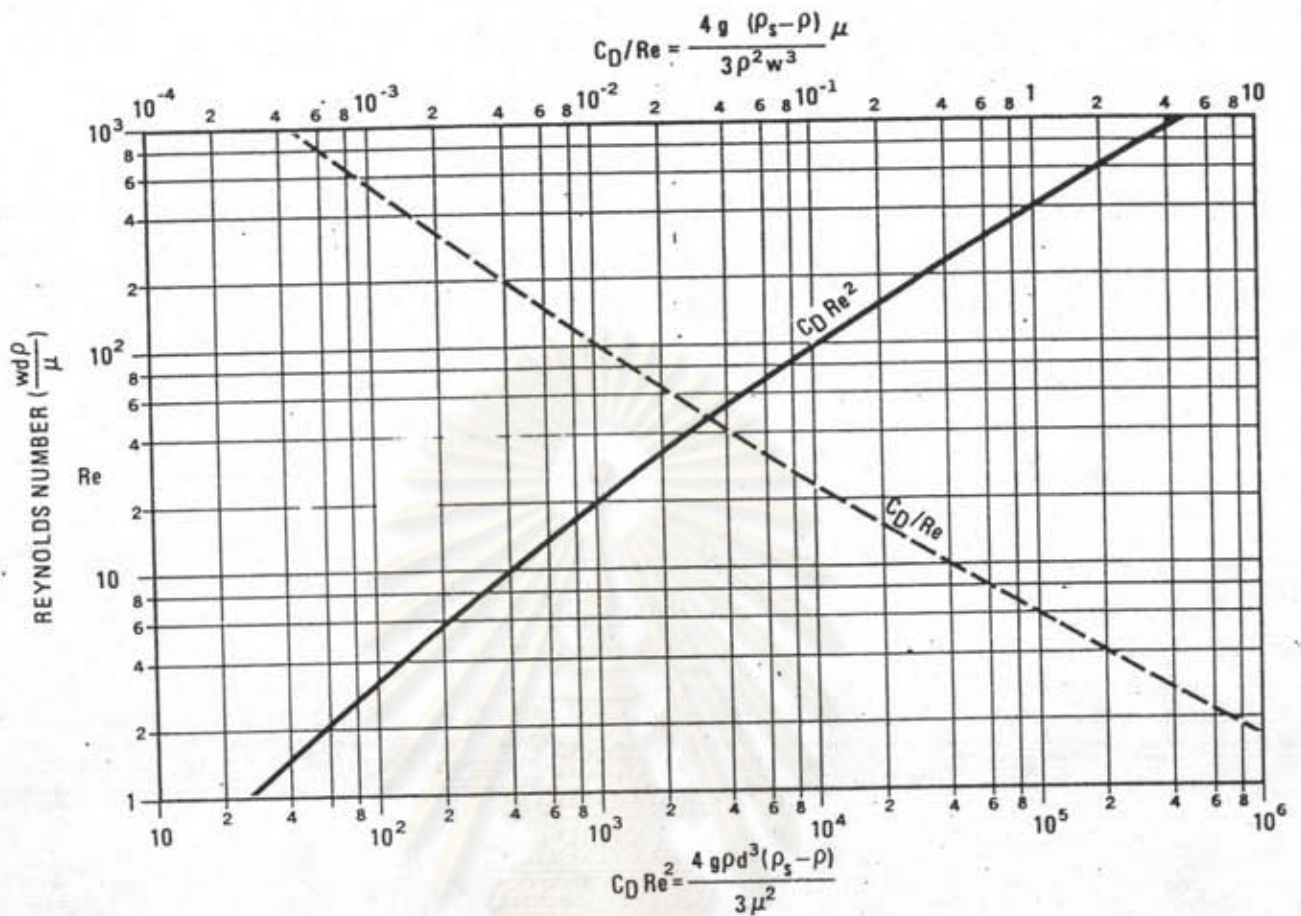
จากสมการที่ (3.12) หาค่าตลอดด้วย Re จะได้

$$\frac{C_D}{Re} = \frac{4g(\sigma-\rho)\mu}{3\rho^2 w_t^3} \quad \dots (3.13)$$

จากสมการที่ (3.12) คูณตลอดด้วย Re^2 จะได้

$$C_D Re^2 = \frac{4g(\sigma-\rho)\rho d^3}{3\mu^2} \quad \dots (3.14)$$

จะเห็นได้ว่า สมการที่ (3.13) จะไม่ขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคทรงกลม ในขณะที่สมการที่ (3.14) ไม่ขึ้นกับความเร็วสุดท้ายของอนุภาคทรงกลม จากสมการทั้งสองนี้ นำค่า C_D/Re และ $C_D Re^2$ ไปเขียนความสัมพันธ์กับค่า Re จะได้กราฟดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง C_D/Re และ $C_D Re^2$ กับ Re สำหรับอนุภาคทรงกลม (69)

สำหรับอนุภาคทรงกลมที่เคลื่อนที่ในของไหล ที่มีพฤติกรรมการไหลแบบแตรนวิชัน ความเร็วสุดท้ายของอนุภาคทรงกลม หาได้โดยการหาค่า C_D/Re จากกราฟรูปที่ 3.3 แล้วนำค่า C_D/Re ที่ได้มาแทนค่าลงในสมการที่ (3.13) จะได้ความเร็วสุดท้ายของอนุภาคทรงกลมที่ต้องการ

นอกจากนี้ยังสามารถหา ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคทรงกลมได้ โดยการหาค่า $C_D Re^2$ จากกราฟรูปที่ 3.3 แล้วนำค่า $C_D Re^2$ ที่ได้มาแทนค่าลงในสมการที่ (3.14) จะได้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคทรงกลมตามที่ต้องการ

จากสมการที่ (3.7) และ (3.10)

$$w_t = \left[\frac{3gd(\sigma - \rho)}{\rho} \right]^{0.5} \dots (3.15)$$

สมการที่ (3.15) คือกฎของนิวตัน ซึ่งใช้หาความเร็วสุดท้ายของอนุภาคทรงกลม ที่เคลื่อนที่ในของไหลที่มีพฤติกรรมการไหลแบบเทอร์วีวเลนต์ และใช้ได้กับอนุภาคทรงกลม ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางมากกว่า 5 มิลลิเมตร

3.1.1.3 การตกตัวอย่างอิสระ (Free Settling) (67)

การตกตัวอย่างอิสระของอนุภาคหมายถึง การตกตัวจนถึงความเร็วสุดท้ายของแต่ละอนุภาคของแข็งเป็นไปอย่างอิสระ การตกตัวอย่างอิสระจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อความเข้มข้นของของผสม (% Solids of Pulp) น้อยกว่าร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก

ความเร็วสุดท้ายในการตกตัวของอนุภาคทรงกลม ตามกฎของสโตกและกฎของนิวตัน จากสมการที่ (3.11) และ (3.15) สามารถเขียนในรูปแบบของสมการง่าย ๆ ตามลำดับดังนี้

$$w_t = k_1 d^2 (\sigma - \rho) \quad \dots (3.16)$$

และ

$$w_t = k_2 [d(\sigma - \rho)]^{0.5} \quad \dots (3.17)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} k_1 \text{ และ } k_2 &= \text{ค่าคงที่} \\ (\sigma - \rho) &= \text{Effective Density} \end{aligned}$$

จากสมการที่ (3.16) และ (3.17) แสดงให้เห็นว่าความเร็วสุดท้ายในการตกตัวของอนุภาคทรงกลม จะเป็นฟังก์ชันของขนาด และความหนาแน่นของอนุภาคทรงกลมเท่านั้น นั่นคือ

1. ถ้าอนุภาคทรงกลม 2 อนุภาคมีความหนาแน่นเท่ากัน อนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า จะมีความเร็วสุดท้ายในการตกตัวสูงกว่า

2. ถ้าอนุภาคทรงกลม 2 อนุภาคมีขนาดเท่ากัน อนุภาคที่หนักกว่า จะมีความเร็วสุดท้ายในการตกตัวสูงกว่า

เมื่อพิจารณาอนุภาคแนว 2 อนุภาค ซึ่งมีความหนาแน่น σ_a และ σ_b มีเส้นผ่าศูนย์กลาง d_a และ d_b ตามลำดับ ตกตัวในของไหลที่มีความหนาแน่น ρ ด้วยความเร็วในการตกตัวเท่ากัน ดังนั้น ความเร็วสุดท้ายในการตกตัวของอนุภาคทั้งสองจะเท่ากัน จากกฎของสโตกตามสมการที่ (3.16) ซึ่งเหมาะสำหรับอนุภาคแนวที่มีขนาดเล็ก จะได้

$$d_a^2(\sigma_a - \rho) = d_b^2(\sigma_b - \rho)$$

หรือ

$$\frac{d_a}{d_b} = \left[\frac{\sigma_b - \rho}{\sigma_a - \rho} \right]^{0.5} \quad \dots (3.18)$$

โดยที่

$\frac{d_a}{d_b}$ = สัดส่วนการตกตัวอย่างอิสระ (Free-Settling Ratio) ของอนุภาคแนวทั้งสอง

เช่นเดียวกัน จากกฎของนิวตันตามสมการที่ (3.17) ซึ่งเหมาะสำหรับอนุภาคแนวที่มีขนาดใหญ่ สัดส่วนการตกตัวอย่างอิสระของอนุภาคแนวทั้งสอง จะเท่ากับ

$$\frac{d_a}{d_b} = \frac{\sigma_b - \rho}{\sigma_a - \rho} \quad \dots (3.19)$$

เมื่อพิจารณาการคัดขนาดแร่กำลัสนา ซึ่งมีความหนาแน่น 7.5 ออกจากแร่ควออร์ตซ์ ซึ่งมีความหนาแน่น 2.65 โดยการคัดขนาดแบบเปียกที่น้ำเป็นตัวกลาง สำหรับอนุภาคแนวที่มีขนาดเล็ก จะใช้กฎของสโตกตามสมการที่ (3.18) ในการหาสัดส่วนการตกตัวอย่างอิสระของอนุภาคแนวกำลัสนาและควออร์ตซ์ดังนี้คือ

$$\left[\frac{7.5 - 1}{2.65 - 1} \right]^{0.5} = 1.99$$

นั่นคือ อนุภาคแร่กาลีนาจะตกตัวอย่างอิสระในน้ำด้วยความเร็วที่เท่ากับความเร็วในการตกตัวอย่างอิสระของแร่ควอร์ตซ์ ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่กว่าแร่กาลีนา 1.99 เท่า

สำหรับอนุภาคแร่ที่มีขนาดใหญ่ จะใช้กฎของนิวตันตามสมการที่ (3.19) ในการหาสัดส่วนการตกตัวอย่างอิสระของอนุภาคแร่กาลีนาและควอร์ตซ์ดังนี้คือ

$$\frac{7.5 - 1}{2.65 - 1} = 3.94$$

สามารถสรุปได้ว่า ในการคัดขนาดด้วยวิธี Classification ที่มีรูปแบบการตกตัวอย่างอิสระเกิดขึ้น ความแตกต่างของความหนาแน่นของอนุภาคแร่ 2 ชนิด จะมีผลต่อการคัดขนาดมากเมื่ออนุภาคแร่ทั้งสองมีขนาดใหญ่

สมการทั่วไปที่ใช้หาสัดส่วนการตกตัวอย่างอิสระของอนุภาคแร่คือ

$$\frac{d_a}{d_b} = \left[\frac{\sigma_b - \rho}{\sigma_a - \rho} \right]^n \quad \dots (3.20)$$

โดยที่

$n = 0.5$ สำหรับอนุภาคแร่ที่มีขนาดเล็กกว่า 50 ไมครอน

$n = 0.5 - 1$ สำหรับอนุภาคแร่ที่มีขนาดอยู่ในช่วง 50 ไมครอน ถึง 5 มิลลิเมตร

$n = 1$ สำหรับอนุภาคแร่ที่มีขนาดใหญ่กว่า 5 มิลลิเมตร

3.1.1.4 การตกตัวแบบ Hindered Settling (67)

สัดส่วนของอนุภาคแร่ในของผสมที่เพิ่มขึ้น ทำให้ของผสม
ประพืดตัวคล้ายของเหลวหนืด (Heavy Liquid) และอนุภาคแร่มีความเร็วในการตกตัว
น้อยลง เนื่องจากความหนาแน่นและความหนืดของของผสมที่เพิ่มขึ้น จะต้านการตกตัวอย่าง
อิสระของอนุภาค ในสภาวะเช่นนี้การตกตัวแบบ Hindered Settling จะเกิดขึ้น ซึ่งเป็น
ผลมาจากพฤติกรรมการไหลแบบเทอร์บีวเลนซ์ที่เกิดขึ้นในของไหล ดังนั้นจึงสามารถประยุกต์
กฎของนิวตันตามสมการที่ (3.17) เพื่อหาความเร็วสุดท้ายในการตกตัวของอนุภาคแร่ ดังนี้

$$w_c = k [d(\sigma - \rho_p)]^{0.5} \quad \dots (3.21)$$

โดยที่

$$\rho_p = \text{ความหนาแน่นของของผสม (Pulp Density)}$$

ความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งลดลง ทำให้ Effective
Density $(\sigma - \rho_p)$ และความเร็วสุดท้ายในการตกตัวของอนุภาคลดลง ในทำนองเดียวกัน
ถ้าอนุภาคของแข็งมีขนาดใหญ่ขึ้น ความเร็วสุดท้ายในการตกตัวของอนุภาคก็ลดลงเช่นเดียวกัน
เนื่องจากความหนาแน่นของของผสมที่เพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง
มีผลต่อการคัดขนาดด้วยวิธี Classification มากกว่าขนาดของอนุภาค ในสภาวะที่มีรูปแบบ
การตกตัวแบบ Hindered Settling เกิดขึ้นในการคัดขนาดนั้น ๆ

จากสมการที่ (3.21) สามารถเขียนสมการเพื่อหาสัดส่วนการ
ตกตัวแบบ Hindered Settling ได้ดังนี้

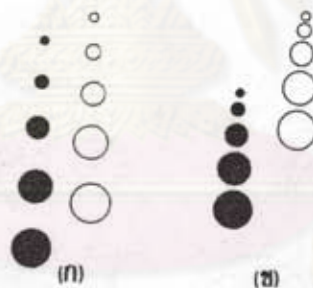
$$\frac{d_a}{d_b} = \frac{\sigma_b - \rho_p}{\sigma_a - \rho_p} \quad \dots (3.22)$$

เมื่อปล่อยให้อนุภาคร่อกาลีน่า และควอร์ตซ์ตกตัวในของผสมที่มี
ความหนาแน่น 1.5 จากสมการที่ (3.22) สัดส่วนการตกตัวแบบ Hindered Settling
ของอนุภาคร่อกาลีน่าและควอร์ตซ์จะเท่ากับ

$$\frac{d_a}{d_b} = \frac{7.5 - 1.5}{2.65 - 1.5} = 5.22$$

นั่นคือ อนุภาคแร่กำลังจะตกตัวในของผสม ด้วยความเร็วที่เท่ากับความเร็วในการตกตัวของแร่ควอร์ตซ์ ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าแร่กำลัง 5.22 เท่า ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับสัดส่วนการตกตัวแบบอิสระของอนุภาคของแข็งในของไหล ที่มีแรงต้านทานการไหลเนื่องจากความดัน ตามกฎของนิวตันที่เท่ากับ 3.94 จะเห็นได้ว่า สัดส่วนการตกตัวแบบ Hindered Settling จะมากกว่าสัดส่วนการตกตัวแบบอิสระเสมอ และสัดส่วนของเส้นผ่าศูนย์กลางเท่าของอนุภาคที่ตกตัว (The Ratio of the Diameter of Equal Settling Particles) จะเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของของผสมเพิ่มขึ้น

การคัดขนาดด้วยวิธี Classification ที่อาศัยรูปแบบการตกตัวแบบ Hindered Settling มาใช้ในการคัดขนาดนั้น เหมาะสำหรับอนุภาคแร่ที่มีขนาดใกล้เคียงกัน แต่มีความหนาแน่นต่างกัน ในขณะที่อาศัยรูปแบบการตกตัวแบบอิสระมาใช้ในการคัดขนาดอนุภาคแร่ที่มีขนาดต่างกันแต่มีความหนาแน่นใกล้เคียงกัน ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 รูปแบบการตกตัวของอนุภาคแร่ในการคัดขนาดด้วยวิธี Classification (67)

(ก) การตกตัวแบบอิสระ

(ข) การตกตัวแบบ Hindered Settling

ดังนั้น ในการคัดขนาดแร่ป้อน ซึ่งมีช่วงการกระจายขนาดมาก และมีความหนาแน่นของอนุภาคแร่ใกล้เคียงกัน เช่น ในการคัดขนาดดินขาวนั้น ความหนาแน่นของของผสมจะต้องน้อย เพื่อให้มีรูปแบบการตกตัวแบบอิสระเกิดขึ้นในการคัดขนาด เมื่อความหนาแน่นของของผสมเพิ่มขึ้นจนถึงจุด ๆ หนึ่ง อนุภาคแร่จะถูกปกคลุมด้วยแผ่นฟิล์มบาง ๆ ของน้ำ (Thin Film of Water) เนื่องจากแรงตึงผิว (Surface Tension) ของผสมก็จะประพฤติตัวเป็นของผสมสมบูรณ์ สภาวะแบบนี้เรียกว่า Quicksand ซึ่งมีผลทำให้ประสิทธิภาพในการคัดขนาดตกต่ำลง

3.2 ชนิดของเครื่องคัดขนาดด้วยวิธี Classification (66)

เครื่องคัดขนาดด้วยวิธี Classification ถูกออกแบบและนำมาใช้งานในลักษณะดังต่อไปนี้ คือ

1. เพื่อคัดขนาดอนุภาคที่มีขนาดหยาบและละเอียดในแร่ป้อนออกจากกัน ในทางปฏิบัติ จะใช้ในการคัดขนาดแร่ป้อนที่มีขนาดเล็กมากซึ่งไม่สามารถใช้ตะแกรงในการคัดขนาด
2. เพื่อแยกอนุภาคแร่ขนาดเล็กที่มีความหนาแน่นสูง ออกจากอนุภาคแร่ขนาดใหญ่ที่มีความหนาแน่นต่ำ
3. เพื่อแบ่งอนุภาคแร่ป้อนที่มีช่วงการกระจายขนาดกว้างออกเป็น ส่วน ๆ
4. เพื่อควบคุมการกระจายคุณสมบัติที่มีความสัมพันธ์ กับขนาดของอนุภาคแร่ป้อนก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการแต่งแร่ที่เหมาะสมต่อไป
5. เพื่อควบคุมขนาดที่ได้จากวงจรการบดแร่ละเอียด (Grinding Circuit)

เครื่องคัดขนาดด้วยวิธี Classification สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภทตามลักษณะกรรมวิธีการแยกส่วนหยาบในแร่ป้อนออกจากเครื่องคัดขนาด และทิศทางการไหลของของไหลที่เป็นตัวกลางในการคัดขนาด ดังนี้คือ

1. Mechanical Classifier เป็นเครื่องคัดขนาดที่อาศัยการทำงานเชิงกลเพื่อแยกส่วนหยาบ (Sand) ในแร่ป้อนออกจากเครื่องคัดขนาด โดยทั่วไปการทำงานเชิงกลนี้จะมีทิศทางการทำงานต้านกับแรงโน้มถ่วงโลก
2. Nonmechanical Classifier เป็นเครื่องคัดขนาดที่อาศัยแรงโน้มถ่วงโลก (Gravitational Force) หรือแรงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal Force) เพื่อแยกส่วนหยาบและละเอียดในแร่ป้อนออกจากกัน
3. Sedimentation Classifier เป็นเครื่องคัดขนาดที่อาศัยความแตกต่างของอัตราความเร็วในการตกตัวของอนุภาค ที่มีขนาดต่างกันของแร่ป้อนในของไหล ที่อยู่นิ่งเพียงอย่างเดียวมาใช้ในการคัดขนาด
4. Hydraulic หรือ Fluidized Bed Classifier เป็นเครื่องคัดขนาดที่อาศัย ความแตกต่างของอัตราความเร็วในการตกตัวของอนุภาคที่มีขนาดต่างกันของแร่ป้อนในของไหลที่มีกระแสไหลทวนขึ้น ซึ่งมีทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางการตกตัวของแร่ป้อนมาใช้ในการคัดขนาด

เครื่องคัดขนาดด้วยวิธี Classification ที่ใช้กันโดยทั่วไปได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.2

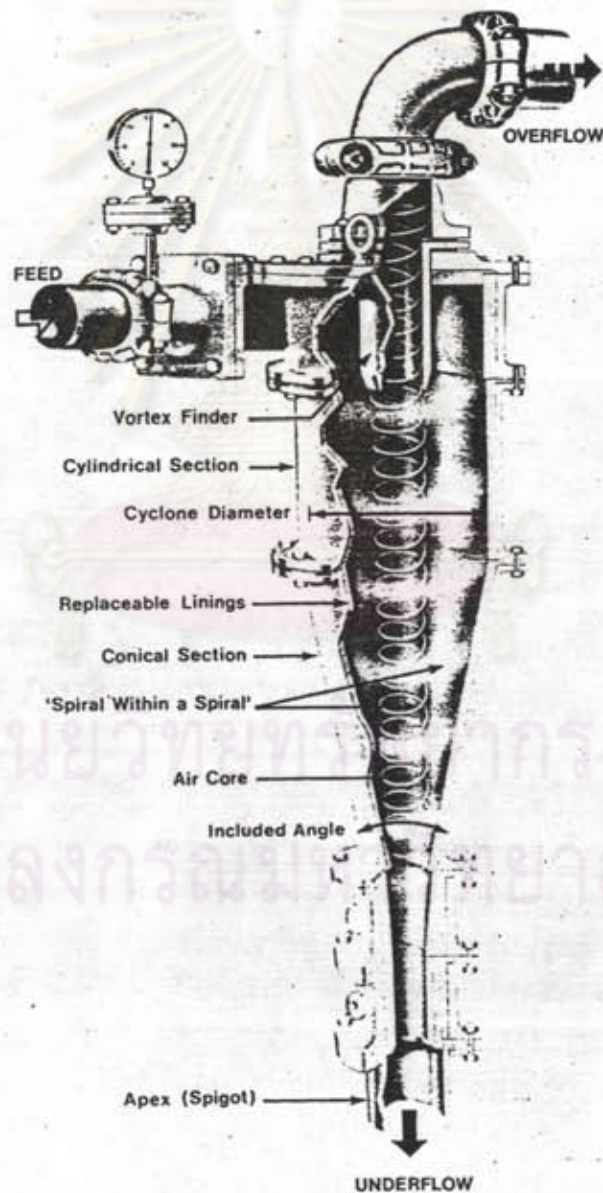
ตารางที่ 3.2 เครื่องคั่นขนาดด้วยวิธี Classification (66)

CLASSIFIER	(Type*)	DESCRIPTION	SIZE (m) - Width - Diameter - Max. Length	LIMITING SIZE (Max. Feed Size)	FEED RATE (t/hr)	VOL. % SOLIDS - Feed - Overflow - Sands	POWER (kW)	SUITABILITY AND APPLICATIONS
Sloping Tank Classifier (spiral, rake, drag)	(M-S)	Classification occurs near deep end of sloping, elongated pool. Spiral (Fig. 10.4), rake or drag mechanism lifts sands from pool.	0.3 to 7.0 2.4 (spiral) 14	1 mm to 45 μ m (25 mm)	5 to 850	Not critical 2 to 20 45 to 65	0.4 to 110	Used for closed circuit grinding, washing and dewatering, desliming; particularly where clean dry sands are important. (Drag classifier sands not so clean). In closed circuit grinding discharge mechanism (spirals especially) may give enough lift to eliminate pump.
Log Washer	(M-S)	Essentially a spiral classifier with paddles replacing the spiral. (Fig. 10.3).	0.8 to 2.6 0.6 to 1.1 4.6 to 11	(100 mm)	40 to 450		7.5 to 60	Used for rough separations such as removing trash, clay from sand. Also to remove or break down agglomerates.
Bowl Classifier	(M-S)	Extension of sloping tank classifiers, with settling occurring in large circular pool, which has rotating mechanism to scrape sands inwards (outwards in Bowl Desilter) to discharge rake or spiral.	0.5 to 6.0 1.2 to 15 12	150 μ m to 45 μ m (12 mm)	5 to 225	Not critical 0.4 to 8 50 to 60 (15 to 25 in Bowl Desilter)	Bowl: 0.75 to 7.5 Rake: 0.75 to 20	Used for closed circuit grinding (particularly regrind circuits) where clean sands are necessary. Larger pool allows finer separations. Bowl Desilter has larger pools (and capacities). Relatively expensive.
Hydraulic Bowl Classifier	(M-F)	Basically a hydraulic bowl classifier. Vibrating plate replaces rotating mechanism in pool. Hydraulic water passes through perforations in plate and fluidises sands.	1.2 to 3.7 1.2 to 4.3 12	1 mm to 100 μ m (12 mm)	5 to 225	Not critical 2 to 15 50 to 65	Vib: 2.2 to 7.5 Rake: 3.7 to 15	Gives very clean sands and has relatively low hydraulic water requirements (0.5 t/t sand). One of the most efficient single stage classifiers available for closed circuit grinding and washing. Relatively expensive.
Cylindrical Tank Classifier	(M-S)	Effectively an overloaded thickenner. Rotating rake feeds sands to central underflow.	- 3 to 45 -	150 μ m to 45 μ m (6 mm)	5 to 625	Not critical 0.4 to 8 15 to 25	0.75 to 11	Simple, but gives relatively inefficient separation. Used for primary dewatering where the separations involve large feed volumes, and sand drainage is not critical.
Hydraulic Cylindrical Tank Classifier	(M-F)	Hydraulic form of overloaded thickenner. Siphon-Sizer (N-F) uses siphon to discharge sands instead of rotating rake.	- 1.0 to 40 -	1.4 mm to 45 μ m (25 mm)	1 to 150	Not critical 0.4 to 15 20 to 35	0.75 to 11	Two-product device giving very clean sands. Requires relatively little hydraulic water (2 t/t sands). Used for washing, desliming, and closed circuit grinding.
Cone Classifier	(N-S)	Similar to cylindrical tank classifier, except tank is conical to eliminate need for rake.	- 0.6 to 3.7 -	600 μ m to 45 μ m (6 mm)	2 to 100	Not critical 5 to 30 35 to 60	None	Low cost (simple enough to be made locally), and simplicity can justify relatively inefficient separation. Used for desliming and primary dewatering. Solids build-up can be a problem.
Hydraulic Cone Classifier	(M-F)	Open cylindrical upper section with conical lower section containing slowly rotating mechanism.	- 0.6 to 1.6 -	400 μ m to 100 μ m (6 mm)	10 to 120	Not critical 2 to 15 30 to 50	3 to 7.5	Used primarily in closed circuit grinding to reclassify hydrocyclone underflow.

CLASSIFIER	(Type*)	DESCRIPTION	SIZE (m) - Width - Diameter - Max. Length	LIMITING SIZE (Max. Feed Size)	FEED Rate (t/hr)	VOL. % SOLIDS - Feed - Overflow - Sands	POWER (kW)	SUITABILITY AND APPLICATIONS
Hydrocyclone	(N-S)	(Pumped) pressure feed generates centrifugal action to give high separating forces, and discharge (Fig. 10.6)	- 0.01 to 1.2 -	300 μ m to 5 μ m (1400 μ m to 45 μ m)	to 20 m ³ /min	4 to 35 2 to 15 30 to 50	35 to 400 kN/m ² pressure head	Small cheap device, widely used for closed circuit grinding. Gives relatively efficient separations of fine particles in dilute suspensions.
Air Separator	(N-S)	Similar shape to hydrocyclone, but higher included angle. Internal impeller induces recycle within classifier (Fig. 10.8)	- 0.5 to 7.5 -	2 mm to 38 μ m	to 2100		4 to 500	Used where solids must be kept dry, such as cement grinding. Air classifiers may be integrated into grinding mill structure. (Fig. 8.9).
Solid Bowl Centrifuge	(M-S)	Power generates high settling forces. Slurry centrifuged against rotating bowl, and removed by slower rotating helical screw conveyor within bowl.	- 0.3 to 1.4 1.8	74 μ m to 1 μ m (6 mm)	0.04 to 2.5 m ³ /min	2 to 25 0.4 to 20 5 to 50	11 to 110	Relatively expensive, but high capacity for a given floor space; used for finer separations.
Scrubber	(M-S)	Essentially a rotating drum mounted on slight incline. (Fig. 10.2)	- 1.5 to 3.5 3 to 10	(450 mm)	to 700		1 to 55	Similar applications to log washer, but lighter action. Tumbling (85% critical speed) provides attrition to remove clay from sand. Also removes trash.
Counter Current Classifier	(M-F)	One form based on scrubber, another on spiral classifier. They have wash water added to flow essentially horizontally in opposite direction to sands which are conveyed and resuspended by some form of spiral.	- 0.5 to 3.3 (spiral type) 12 (spiral type)	2 mm to 40 μ m	3 to 600	Not critical 2 to 15 50 to 65	0.2 to 19	Very clean sands product, but relatively low capacity for a given size.
Elutriator	(N-F)	Basically a tube with hydraulic water fed near bottom to produce hindered settling. Sands withdrawn through valves at base. Column may be filled with network to even out flow. (Fig. 10.7)	- 1.2 to 4.3 -	2.4 mm to 100 μ m (7.5 mm)	4 to 120	15 to 35 0.4 to 5 20 to 35	0.75 for valves	Simple and relatively efficient separation. Normally a two product device but may be operated in series to give a range of size fractions.
Pocket Classifier	(N-F)	A series of classification pockets, with decreasing quantities of hydraulic water in each, producing a range of product sizes. (Fig. 10.5)	0.5 to 6.0 - 12	2.4 mm to 100 μ m (10 mm)	4 to 120	15 to 35 0.4 to 5 20 to 35		Efficient separations, but requires 3 t hydraulic water/t sand. Used to produce exceptionally clean sands fractionated into narrow size ranges.

*M: Mechanical transport of sands to discharge
N: Non-mechanical (gravity or pressure) discharge of sands.
S: Sedimentation classifier
F: Fluidized bed classifier

ไฮโดรไซโคลน (Hydrocyclone) (66-68) เป็นเครื่องคัดขนาดด้วยวิธี Classification ที่ได้รับการยอมรับและใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมแร่ รูปร่างของไฮโดรไซโคลน ซึ่งได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.5 จะประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นรูปทรงกระบอก (Cylindrical Section) อยู่ส่วนบนยึดติดกับส่วนที่เป็นรูปทรงกรวย (Conical Section) ซึ่งอยู่ส่วนล่าง ท่อทางเข้าแร่ป้อน (Inlet Pipe) และทางออกส่วนละเอียด (Vortex Finder) ติดตั้งที่ด้านข้างและบนของส่วนที่เป็นรูปทรงกระบอกตามลำดับ สำหรับส่วนปลายของรูปทรงกรวยจะเป็นทางออกของส่วนหยาบ (Apex หรือ Spigot)



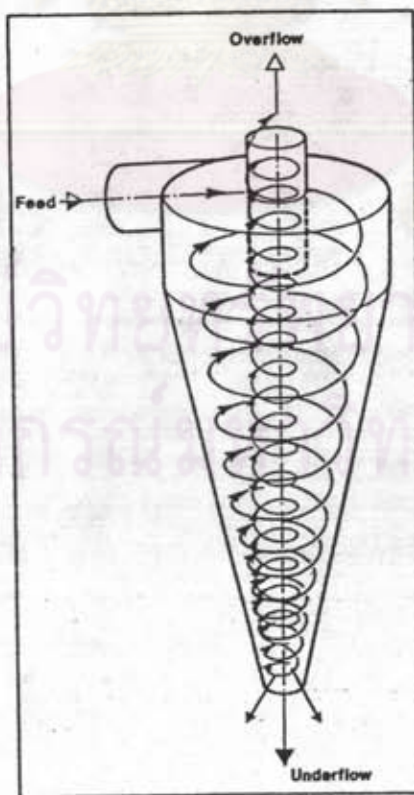
รูปที่ 3.5 ไฮโดรไซโคลน (66)

3.3 กลไกของการคัดขนาดในไฮโดรไซโคลอน

ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับ กลไกของการคัดขนาดที่เกิดขึ้นในไฮโดรไซโคลอน มีความจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการออกแบบไฮโดรไซโคลอน การทำนายผลของตัวแปรต่าง ๆ ทั้งตัวแปรที่ได้จากการออกแบบ และตัวแปรทำงานที่มีต่อประสิทธิภาพการคัดขนาดด้วยไฮโดรไซโคลอน และการนำไฮโดรไซโคลอนไปประยุกต์ใช้อย่างเหมาะสม ดังนั้นเพื่อความเข้าใจถึงกลไกของการคัดขนาดในไฮโดรไซโคลอน จำเป็นที่จะต้องทราบรูปแบบการไหล (Flow Patterns) ของของไหล การกระจายความเร็ว (Velocity Distribution) ของของไหล และพฤติกรรมของอนุภาคของแข็งในไฮโดรไซโคลอน

3.3.1 รูปแบบการไหลของของไหลในไฮโดรไซโคลอน (66,70-74)

การทำงานหรือการคัดขนาดที่เกิดขึ้นในไฮโดรไซโคลอน เป็นผลเนื่องมาจากแรงหนีศูนย์กลางที่เกิดขึ้นในไฮโดรไซโคลอน นั่นคือทำให้เกิดรูปแบบการไหลแบบ Spiral Within a Spiral ขึ้นตามรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 รูปแบบการไหลแบบ Spiral Within a Spiral ในไฮโดรไซโคลอน (72)

เมื่อป้อนของผสมด้วยแรงดันสูง เข้าไปตามแนวเส้นสัมผัสสว่างกลมของไฮโดรไฮโดรอน จะทำให้เกิดแรงที่ศูนย์กลางตามแนวรัศมีเป็นกระแสที่วนขึ้นนอก (Outer Vortex) และแรงนี้จะทำให้เกิดการกระจายตัวของอนุภาคของแข็งตามแนวนอน กล่าวคืออนุภาคที่มีขนาดหยาบจะแยกตัวเข้าสู่ผนังกรวยอย่างรวดเร็ว และถูกเหวี่ยงออกจากไฮโดรไฮโดรอนทางทางออก ส่วนหยาบ ขณะเดียวกันเมื่อกระแสที่วนขึ้นนอกที่มีอนุภาคขนาดละเอียด ซึ่งแยกตัวได้เข้าอยู่เคลื่อนที่ถึงปลายกรวยที่มีทางออกส่วนหยาบขนาดเล็ก จะก่อตัวเป็นกระแสที่วนขึ้นใน (Inner Vortex) มีทิศทางหมุนเหมือนกับกระแสที่วนขึ้นนอก แต่มีการเคลื่อนที่ตรงกันข้าม นั่นคือกระแสนี้จะพัดพาอนุภาคขนาดละเอียดขึ้นมา และออกไปทางทางออกส่วนละเอียด

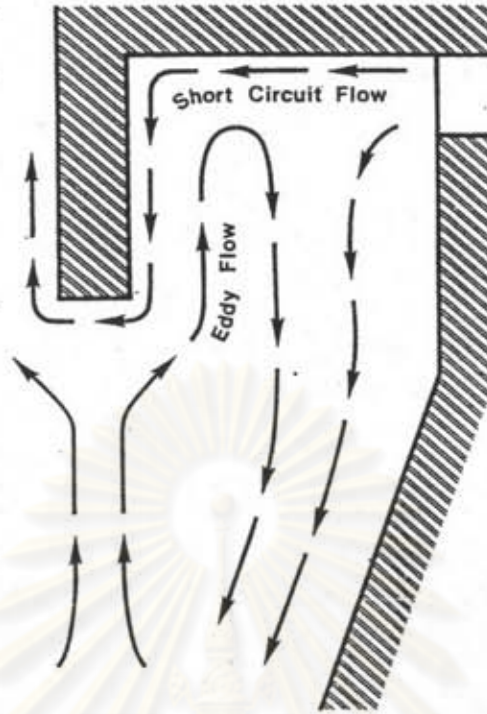
นอกจากรูปแบบการไหลแบบ Spiral Within a Spiral ซึ่งเป็นรูปแบบสำคัญที่ทำให้เกิดการคัดขนาดขึ้นในไฮโดรไฮโดรอนแล้ว ยังมีรูปแบบการไหลอื่น ๆ ดังต่อไปนี้ คือ

1. Short Circuit Flow เกิดขึ้นบริเวณตอนบนของผนังรูปทรงกระบอก และทางออกส่วนละเอียดของไฮโดรไฮโดรอน ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 3.7 เนื่องจากความเสียดทานของผนัง (Wall Friction) ทำให้บริเวณนี้มีการต้านทานการไหลของของไหลต่ำและของผสมที่ป้อนเข้าสู่ไฮโดรไฮโดรอน จะเคลื่อนที่ออกไปทางทางออกส่วนละเอียดโดยไม่มีการคัดขนาดเลย

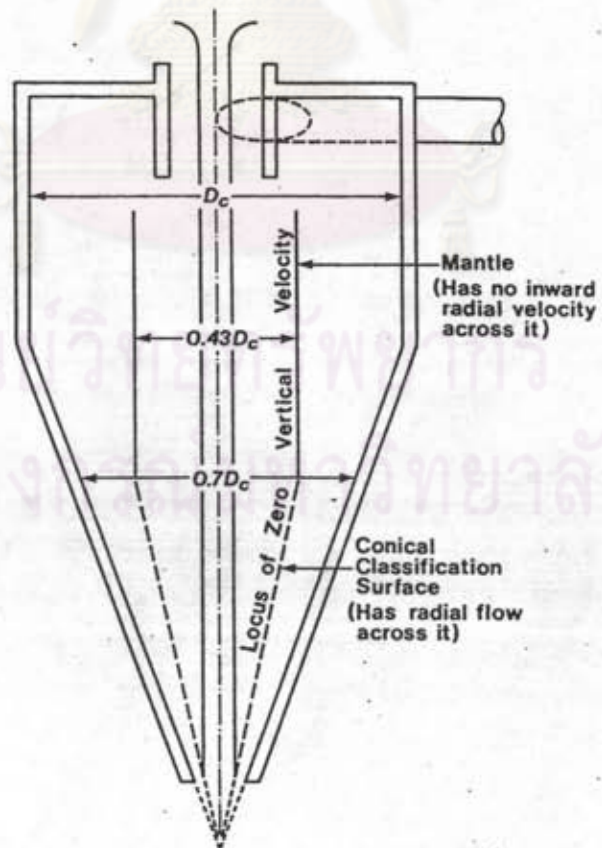
2. Eddy Flow เกิดขึ้นบริเวณด้านนอกของผนังของทางออกส่วนละเอียด ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 3.7 เนื่องจากทางออกส่วนละเอียดมีขนาดเล็กเกินไป ทำให้อนุภาคขนาดละเอียดที่ถูกคัดขนาดแล้วบางส่วน ไม่สามารถเคลื่อนที่ออกไปทางทางออกส่วนละเอียดได้อย่างสะดวก จึงเกิดรูปแบบการไหลวนขึ้นในไฮโดรไฮโดรอน

3. The Locus of Zero Vertical Velocity (LZVV) เกิดขึ้นบริเวณรอยสัมผัสระหว่างกระแสที่วนขึ้นใน และนอก ซึ่งบริเวณนี้ จะมีความเร็วตามแนวตั้ง (Vertical Velocity) เท่ากับศูนย์ ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.8 พบว่า LZVV จะเป็นรูปทรงกระบอก ซึ่งเรียกว่า Mantle มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 0.43 เท่าของขนาดไฮโดรไฮโดรอน และจะเป็นรูปทรงกรวยซึ่งเรียกว่า Conical Classification Surface เมื่อถึงระดับที่เส้นผ่าศูนย์กลางของกรวย มีขนาดเท่ากับ 0.7 เท่าของขนาดไฮโดรไฮโดรอน นอกจากนี้รูปแบบการไหลแบบ Eddy Flow จะมีจุดศูนย์กลางของการไหลวนอยู่ที่ LZVV เสมอ

4. The Formation of Air Core เกิดขึ้นเป็นรูปทรงกระบอกที่บริเวณกึ่งกลางตลอดแนวความยาวของไฮโดรไฮโดรอน ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 3.8 เนื่องจากการไหลหมุนวนอย่างรวดเร็วของกระแสที่วน ทำให้เกิดบริเวณที่มีความดันต่ำขึ้น และอากาศจะเข้าไปแทนที่บริเวณนี้ ทำให้เกิด Air Core ขึ้น เมื่อทางออกส่วนหยาบและละเอียดเปิดออกสู่บรรยากาศปกติ



รูปที่ 3.7 รูปแบบการไหลแบบ Short Circuit Flow และ Eddy Flow (66)



รูปที่ 3.8 The Locus of Zero Vertical Velocity และ Air core (66)

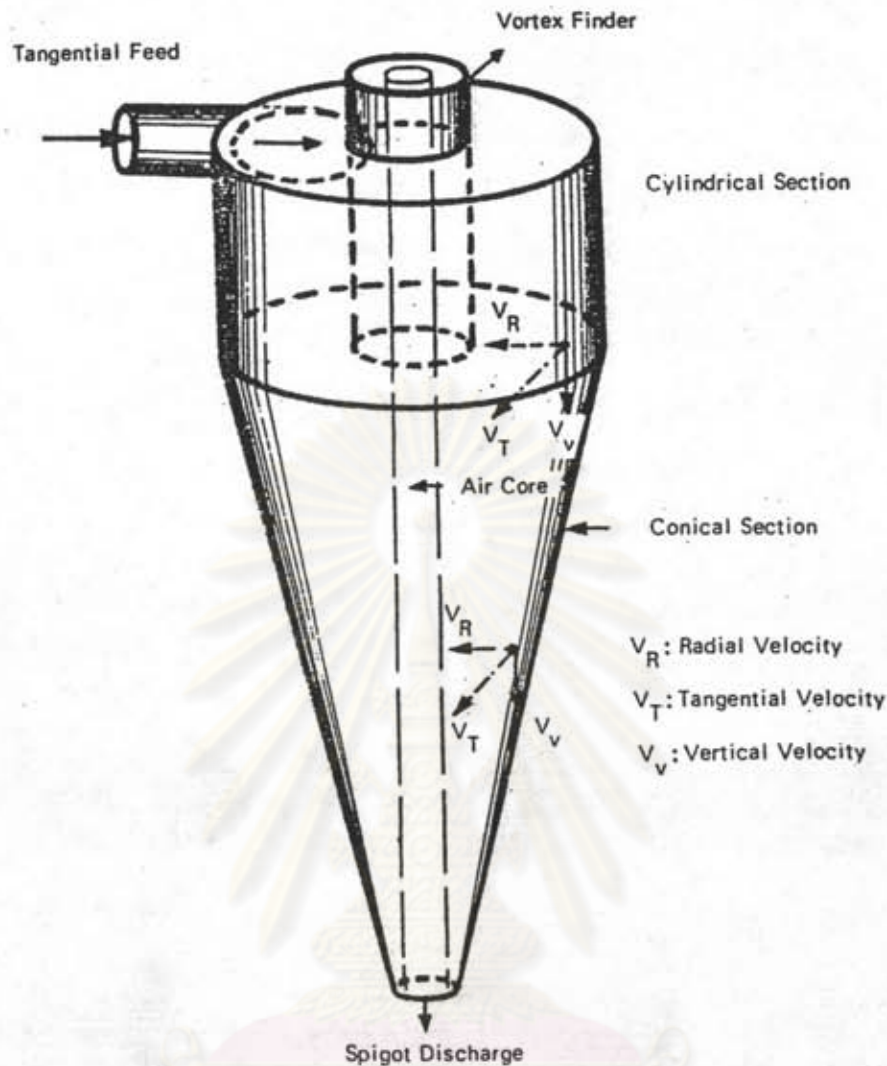
โดยปกติแล้ว ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ Air Core จะอยู่ในช่วง 0.06 ถึง 0.33 เท่าของขนาดของไฮโดรไซโคลน Fontein และคณะ (70) พบว่าขนาดของ Air Core จะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดทางออกส่วนละเอียดเพิ่มขึ้น แต่ขนาดของ Air Core จะไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อมีการเพิ่มหรือลดขนาดทางออกส่วนหยาบ นอกจากนี้ขนาดของ Air Core จะเพิ่มขึ้นเมื่อมุมกรวย (Cone Angle) ของไฮโดรไซโคลนเพิ่มขึ้น

The Formation of Air Core เป็นรูปแบบที่ชี้ให้เห็นถึงการมีอยู่ของรูปแบบการไหลแบบ Spiral within a Spiral ในไฮโดรไซโคลน พบว่าความดันต่ำสุดของของผสมที่ป้อนเข้าสู่ไฮโดรไซโคลน ที่จะทำให้เกิด Air Core ขึ้นนั้นประมาณ 5 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว นั่นคือที่ความดันต่ำกว่านี้จะไม่มีการัดขนาดเกิดขึ้นในไฮโดรไซโคลนเลย

3.3.2 การกระจายความเร็วของของไหลในไฮโดรไซโคลน

Kelsall (70) ได้ศึกษาการกระจายความเร็วของของไหล ในไฮโดรไซโคลน เพื่อสร้างแบบจำลองทางทฤษฎี (Theoretical Model) ของขบวนการัดขนาดและรูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นในไฮโดรไซโคลน พบว่า ความเร็วของของไหล ณ จุดใด ๆ ในไฮโดรไซโคลนสามารถกระจายความเร็วออกเป็น 3 แนว คือความเร็วตามแนวตั้ง (Vertical or Axial Velocity) ความเร็วตามแนวรัศมี (Radial Velocity) และความเร็วตามแนวเส้นสัมผัสวงกลม (Tangential Velocity) ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 3.9

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

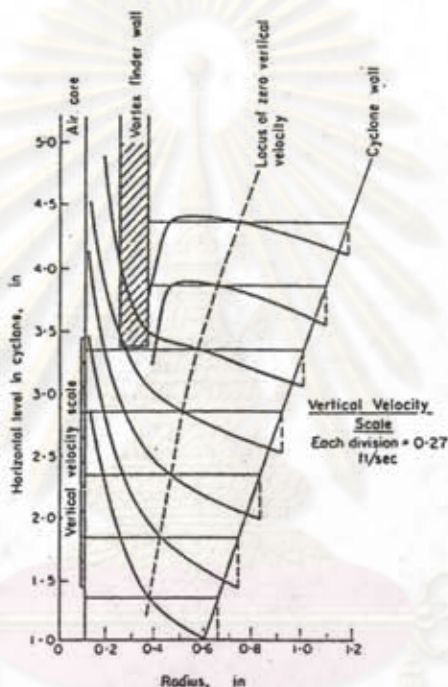


รูปที่ 3.9 การกระจายความเร็วของของไหล ในไฮโดรไซโคลน (73)

3.3.2.1 ความเร็วตามแนวตั้ง

เป็นที่ทราบแล้วว่า กระแสน้ำวนขึ้นในและนอกมีทิศทางในการเคลื่อนที่ตรงกันข้ามกันในแนวตั้ง คือกระแสน้ำวนขึ้นนอกมีทิศทางเคลื่อนที่ลง ในขณะที่กระแสน้ำวนขึ้นในมีทิศทางเคลื่อนที่ขึ้น และ LZVV เกิดขึ้นบริเวณรอยสัมผัสของกระแสน้ำวนทั้งสองนี้ Kelsall (70) ได้ศึกษาการกระจายความเร็วตามแนวตั้งของของไหลในไฮโดรไซโคลน และแสดงผลการศึกษาไว้ในรูปที่ 3.10 พบว่าที่ระดับใต้ฐานของทางออกส่วนละเอียด ของไหลจะเคลื่อนที่ขึ้นด้วยความเร็วที่มากกว่าความเร็วของของไหลที่เกิดขึ้นเหนือระดับของทางออกส่วนละเอียดซึ่งมีทิศทางเคลื่อนที่ลง และความเร็วของของไหลจะเพิ่มขึ้น เมื่อของไหลมีระยะห่างจาก LZVV เพิ่มขึ้น และเข้าใกล้ทางออกส่วนหยาบมากขึ้น

ลักษณะสำคัญอย่างหนึ่งที่ไม่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.10 ก็คือ LZVV ชุดที่ 2 ซึ่งอยู่บริเวณระหว่าง LZVV ชุดที่ 1 และผนังของไฮโดรไซโคลน LZVV ชุดนี้ แยกของไหลที่มีทิศทางเคลื่อนที่ลงออกเป็น 2 ส่วน คือ ของไหลที่อยู่ด้านนอกติดกับผนังของไฮโดรไซโคลนจะมีทิศทางเคลื่อนที่ลงและออกไปทางทางออกส่วนหยาบ และของไหลส่วนที่เหลือที่อยู่ด้านในติดกับ LZVV ชุดที่ 1 จะกลายมาเป็นของไหลที่มีทิศทางเคลื่อนที่ขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าที่เหนือระดับของทางออกส่วนละเอียด LZVV ชุดที่ 2 เกิดขึ้นเนื่องจาก Short Circuit Flow



รูปที่ 3.10 การกระจายความเร็วตามแนวตั้งของของไหลในไฮโดรไซโคลน (70)

3.3.2.2 ความเร็วตามแนวรัศมี

ความเร็วตามแนวรัศมีของของไหลซึ่งมีค่าน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับความเร็วตามแนวตั้งและแนวเส้นสัมผัสสว่างกลมที่เกิดขึ้นในไฮโดรไซโคลน จะดำเนินการตกตัวของอนุภาคของแข็งที่ถูกเหวี่ยงด้วยแรงหนีศูนย์กลาง เข้าสู่ผนังของไฮโดรไซโคลนและออกทางทางออกส่วนหยาบ จากรูปที่ 3.11 Kelsall (70) ได้แสดงผลการศึกษาการกระจายความเร็วตามแนวรัศมีของของไหลในไฮโดรไซโคลน พบว่า ที่ระดับใด ๆ ตามแนวนอนของผนังกรวยของไฮโดรไซโคลน ความเร็วตามแนวรัศมีของของไหล จะมีทิศทางเคลื่อนที่เข้าสู่จุดศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลน โดยที่จะมีค่ามากที่สุดที่ผนังกรวยและจะลดต่ำลงมาเมื่อเข้าใกล้

จุดศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลน จนกระทั่งมีค่าเท่ากับศูนย์ที่หน้าสัมผัสของ Air Core นอกจากนี้ Lilge (73) ยังพบว่า ที่ระดับฐานของทางออกส่วนละเอียดของไฮโดรไซโคลน ความเร็วตามแนวรัศมีของของไหลจะมีค่าเท่ากับศูนย์ที่ LZVV ด้วย

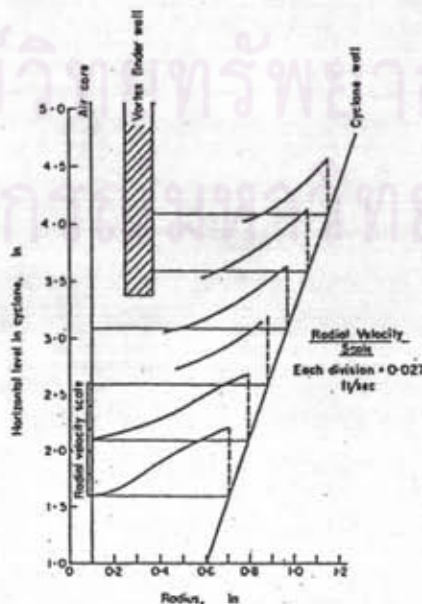
Kelsall (70) ได้แสดงสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วตามแนวรัศมี และแนวตั้งของของไหลที่ผนังกรวยของไฮโดรไซโคลนดังนี้

$$V_r = V_v \tan \theta / 2 \quad \dots (3.23)$$

โดยที่

- V_r = ความเร็วตามแนวรัศมีของของไหล
- V_v = ความเร็วตามแนวตั้งของของไหล
- θ = มุมกรวยของไฮโดรไซโคลน

นอกจากนี้ Kelsall ยังพบว่า ที่บริเวณด้านบนของผนังรูปทรงกระบอกของไฮโดรไซโคลน ความเร็วตามแนวรัศมีของของไหลจะมีค่ามาก เป็นผลเนื่องมาจากมีรูปแบบการไหลแบบ Short Circuit Flow เกิดขึ้นบริเวณนี้ และบางส่วนของบริเวณระดับตอนบนเหนือฐานของทางออกส่วนละเอียด ที่มีรูปแบบการไหลแบบ Eddy Flow เกิดขึ้น พบว่า ความเร็วตามแนวรัศมีของของไหลจะมีทิศทางเคลื่อนที่ออกจากจุดศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลน



รูปที่ 3.11 การกระจายความเร็วตามแนวรัศมีของของไหลในไฮโดรไซโคลน (70)

3.3.2.3 ความเร็วตามแนวเส้นสัมผัสวงกลม

ความเร็วตามแนวเส้นสัมผัสวงกลมของของไหลที่เกิดขึ้น ในไฮโดรไซโคลน สามารถอธิบายได้โดยอาศัยกฎการอนุรักษ์โมเมนตัมเชิงมุม (Conservation of Angular Momentum) ดังสมการ

$$V_c r = \text{ค่าคงที่} \quad \dots (3.24)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} V_c &= \text{ความเร็วตามแนวเส้นสัมผัสวงกลมของของไหล} \\ r &= \text{รัศมีกรวยของไฮโดรไซโคลน} \end{aligned}$$

นั่นคือ ความเร็วตามแนวเส้นสัมผัสวงกลมของของไหลที่เคลื่อนที่จากผนังกรวย เข้าสู่จุดศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลนจะเพิ่มขึ้น เมื่อรัศมีกรวยของไฮโดรไซโคลนลดลง

จากผลการศึกษาวิจัยของ Driessen และคนอื่น ๆ (71) พบว่า ที่ระดับใต้ฐานของทางออกส่วนละเอียด ความเร็วตามแนวเส้นสัมผัสวงกลมของของไหลในบริเวณกระแสไหลวนชั้นนอก มีความสัมพันธ์กับรัศมีกรวยของไฮโดรไซโคลน ดังสมการ

$$V_c r^n = \text{ค่าคงที่} \quad \dots (3.25)$$

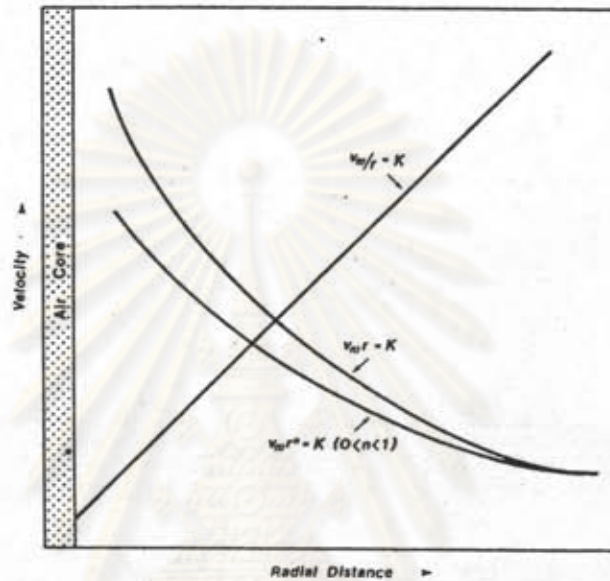
โดยที่

n มีค่าน้อยกว่า 1 คือ อยู่ในช่วง 0.5 - 0.9

โดยปกติแล้ว ค่า n จะขึ้นอยู่กับตัวแปรที่ได้จากการออกแบบ (Designed Variables) มากกว่าตัวแปรทำงาน (Operating Variables) ของไฮโดรไซโคลน และ $n = 1$ เมื่อของไหลเคลื่อนที่ด้วยโมเมนตัมเชิงมุม (Angular Momentum) คงที่ และ จะเกิด Free Vortex ขึ้นในไฮโดรไซโคลน สำหรับของไหลที่ประพัตติตัวคล้ายของแข็ง (Solid Body) และ หมุนรอบแกนตั้งของไฮโดรไซโคลนด้วยความเร็วเชิงมุม (Angular Velocity) คงที่ จะเกิด Forced Vortex ขึ้นในไฮโดรไซโคลน และ n จะมีค่าเท่ากับ -1 ดังสมการ

$$v_c r^{-1} = \text{ค่าคงที่} \quad \dots (3.26)$$

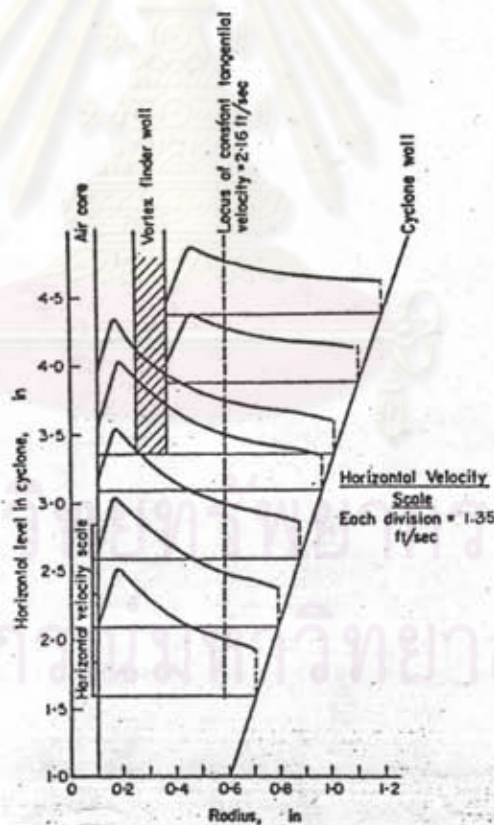
ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็วตามแนวเส้นสัมผัสวงกลมของ
ของไหล และรัศมีกรวยของไฮโดรไซโคลน ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วตามแนวเส้นสัมผัสวงกลมของของไหลและรัศมีกรวยของไฮโดรไซโคลน (66)

จากสมการที่ (3.24), (3.25) และรูปที่ 3.12 นี้ให้เห็นว่า ความเร็วตามแนวเส้นสัมผัสวงกลมของของไหลมีแนวโน้มเข้าสู่ศูนย์ที่จุดกึ่งกลางของไฮโดรไซโคลน แต่ในทางปฏิบัติแล้วสภาวะเช่นนี้จะไม่เกิดขึ้นในไฮโดรไซโคลน คือเมื่อรัศมีกรวยของไฮโดรไซโคลนมีขนาดเล็กถึงระดับหนึ่งแล้ว ความเร็วตามแนวเส้นสัมผัสวงกลมของของไหลจะลดต่ำลง และความเร็วเชิงมุมของของไหลจะมีค่าคงที่ และเกิด Forced Vortex ขึ้นที่บริเวณกระแสน้ำวนชั้นในรอบ ๆ Air Core ดังนั้นบริเวณรอบ Air Core ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วตามแนวเส้นสัมผัสวงกลมของของไหล และรัศมีกรวยของไฮโดรไซโคลน จะเป็นไปตามสมการที่ 3.26

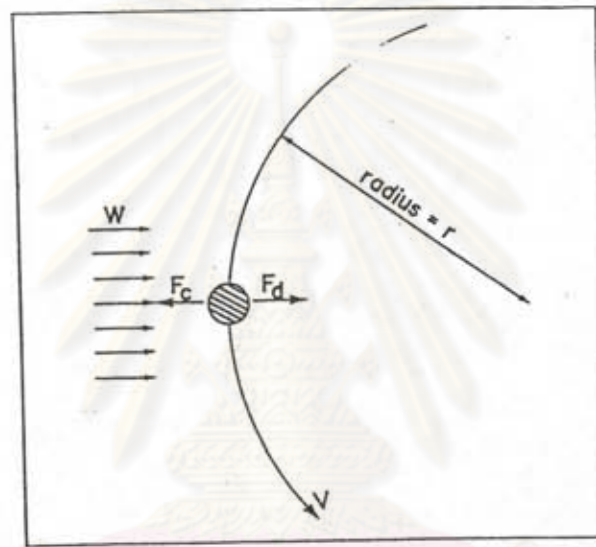
Kelsall (70) ได้แสดงผลการศึกษาการกระจายความเร็วตามแนวเส้นสัมผัสสว่างกลมของของไหลในไฮโดรไซโคลอน ไว้ในรูปที่ 3.13 พบว่าที่รัศมีกรวยใด ๆ ของไฮโดรไซโคลอน ความเร็วตามแนวเส้นสัมผัสสว่างกลมจะมีค่าคงที่ และมี Locus of Constant Tangential Velocity (LCTV) เป็นรูปทรงกระบอกตลอดแนวความยาวจากทางออกส่วนหยาบถึงทางออกส่วนละเอียด และความเร็วตามแนวเส้นสัมผัสสว่างกลมจะมีค่าสูงสุดที่ Locus of Maximum Tangential Velocity (LMTV) คือ ที่ระยะห่าง 0.17 เท่าของรัศมีกรวยจากจุดศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลอน ซึ่งความเร็วตามแนวเส้นสัมผัสสว่างกลมสูงสุดนี้จะไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อความดันป้อนของของผสม ขนาดทางออกส่วนหยาบ และละเอียดของไฮโดรไซโคลอนเปลี่ยนแปลง พบว่าที่ LMTV นี้ ของไหลจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเชิงมุมคงที่ นอกจากนี้ ความเร็วตามแนวเส้นสัมผัสสว่างกลม จะไม่ขึ้นอยู่กับความต่างระดับในแนวตั้งของกรวยของไฮโดรไซโคลอน



รูปที่ 3.13 การกระจายความเร็วตามแนวสัมผัสสว่างกลมของของไหลในไฮโดรไซโคลอน (70)

3.3.3 พฤติกรรมของอนุภาคของแข็งในไฮโดรไซโคลอน (66-67, 70-74)

ผลการศึกษาพฤติกรรมของอนุภาคของแข็งในไฮโดรไซโคลอน ยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัด โดยเฉพาะอย่างยิ่ง พฤติกรรมของอนุภาคของแข็งในแบริออน ที่มีความเข้มข้นของของผสม (% Solids of Pulp) สูง ๆ พบว่าการคัดขนาดที่เกิดขึ้นในไฮโดรไซโคลอนเป็นผลเนื่องมาจากแรงที่กระทำบนอนุภาคของแข็ง ในทิศทางตรงกันข้ามกัน 2 แรงคือ แรงหนีศูนย์กลางและแรงลากของของไหล ซึ่งแสดงไว้ที่รูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 แรงที่กระทำบนอนุภาคของแข็งในไฮโดรไซโคลอน (67)

แรงหนีศูนย์กลาง คือแรงที่กระทำบนอนุภาคของแข็งให้มีทิศทางการเคลื่อนที่เข้าสู่ผนังของไฮโดรไซโคลอน สำหรับอนุภาคทรงกลม แรงหนีศูนย์กลางสามารถเขียนเป็นสมการดังนี้

$$F_c = \frac{\pi d^3 (\sigma - \rho) V_c^2}{6 r} \quad \dots (3.27)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} F_c &= \text{แรงหนีศูนย์กลางที่กระทำบนอนุภาคของแข็ง} \\ d &= \text{ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคทรงกลม} \\ \sigma &= \text{ความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง} \end{aligned}$$

- ρ = ความหนาแน่นของของเหลว
 V_c = ความเร็วตามแนวเส้นสัมผัสสว่างกลมของของไหล
 r = ระยะห่างของอนุภาคของแข็งจากศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลน

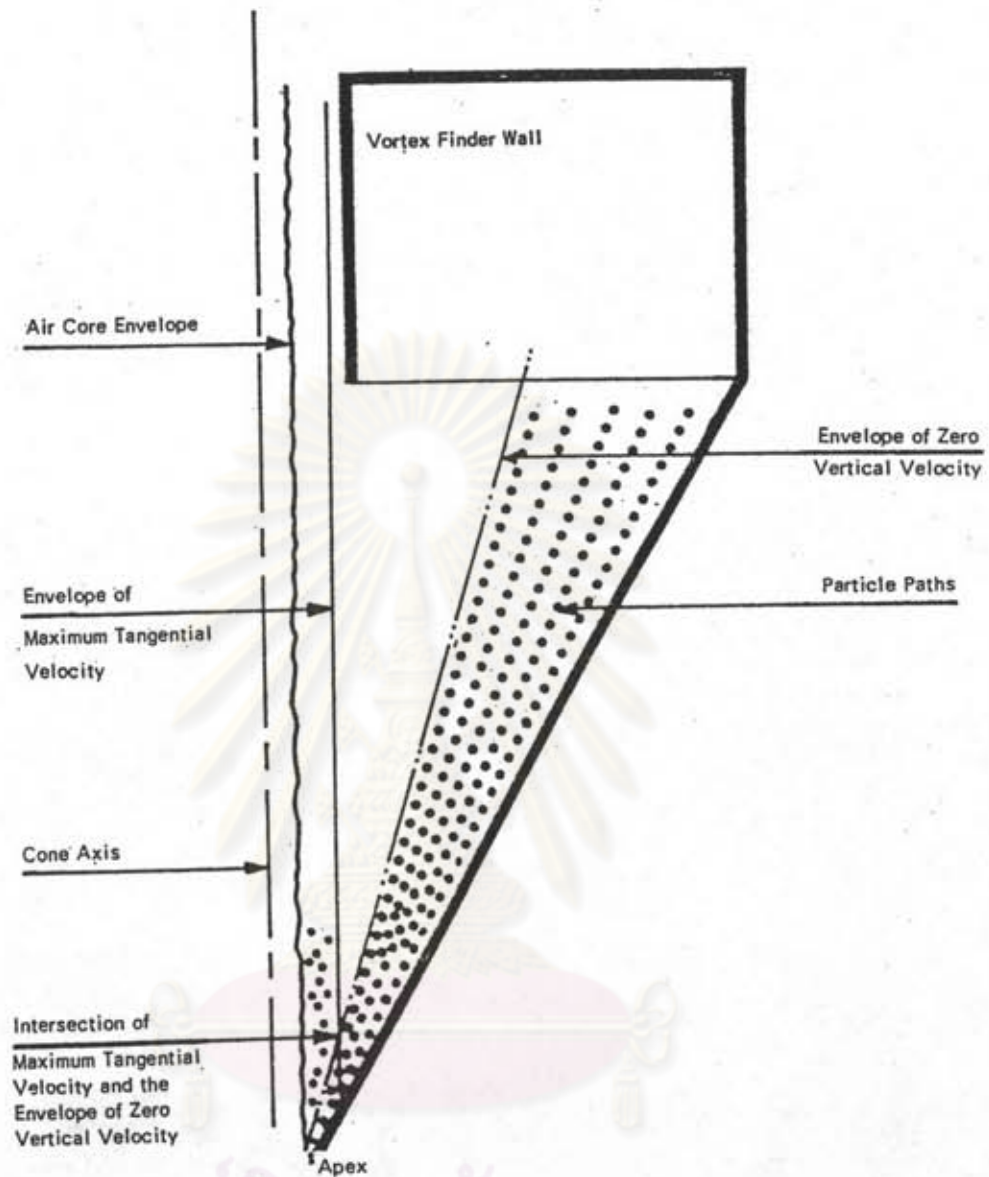
แรงลากของของไหล คือ แรงที่กระทำบนอนุภาคของแข็งให้มีทิศทางการเคลื่อนที่เข้าสู่จุดศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลน สมมติว่าของผสมมีพฤติกรรมการไหลแบบลามินาร์ จากสมการที่ (3.4) แรงลากของของไหลที่กระทำบนอนุภาคทรงกลมสามารถเขียนเป็นสมการดังนี้

$$F_d = 3\pi\mu d V_r \quad \dots (3.28)$$

โดยที่

- F_d = แรงลากของของไหลที่กระทำบนอนุภาคของแข็ง
 μ = ความหนืดของของไหล
 V_r = ความเร็วตามแนวรัศมีของของไหล

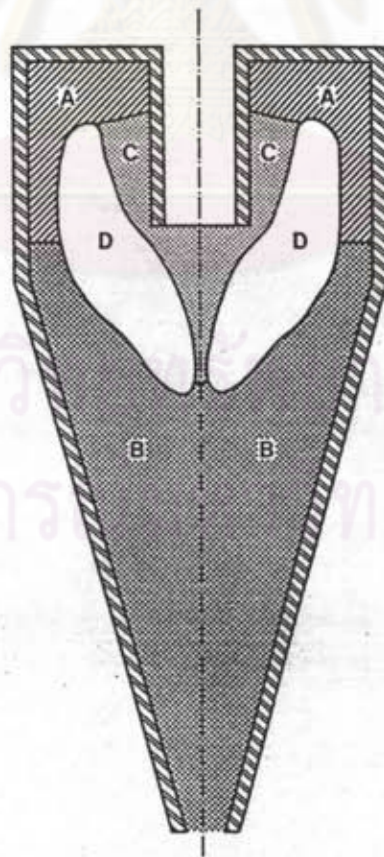
การตัดขนาดอนุภาคของแข็ง ออกทางทางออกส่วนหยาบ และละเอียดของไฮโดรไซโคลน ที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.15 สามารถสรุปอย่างกว้าง ๆ ได้ว่า ถ้าแรงลากของของไหลมากกว่าแรงหนีศูนย์กลาง อนุภาคของแข็งจะอยู่ในกระแสน้ำวนชั้นใน และเคลื่อนที่ออกไปทางทางออกส่วนละเอียด ในทางตรงกันข้าม ถ้าแรงหนีศูนย์กลางมากกว่าแรงลากของของไหล อนุภาคของแข็งจะอยู่ในกระแสน้ำวนชั้นนอกและเคลื่อนที่ออกไปทางทางออกส่วนหยาบ แต่อย่างไรก็ตาม อนุภาคที่อยู่ในกระแสน้ำวนชั้นนอกก็มีโอกาสที่จะเคลื่อนที่ออกไปทางทางออกส่วนละเอียดได้ถ้าอนุภาคนั้นๆ สามารถที่จะเคลื่อนที่ถึง LMTV ที่ซึ่งแรงลากของของไหลมากกว่าแรงหนีศูนย์กลาง และจะเข้าสู่กระแสน้ำวนชั้นในทันทีเมื่อเคลื่อนที่ผ่าน LZVV ที่บริเวณจุดตัดระหว่าง LMTV และ LZVV สำหรับอนุภาคที่อยู่ใต้บริเวณจุดตัดระหว่าง LMTV และ LZVV นั้น จะเคลื่อนที่ออกไปทางทางออกส่วนละเอียดได้ ถ้าสามารถเคลื่อนที่ผ่าน LZVV ก่อนที่จะถูกพัดพาออกไปทางทางออกส่วนหยาบ นอกจากนี้ อนุภาคของแข็งที่อยู่ในสภาวะสมดุลระหว่างแรงลากของของไหลและแรงหนีศูนย์กลาง จะวางตัวบน LZVV และมีโอกาสที่จะเคลื่อนที่ออกไปทางทางออกส่วนหยาบและละเอียดเท่า ๆ กัน



รูปที่ 3.15 การคำนวณขนาดของเชิงออกทางทางออกส่วนเหยาบ และละเอียดของไฮโดรไซโคลน (73)

แต่อย่างไรก็ตาม เป็นการยากที่จะทำนายพฤติกรรมของการตัดขนาดที่เกิดขึ้นในไฮโดรไซโคลนให้แน่ชัด โดยอาศัยหลักการที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นเนื่องจากมีตัวแปรมากมายที่มีผลต่อการตัดขนาด จากผลการวิจัยของ Renner และ Cohen (66-67) ซึ่งอาศัยการเก็บตัวอย่างของผลตามจุดต่าง ๆ ในไฮโดรไซโคลนแล้วนำมาวิเคราะห์การกระจายขนาด พบว่าการตัดขนาดไม่ได้เกิดขึ้นตลอดทั่วทั้งไฮโดรไซโคลน และภายในไฮโดรไซโคลนสามารถแบ่งออกเป็น 4 บริเวณ ซึ่งแต่ละบริเวณมีการกระจายขนาดเหมือน ๆ กัน ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.16 สามารถแบ่งบริเวณทั้ง 4 ในไฮโดรไซโคลนได้ดังนี้คือ

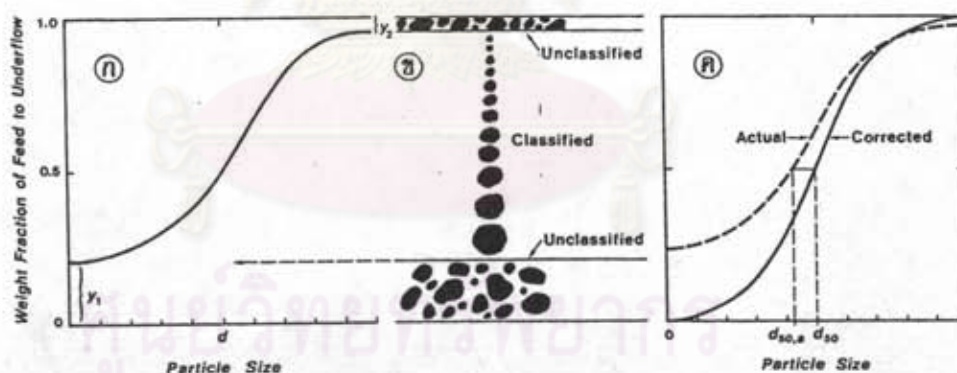
1. บริเวณ A ซึ่งอยู่ทางตอนบนและติดกับผนังรูปทรงกระบอกของไฮโดรไซโคลน ประกอบด้วยอนุภาคที่มีการกระจายขนาดเหมือนกับอนุภาคในแร่ป้อน นั่นคือไม่มีการคัดขนาดเกิดขึ้นในบริเวณนี้เลย
2. บริเวณ B มีอาณาเขตครอบคลุมพื้นที่ส่วนใหญ่ที่เป็นรูปทรงกรวยของไฮโดรไซโคลน ประกอบด้วยอนุภาคที่มีขนาดหยาบ และมีการกระจายขนาดเหมือนกับส่วนหยาบ (Underflow) ที่ออกมาจากทางออกส่วนหยาบ
3. บริเวณ C ซึ่งอยู่รอบ ๆ ทางออกส่วนละเอียด และมีบางส่วนยื่นลงมาตามแนวแกนของไฮโดรไซโคลน ประกอบด้วยอนุภาคที่มีขนาดละเอียด มีการกระจายขนาดเหมือนกับส่วนละเอียด (Overflow) ที่ออกมาจากทางออกส่วนละเอียด
4. บริเวณ D ซึ่งเป็นบริเวณที่เหลือนและถูกล้อมรอบด้วยบริเวณ A, B และ C บริเวณนี้เป็นบริเวณเดียวเท่านั้นที่ปรากฏว่ามีขบวนการคัดขนาดเกิดขึ้นในไฮโดรไซโคลน คือมีการกระจายขนาดตามแนวรัศมีของไฮโดรไซโคลน พบว่าอนุภาคจะมีขนาดเล็กลงเมื่อระยะห่างตามแนวรัศมีจากแกนของไฮโดรไซโคลนลดลง



รูปที่ 3.16 บริเวณทั้ง 4 ในไฮโดรไซโคลนที่มีการกระจายขนาดของอนุภาคเหมือนกัน (66)

3.4 ประสิทธิภาพการคัดขนาดของไฮโดรไซโคลน (Hydrocyclone Efficiency)

วิธีการประเมินการทำงานของไฮโดรไซโคลน (66-67) ทำได้โดยหาประสิทธิภาพการคัดขนาด ซึ่งส่วนใหญ่จะแสดงอยู่ในลักษณะเส้นโค้งประสิทธิภาพ (Performance, Partition or Tromp Curve) ดังที่ได้แสดงไว้ในรูป 3.17 (ก) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนน้ำหนักของแร่ป้อนที่อยู่ในส่วนหยาบ กับขนาดของอนุภาค แต่ธรรมชาติอย่างหนึ่งของการคัดขนาดคือความไม่สมบูรณ์ในการคัดขนาด (Imperfection of Classification) ที่เกิดขึ้นเนื่องจากบางส่วนของแร่ป้อนซึ่งประกอบไปด้วยส่วนหยาบและส่วนละเอียด ไม่ถูกคัดขนาด (Unclassified) ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.17 (ข) เพราะมีรูปแบบการไหลแบบ Short Circuit Flow ขึ้นในไฮโดรไซโคลนทำให้เกิดการผิดที่ผิดทาง (Misplaced) ของขนาดที่ผ่านการคัดขนาดแล้ว พบว่ามีอนุภาคแร่ป้อนทุกขนาดในน้ำของส่วนหยาบ (Underflow Water) เนื่องจากบางส่วนของแร่ป้อนที่ไม่ถูกคัดขนาดนั่นเอง ทำให้เส้นโค้งประสิทธิภาพที่ได้จำเป็นต้องได้รับการแก้ไขเพื่อที่จะได้แสดงผลของการคัดขนาดอย่างถูกต้อง เส้นโค้งประสิทธิภาพที่แก้ไขแล้ว (Corrected Performance Curve) ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.17 (ค)



- รูปที่ 3.17 (ก) เส้นโค้งประสิทธิภาพ (Performance, Partition or Tromp Curve)
 (ข) ความไม่สมบูรณ์ในการคัดขนาด (Imperfection of Classification)
 (ค) เส้นโค้งประสิทธิภาพที่แก้ไขแล้ว (Corrected Performance Curve) (66)

เส้นโค้งประสิทธิภาพสามารถแก้ไขด้วยสมการ

$$y' = \frac{y - R_f}{1 - R_f} \quad \dots (3.29)$$

โดยที่

$$\begin{aligned}
 y' &= \text{สัดส่วนน้ำหมักที่แก้ไขของขนาดที่อยู่ในส่วนหยาบ} \\
 y &= \text{สัดส่วนน้ำหมักจริงของขนาดที่อยู่ในส่วนหยาบ} \\
 R_f &= \text{ปริมาณสัดส่วนของน้ำป้อนที่เก็บได้ในส่วนหยาบ}
 \end{aligned}$$

พารามิเตอร์พื้นฐานสำคัญ (70-75) ที่ใช้หาประสิทธิภาพการคัดขนาดและถูกพิจารณาในเทอมของตัวแปรที่ได้จากการออกแบบ และตัวแปรทำงาน (Designed and Operating Variables) ของการคัดขนาดด้วยไฮโดรไซโคลอน คือ จุดตัดหรือขนาดที่แยกได้ (Cut Size or Separation Size) และความหมัดจดของการคัดขนาด (Sharpness of Classification or Imperfection)

3.4.1 จุดตัดหรือขนาดที่แยกได้ (66,70-72,77)

จุดตัดหรือขนาดที่แยกได้ของการคัดขนาดด้วยไฮโดรไซโคลอนสามารถอธิบายได้ในเทอมของขนาด d_{50} ซึ่งได้จากเส้นโค้งประสิทธิภาพที่แก้ไขแล้ว คือ โอกาสของขนาดอนุภาคแรป้อนที่จะอยู่ในส่วนหยาบและส่วนละเอียดเท่า ๆ กัน หลังจากผ่านการคัดขนาด การหาประสิทธิภาพการคัดขนาดของไฮโดรไซโคลอน โดยถือเอาขนาด d_{50} เป็นเกณฑ์นั้น สามารถอธิบายและแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาด d_{50} กับตัวแปรที่ได้จากการออกแบบและตัวแปรทำงานของไฮโดรไซโคลอนออกเป็น 4 แนวทางคือ

1. สมมติฐานวงโคจรสมดุล (Equilibrium Orbit Hypothesis)
2. สมมติฐานเกี่ยวกับเวลาที่ใช้ในการคัดขนาดของไฮโดรไซโคลอน (Retention Time Hypothesis)
3. ทฤษฎีเกี่ยวกับการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคของแข็งในไฮโดรไซโคลอน (Crowding Theory)
4. สมการเอมพิริคัล (Empirical Equation)

3.4.1.1 สมมติฐานวงโคจรสมดุล

สมการพื้นฐานส่วนใหญ่ที่ใช้การคำนวณหาขนาด d_{50} มีพื้นฐานบนความคิดเกี่ยวกับสมมติฐานวงโคจรสมดุล กล่าวคือที่จุดใด ๆ ในไฮโดรไซโคลอน อนุภาคขนาด

d_{50} จะอยู่ในสภาวะสมดุลระหว่างแรงลากของของไหลกับแรงหนีศูนย์กลาง และจะวางตัวบน LZVV สำหรับอนุภาคทรงกลมที่เคลื่อนที่ในของไหลที่มีพฤติกรรมการไหลแบบลามินาร์ จากสมการที่ (3.27) และ (3.28) สามารถเขียนสมการเบื้องต้นเพื่อหาขนาด d_{50} ได้ดังนี้คือ

$$d_{50} = \left[\frac{18\mu V_r r}{(\sigma - \rho) V_c^2} \right]^{0.5} \dots (3.30)$$

จากสมการเบื้องต้นที่ (3.30) สามารถหาสมการสุดท้าย (Final Equations) ที่ใช้หาขนาด d_{50} ได้โดยการแจกแจงความเร็วตามแนวรัศมีและเส้นสัมผัสสว่างกลม ให้อยู่ในเทอมของตัวแปรที่ได้จากการออกแบบ และตัวแปรทำงานของไฮโดรไซโคลอน แต่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับตำแหน่ง และรูปลักษณะของ LZVV ที่กำหนด

Bradley และ Pulling (66) ได้แสดงสมการสุดท้ายที่ใช้หาขนาด d_{50} โดยมีตำแหน่งและรูปลักษณะของ LZVV ในไฮโดรไซโคลอนดังรูปที่ 3.8 ดังนี้คือ

$$d_{50} = 3(0.38)^n \frac{D_1^2}{\alpha} \left[\frac{\tan \theta / 2 \cdot \mu \cdot (1 - R_f)}{D_c \cdot Q \cdot (\sigma - \rho)} \right]^{0.5} \dots (3.31)$$

โดยที่

- D_1 = ขนาดทางเข้าแนวนอนของไฮโดรไซโคลอน
 D_c = ขนาดของไฮโดรไซโคลอน
 Q = อัตราการป้อนเชิงปริมาตรของแร่ป้อน
 n และ α = พารามิเตอร์ที่ขึ้นอยู่กับตัวแปรที่ได้จากการออกแบบของไฮโดรไซโคลอน คุณสมบัติของของไหล และอัตราการป้อนเชิงปริมาตรของแร่ป้อน

พบว่า สมการสุดท้ายที่มีพื้นฐานบนแนวความคิดเกี่ยวกับสมมติฐานวงโคจรสมดุลเหมาะสำหรับใช้ในการทำนายประสิทธิภาพการคัดขนาด หรือขนาด d_{50} ของแร่ป้อนที่มีความเข้มข้นของของผสมต่ำเท่านั้น

3.4.1.2 สมมติฐานเกี่ยวกับเวลาที่ใช้ในการคำนวณของไฮโดรไฮโคลน

เนื่องจากสมมติฐานวงโคจรสมมุติข้อจำกัดเพราะเวลาที่ใช้ในการคำนวณของไฮโดรไฮโคลนน้อยมาก และอนุภาคของแข็งมีเวลาไม่พอเพียงพอที่จะถึงสภาวะสมดุลระหว่างแรงลากของของไหลกับแรงหนีศูนย์กลาง Rietema (71) ได้ตั้งสมมติฐานเกี่ยวกับเวลาที่ใช้ในการคำนวณของไฮโดรไฮโคลน กล่าวคือ อนุภาคขนาด d_{50} คือขนาดของอนุภาคที่เคลื่อนที่จากจุดศูนย์กลางของทางเข้าร่อนเข้าสู่ผนังของไฮโดรไฮโคลน และออกไปทางทางออกส่วนหยากทันทีด้วยเวลา T นั่นคือ เวลาที่ใช้ในการคำนวณอนุภาค d_{50} ใด ๆ ของไฮโดรไฮโคลนจะเท่ากับ T เสมอ สามารถเขียนเทอมทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Term) ได้ดังนี้คือ

$$\int_0^T U_r \cdot dt = 1/2 D_1 \quad \dots (3.32)$$

จากสมการที่ (3.30) ความเร็วตามแนวรัศมีของอนุภาคขนาด d_{50} เท่ากับ

$$U_r = \frac{d_{50}^2 (\sigma - \rho) \cdot V_c^2}{18\mu r} \quad \dots (3.33)$$

โดยที่

$$U_r = \text{ความเร็วตามแนวรัศมีของอนุภาคของแข็ง}$$

และ เวลาที่ใช้ในการคำนวณมีความสัมพันธ์กับสัดส่วนของไฮโดรไฮโคลนดังนี้

$$dt = \frac{1 \cdot L \cdot d_r}{V_c R_c} \quad \dots (3.34)$$

โดยที่

$$L = \text{ความยาวของไฮโดรไฮโคลน}$$

$$R_c = \text{รัศมีของไฮโดรไฮโคลน}$$

นอกจากนี้ Driessen (71) ได้แสดงสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วตามแนวเส้นสัมผัสสว่างกลมของของไหล และการกระจายความดันตามแนวรัศมี (Radial Pressure Distribution) โดยสมมติว่าความเร็วตามแนวรัศมีมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับความเร็วตามแนวเส้นสัมผัสสว่างกลมของของไหล ดังนี้คือ

$$\frac{v_t^2}{r} = \frac{dP}{\rho \cdot dr} \quad \dots (3.35)$$

โดยที่

$$\frac{dP}{dr} = \text{เกรเดียนต์ความดันตามแนวรัศมี (Radial Pressure Gradient)}$$

แทนค่าที่ได้จากสมการ (3.33), (3.34) และ (3.35) ลงในสมการที่ (3.32) จะได้สมการที่ใช้คำนวณหาขนาด d_{50} ที่มีพื้นฐานบนสมมติฐานเกี่ยวกับเวลาที่ใช้ในการตัดขนาดของไฮโดรไซโคลนดังนี้ คือ

$$d_{50}^2 \frac{(\sigma - \rho) L \Delta P}{\mu \rho Q} = \frac{36 \cdot v_t \cdot R_c}{\pi \cdot v_c \cdot D_1} \quad \dots (3.36)$$

เทอมทางขวามือของสมการที่ (3.36) เป็นค่าคงที่ ที่เรียกว่า Characteristic Cyclone Number, Cy_{50} ซึ่งค่านี้เหมาะสำหรับใช้เป็นแนวทางในการออกแบบไฮโดรไซโคลน พบว่า ไฮโดรไซโคลนมาตรฐานที่ได้รับการออกแบบให้มีสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุด (Optimum Proportions) คือ มีสัดส่วนขนาดทางเข้าร้อป้อนต่อขนาดของไฮโดรไซโคลน (D_1 / D_c) = 0.28 ขนาดทางออกส่วนละเอียดต่อขนาดของไฮโดรไซโคลน (D_o / D_c) = 0.34 ความยาวของทางออกส่วนละเอียดต่อขนาดของไฮโดรไซโคลน (l / D_c) = 0.4 ความยาวของไฮโดรไซโคลนต่อขนาดของไฮโดรไซโคลน (L / D_c) = 5 และมุมกรวยของไฮโดรไซโคลน (θ) = 20 องศา จะให้ค่า Cy_{50} น้อยที่สุดคือเท่ากับ 3.5 นั่นคือ เมื่อนำไฮโดรไซโคลนมาตรฐานนี้ไปใช้ในการคัดขนาด อนุภาคขนาด d_{50} ที่ได้จะมีขนาดเล็ก โดยมีสภาวะการทำงานที่ใช้ความดันลดของร้อป้อนน้อย แต่มีอัตราการป้อนเชิงปริมาตร

ของแร่ป้อนสูง แต่อย่างไรก็ตาม ไฮโดรไซโคลนมาตรฐานนี้เหมาะสำหรับการคัดขนาดแร่ป้อนที่มีความเข้มข้นของของผสมต่ำ และไม่มีพฤติกรรมการไหลแบบเทอร์บิวเลนซ์เกิดขึ้นในไฮโดรไซโคลนเลย ซึ่งในทางปฏิบัติแล้ว พบว่ามีพฤติกรรมการไหลแบบเทอร์บิวเลนซ์เกิดขึ้นบริเวณส่วนที่เป็นรูปทรงกระบอกของไฮโดรไซโคลน ทำให้ประสิทธิภาพในการคัดขนาดที่คำนวณได้มากกว่าความเป็นจริง

3.4.1.3 ทฤษฎีเกี่ยวกับการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคของแข็งในไฮโดรไซโคลน

เนื่องจากสมมติฐานวงโคจรสมดุลและสมมติฐานเกี่ยวกับเวลาที่ใช้ในการคัดขนาดของไฮโดรไซโคลนมีข้อจำกัดในการทำนายหาประสิทธิภาพการคัดขนาด หรือขนาด d_{50} ของแร่ป้อนที่มีความเข้มข้นของผสมสูง ๆ Fahlstrom (66) ได้เสนอทฤษฎีเกี่ยวกับการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคของแข็งในไฮโดรไซโคลน กล่าวคือสำหรับแร่ป้อนที่มีความเข้มข้นของผสมสูง ๆ ขนาด d_{50} จะเป็นฟังก์ชันของความสามารถในการปล่อยของผสมออกทางทางออกส่วนหยาบของไฮโดรไซโคลน และการกระจายขนาดของแร่ป้อน นั่นคือขนาดของทางออกส่วนหยาบมีผลต่อประสิทธิภาพการคัดขนาดของไฮโดรไซโคลน ขนาด d_{50} สามารถหาได้จากสมการ

$$d_{50} = d^* (-\ln R_s)^{1/s} \quad \dots (3.37)$$

โดยที่

- d^* = Size Modulus in Distribution Equation
 R_s = ปริมาณสัดส่วนของแร่ป้อนที่เก็บได้ในส่วนหยาบ
 s = Exponent of the Rosin - Rammler Equations

สมการที่ (3.37) เหมาะสำหรับใช้หาขนาด d_{50} ของแร่ป้อนที่มีความเข้มข้นของผสมสูง ๆ และมีรูปแบบการปล่อยของผสมออกทางทางออกส่วนหยาบเป็นแบบ Rope Discharge ของวงจรการบดแร่ละเอียด

3.4.1.4 สมการเอมพิริคัล

สมมติฐานหรือทฤษฎีที่พยายามอธิบาย และแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาด d_{50} กับตัวแปรที่ได้จากการออกแบบและตัวแปรทำงานของไฮโดรไซโคลนต่างก็มีข้อจำกัด เนื่องจากตัวแปรเหล่านี้มีความสัมพันธ์กับขนาด d_{50} อย่างใกล้ชิด และมีผลต่อประสิทธิภาพการคัดขนาดของไฮโดรไซโคลนด้วยกันทั้งนั้น ดังนั้นสมมติฐานหรือทฤษฎีที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น จึงเหมาะสำหรับที่จะหาขนาด d_{50} ในสภาวะเงื่อนไขที่ตั้งอยู่บนสมมติฐานหรือทฤษฎีหนึ่ง ๆ เท่านั้น

นักวิจัยหลายท่านพยายามแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาด d_{50} กับตัวแปรต่าง ๆ ของไฮโดรไซโคลนในรูปของสมการเอมพิริคัล Bradley (70) ได้รวบรวมสมการเอมพิริคัล ซึ่งเป็นที่ยอมรับและใช้กันอย่างแพร่หลาย ดังนี้คือ

1. สมการเอมพิริคัลของ Dahlstrom (70) เหมาะสำหรับไฮโดรไซโคลนขนาด 9 นิ้ว ที่มีมุมกรวย 20 องศา และใช้ในการคัดขนาดแร่ป้อนที่มีความเข้มข้นของของผสมต่ำ ๆ ดังนี้ คือ

$$d_{50} = \frac{81(D_0 D_1)^{0.66}}{Q^{0.53}} \left[\frac{1.73}{\sigma - \rho} \right]^{0.5} \dots (3.38)$$

หน่วย

$$\begin{aligned} d_{50} &= \text{ไมครอน} \\ D_0 \text{ และ } D_1 &= \text{นิ้ว} \\ Q &= \text{ยู.เอส แกลลอน/นาที} \\ \sigma \text{ และ } \rho &= \text{กรัม / ลูกบาศก์เซนติเมตร} \end{aligned}$$

2. สมการเอมพิริคัลของ Matschke และ Dahlstrom (70) ซึ่งพัฒนามาจากสมการเอมพิริคัลของ Dahlstrom เหมาะสำหรับไฮโดรไซโคลนขนาดเล็กที่มีขนาด 10 - 40 มิลลิเมตรและมีมุมกรวย 10 องศา ที่ใช้ในการคัดขนาดแร่ป้อนที่มีความเข้มข้นของของผสมต่ำ ๆ ดังนี้คือ

$$d_{50} = \frac{87.2 (D_0 D_1)^{0.65}}{Q^{0.60}} \left[\frac{1}{\sigma - \rho} \right]^{0.5} \dots (3.39)$$

3. สมการเอมพิริคัลของ Yoshioka และ Hotta (70) เหมาะสำหรับไฮโดรไฮโดรขนาด 3 - 6 นิ้ว ที่ใช้ในการตัดขนาดแร่ป้อนที่มีความเข้มข้นของผลสมตำ ดังนี้คือ

$$d_{50} = 6.3 \times 10^{-3} D_c^{0.1} D_t^{0.6} D_o^{0.8} \left[\frac{\mu}{Q(\sigma-\rho)} \right]^{0.5} \dots (3.40)$$

หน่วย

$$\begin{aligned} d_{50} &= \text{ไมครอน} \\ D_c, D_t \text{ และ } D_o &= \text{เมตร} \\ Q &= \text{ลิตร / วินาที} \\ \mu &= \text{กิโลกรัม / เมตร.วินาที} \\ \sigma \text{ และ } \rho &= \text{กิโลกรัม / ลูกบาศก์เมตร} \end{aligned}$$

4. สมการเอมพิริคัลของ Haas (70) พัฒนามาจากสมการเอมพิริคัลของ Yoshioka และ Hotta เหมาะสำหรับไฮโดรไฮโดรขนาดเล็กที่มีขนาด 0.16 - 0.4 นิ้ว ที่ใช้ในการตัดขนาดแร่ป้อนที่มีความเข้มข้นของผลสมตำดังนี้คือ

$$d_{50} = 5 \times 10^{-3} \left[\frac{D_c \mu}{(\sigma-\rho) H^{0.5}} \right]^{0.5} \dots (3.41)$$

หรือ

$$d_{50} = 1.07 \times 10^{-3} \left[\frac{D_c^{3.05} \mu}{Q^{1.14} (\sigma-\rho)} \right]^{0.5} \dots (3.42)$$

หน่วย

$$\begin{aligned} d_{50} &= \text{ไมครอน} \\ D_c &= \text{นิ้ว} \end{aligned}$$

μ	=	ปอนด์ / ฟุต.วินาที
σ และ ρ	=	ปอนด์ / ลูกบาศก์ฟุต
H	=	ความดันในรูปเฮดของของไหล หน่วยฟุต
Q	=	ยู.เอส แกลลอน/นาที

สมการที่ใช้หาประสิทธิภาพการคัดขนาด โดยถือเอาขนาด d_{50} เป็นเกณฑ์นั้น Bradley (76) ได้รวบรวมไว้ในตารางที่ 3.3 โดยใช้ไฮโดรไซโคลนขนาด 9 นิ้ว ที่มีขนาดทางเข้าแร่ป้อน = $D_c/7$ และขนาดทางออกส่วนละเอียด = $D_c/5$ เป็นมาตรฐาน สำหรับเปรียบเทียบสมการที่ตั้งอยู่บนพื้นฐานแนวความคิดที่แตกต่างกัน พบว่า รูปแบบสมการทั่วไป ที่ใช้หาขนาด d_{50} เป็นดังนี้

$$d_{50} = c \left[\frac{D_c^3 \mu}{Q(\sigma - \rho)} \right]^{0.5} \quad \dots (3.43)$$

หน่วย

d_{50}	=	ไมครอน
c	=	ค่าคงที่
D_c	=	เซนติเมตร
μ	=	เซนติปัวส์ (Centipoises)
Q	=	ลิตร / นาที
σ และ ρ	=	กรัม / ลูกบาศก์เซนติเมตร

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.3 สมการที่ใช้ในการหาขนาด d_{50} (76)

Theoretical:

1. Bradley
$$d_{50} = 4.1 \left(\frac{D_c^3 \eta}{Q(\sigma - \rho)} \right)^{0.5}$$

2. de Gelder
$$d_{50} = 0.15 \left(\frac{D_c^3 \eta}{Q(\sigma - \rho)} \right)^{0.5}$$

where d_{50} = diameter of particle which is just not collected, i.e. exhibits a centrifugal efficiency of 0%.

3. Rietema
$$d_{50} = 14.6 \left(\frac{D_c^3 \eta}{Q(\sigma - \rho)} \right)^{0.5}$$

4. Lilgé
$$d_{50} = 4.6 \left(\frac{D_c^3 \eta}{Q(\sigma - \rho)} \right)^{0.5}$$

Empirical:

5. Dahlstrom
$$d_{50} = 5.4 \left(\frac{D_c^{2.72} \eta}{Q^{1.06} (\sigma - \rho)} \right)^{0.5}$$

6. Haas
$$d_{50} = 1.8 \left(\frac{D_c^{3.05} \eta}{Q^{1.14} (\sigma - \rho)} \right)^{0.5}$$

7. Yoshioka & Hotta
$$d_{50} = 4.2 \left(\frac{D_c^3 \eta}{Q(\sigma - \rho)} \right)^{0.5}$$

8. Matschke & Dahlstrom
$$d_{50} = 5.0 \left(\frac{D_c^{2.6} \eta}{Q(\sigma - \rho)} \right)^{0.5}$$

3.4.2 ความหมดจดของการคัดขนาด (67-68,77)

ความหมดจดของการคัดขนาด เป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่ใช้ในการหาประสิทธิภาพการคัดขนาดจากเส้นโค้งประสิทธิภาพ พบว่าความชันของเส้นโค้งยิ่งมาก ความหมดจดของการคัดขนาดมากขึ้นด้วย นั่นคือประสิทธิภาพการคัดขนาดดีขึ้น ความหมดจดของการคัดขนาดหาได้จากสมการ

$$I = \frac{d_{75} - d_{25}}{2d_{50}} \quad \dots (3.44)$$

โดยที่

$$I = \text{ความหมดจดของการคัดขนาด}$$

$$d_{75} \text{ และ } d_{25} = \text{ขนาดของอนุภาคแร็ป้อนที่มีโอกาสร้อยละ 75 และ 25 ที่จะอยู่ในส่วนหยาบ หรือ ละเอียด หลังจากการคัดขนาด}$$

Plitt (68) สมมติว่าการคัดขนาดที่ไม่หมดจดเกิดขึ้นเนื่องจากมีรูปแบบการไหลแบบเทอร์บิวเลนซ์เกิดขึ้นในการคัดขนาด ดังนั้นสัดส่วนน้ำหนักจริงของขนาดที่อยู่ในส่วนหยาบจะเป็นไปตามสมการ

$$y = 1 - \exp(-kd^m / T) \quad \dots (3.45)$$

โดยที่

$$y = \text{สัดส่วนน้ำหนักจริงของขนาดที่อยู่ในส่วนหยาบ}$$

$$k = \text{ค่าคงที่}$$

$$d = \text{ขนาดของอนุภาค}$$

$$m = \text{Classification Index}$$

$$T = \text{เวลาที่ใช้ในการคัดขนาดของไซโคลนไคโคลน}$$

เมื่อ $y = 0.5$ อนุภาคขนาด d จากสมการที่ (3.45) จะเท่ากับขนาด d_{50} สัดส่วนน้ำหนักที่แก้ไขแล้วของขนาด d_{50} ที่อยู่ในส่วนหยาบ สามารถหาได้จากสมการ

$$y' = 1 - \exp[-0.693 (d/d_{50})^m] \quad \dots (3.46)$$

จากสมการที่ (3.46) ค่า Classification Index (m) เป็นตัวชี้ถึงประสิทธิภาพการคัดขนาดของไฮโดรไซโคลนโดยตรง กล่าวคือ ถ้า m มีค่ามากกว่า 3 แสดงถึงประสิทธิภาพการคัดขนาดที่ดี ในขณะที่ m มีค่าน้อยกว่า 2 แสดงถึงประสิทธิภาพการคัดขนาดที่เลว

Plitt (77) ได้แสดงสมการการหาค่า Classification Index ดังนี้

$$m = \frac{\exp[0.58 - 1.58R_v] D_c^2 h^{0.15}}{Q} \quad \dots (3.47)$$

โดยที่

R_v = ปริมาตรของแบริ่งที่เก็บได้ในส่วนหยาบ

h = Free Vortex Height ของไฮโดรไซโคลน
หน่วย นิ้ว

หน่วย

D_c = นิ้ว

Q = ลูกบาศก์ฟุต/นาที

สำหรับ Lynch (68) ได้แสดงสมการการหาสัดส่วนน้ำหนักรจริงของขนาดที่อยู่ในส่วนหยาบ ดังนี้

$$y' = \frac{\exp(\alpha d/d_{50}) - 1}{\exp(\alpha d/d_{50}) + \exp(\alpha) - 2} \quad \dots (3.48)$$

โดยที่

α = ความคมชัดของการคัดขนาด (Sharpness of Classification)

พบว่า ถ้าความหนาแน่นของการตัดขนาดมีค่ามาก แสดงถึงประสิทธิภาพการตัดขนาดที่ดี และ ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของการตัดขนาด กับ Classification Index เป็นไปดังสมการ

$$\alpha = 1.54m - 0.47 \quad \dots (3.49)$$

3.5 แฟกเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการตัดขนาดของไฮโดรไซโคลอน

การเปลี่ยนแปลงตัวแปรที่ได้จากการออกแบบ และตัวแปรทำงานของไฮโดรไซโคลอน มีผลทำให้ประสิทธิภาพการตัดขนาดของไฮโดรไซโคลอนเปลี่ยนแปลงไปอย่างมาก ผลของการเปลี่ยนแปลงตัวแปรเหล่านี้ที่มีต่อจุดตัด และความหนาแน่นของการตัดขนาดเป็น เรื่องยุ่งยากซับซ้อน เนื่องจากตัวแปรเหล่านี้มีความสัมพันธ์กันอย่างใกล้ชิด ดังนั้นการนำไฮโดรไซโคลอนมาใช้ในการตัดขนาดเป็นเรื่องที่ค่อนข้างจะเฉพาะเจาะจงว่าจะนำไฮโดรไซโคลอนแบบใด ไปใช้งานในลักษณะไหน มีสภาวะการทำงานอย่างไร เพื่อจะได้จุดตัดและความหนาแน่นในการตัดขนาดตามที่ต้องการสำหรับไฮโดรไซโคลอนที่ได้รับการออกแบบไว้ใช้เฉพาะงานแล้ว การปรับเปลี่ยนสภาวะการทำงานหรือตัวแปรทำงาน ซึ่งอยู่ในวิสัยที่สามารถจะทำได้ในเชิงปฏิบัติ มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพการตัดขนาดของไฮโดรไซโคลอนมาก ตัวแปรทำงานที่สำคัญเหล่านี้ (68) ได้แก่

1. ความดันลดของแรंप้อน (Pressure Drop)
2. ความเข้มข้นของของผสมในแรंप้อน (% Solids of Pulp)
3. ขนาดทางออกส่วนละเอียดของไฮโดรไซโคลอน (Vortex Finder Diameter)
4. ขนาดทางออกส่วนหยาบของไฮโดรไซโคลอน (Spigot or Apex Diameter)

3.5.1 ความดันลดของแรंप้อน

ความดันลดของแรंप้อน จะประกอบไปด้วยสาเหตุเนื่องจากความเร็วที่ท่อทางเข้าของแรंप้อน (Inlet Velocity Head) สาเหตุเนื่องจากความเสียดทานของผนังไฮโดรไซโคลอน (Wall Friction Head) และสาเหตุเนื่องจากแรงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal Head) ที่ทำให้เกิดการตัดขนาดขึ้นในไฮโดรไซโคลอน

ในทางทฤษฎี สาเหตุเนื่องจากแรงหนีศูนย์กลาง ได้มาจากการอินทิเกรตเกรเดียนต์ความดันตามแนวรัศมี (Radial Pressure Gradient) ที่เกิดขึ้นเนื่องจากความ

เร็วตามแนวเส้นสัมผัสวงกลมของของไหลนั่นเอง

เกรเดียนต์ความดันตามแนวรัศมี มีความสัมพันธ์กับความเร็วตามแนวเส้นสัมผัสวงกลมของของไหลตามสมการ (3.35) ดังนี้

$$\frac{dP}{dr} = \rho \frac{v_t^2}{rg}$$

Bradley (66) สมมติว่าความเร็วตามแนวเส้นสัมผัสวงกลมของของไหล มีความสัมพันธ์กับรัศมีกรวยของไฮโดรไฮโคลอนตามสมการ (3.25) ดังนี้

$$v_t r^n = \text{ค่าคงที่}$$

แทนค่าความเร็วตามแนวเส้นสัมผัสวงกลมของของไหลจากสมการที่ (3.25) ลงในสมการที่ (3.35) แล้วอินทิเกรตจากรัศมีของไฮโดรไฮโคลอนถึงรัศมีของทางออกส่วนละเอียดย จะได้สมการ

$$\frac{\Delta P / \rho}{v_1^2 / 2g} = \frac{\alpha^2}{n} \left[\left(\frac{D_c}{D_o} \right)^{2n} - 1 \right] \quad \dots (3.50)$$

โดยที่

$$\Delta P = \text{ความดันลดของแร็ป้อนที่เกิดจากเฮดเนื่องจากแรงหนีศูนย์กลาง}$$

$$v_1 = \text{ความเร็วที่ท่อทางเข้าของแร็ป้อน}$$

Bradley (76) ได้รวบรวมสมการที่ใช้หาความดันลดของแร็ป้อน ไว้ในตารางที่ 3.4 โดยใช้ไฮโดรไฮโคลอนขนาด 9 นิ้ว ที่มีขนาดทางเข้าแร็ป้อน = $D_c/7$ และขนาดทางออกส่วนละเอียดย = $D_c/5$ เป็นมาตรฐาน พบว่า รูปแบบสมการทั่วไปที่ใช้หาความดันลดของแร็ป้อนเป็นดังนี้

$$\Delta P = \frac{C Q^2}{D_c^4} \quad \dots (3.51)$$

หน่วย

$$\begin{aligned} \Delta P &= \text{ปอนด์/ตารางนิ้ว} \\ C &= \text{ค่าคงที่} \\ Q &= \text{ลิตร/นาที} \\ D_c &= \text{เซนติเมตร} \end{aligned}$$



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.4 สมการที่ใช้ในการหาความดันลดของวารีป้อน (76)

Theoretical:

1. Bradley $\Delta P = 24.3 \frac{Q^2}{D_c^4}$

2. de Gelder $\Delta P = 1.45 \left(\frac{1.35}{\xi^2} - 1 \right) \frac{Q^2}{D_c^4}$

where $\xi = \frac{0.164}{1 - \frac{515}{Re^{0.5}}}$

Re = Reynold's number = $\frac{\rho V_i D_c}{\eta}$

V_i = feed inlet velocity

3. Trawinski $\Delta P = 19.8 \frac{Q^2}{D_c^4}$

Empirical:

4. Chaston $\Delta P = 78 \frac{Q^2}{D_c^4}$

5. Dahlstrom $\Delta P = 13.3 \frac{Q^2}{D_c^4}$

6. Elcox $\Delta P = 64.5 \frac{Q^2}{D_c^4}$

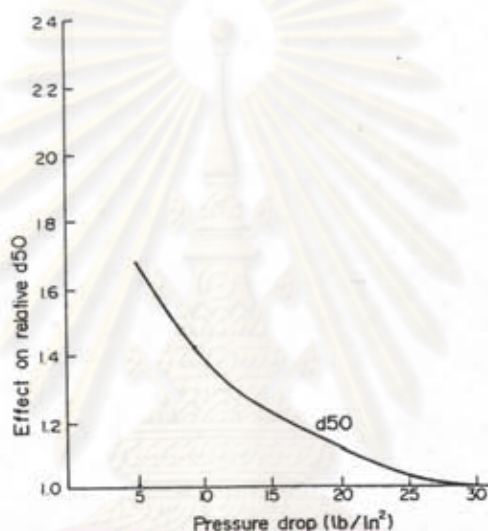
7. Haas $\Delta P = 21.2 \frac{Q^{2.27}}{D_c^{4.1}}$

8. Yoshioka & Hotta $\Delta P = 39 \frac{Q^2}{D_c^4}$

9. Rietama $\Delta P = 23 \frac{Q^2}{D_c^4}$

3.5.1.1 ผลของความดันลดของแบริออนที่มีต่อขนาด d_{50}

ความดันลดของแบริออนที่ก่อให้เกิดแรงหนีศูนย์กลางชั้นในไฮโดรไซโคลอนมีผลต่อประสิทธิภาพการคัดขนาดมาก เนื่องจากแรงหนีศูนย์กลางที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะถูกพิจารณาว่าเป็นฟังก์ชันของ V_c^2/D_c นั่นคือ ขนาด d_{50} ที่ได้จากการคัดขนาดจะมีขนาดเล็กลงเมื่อความเร็วตามแนวเส้นสัมผัสสว่างกลมของของไหลเพิ่มขึ้น หรือขนาดของไฮโดรไซโคลอนเล็กลง ความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดของแบริออน กับขนาด d_{50} ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดของแบริออนกับขนาด d_{50} (78)

Bradley (70) ได้แสดงสมการความสัมพันธ์ระหว่างขนาด d_{50} กับความดันลดของแบริออนดังนี้

$$d_{50} \propto \Delta P^{-0.25} \dots (3.52)$$

ในทางปฏิบัติ ความดันลดของแบริออนจะมีค่าอยู่ในช่วง 5-50 ปอนด์/ตารางนิ้ว ความดันลดต่ำกว่า 5 ปอนด์/ตารางนิ้ว จะไม่ก่อให้เกิดรูปแบบการไหลแบบ Spiral Within a Spiral ชั้นในไฮโดรไซโคลอน นั่นคือไม่มีการคัดขนาดเกิดขึ้น และไม่นิยมใช้ความดันลดของแบริออนที่สูงกว่า 50 ปอนด์/ตารางนิ้ว ในการคัดขนาดด้วยไฮโดรไซโคลอน เนื่องจากอัตราการสึกหรอและพลังงานที่ใช้สูงเกินไป

3.5.1.2 ผลของความดันลดของแร่ป้อนที่มีต่อความหมดจดของการคัดขนาด

การเปลี่ยนแปลงความดันลดของแร่ป้อนมีผลต่อความหมดจดของการคัดขนาดน้อยมากทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ จากสมการที่ (3.47) Plitt (71) แสดงให้เห็นว่าความหมดจดของการคัดขนาดขึ้นอยู่กับเทอม $(D_c^2 h)/Q$ ที่แสดงถึงเวลาในการคัดขนาดของไฮโดรไซโคลอน กล่าวคือ ที่ความดันลดของแร่ป้อนต่ำ ๆ เวลาในการคัดขนาดของไฮโดรไซโคลอนจะนานขึ้น โอกาสที่อนุภาคแร่จะอยู่ผิดที่ผิดทางน้อยลง ทำให้ความหมดจดของการคัดขนาดดีขึ้นเล็กน้อย แต่อย่างไรก็ตามจากการทดลองของบริษัทผู้ผลิตไฮโดรไซโคลอนส่วนใหญ่พบว่า เมื่อความดันลดของแร่ป้อนสูงขึ้น ความหมดจดของการคัดขนาดดีขึ้น

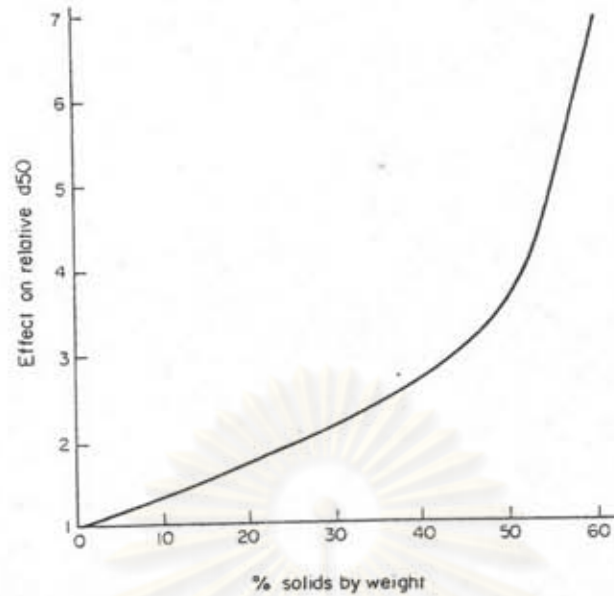
3.5.2 ความเข้มข้นของของผสมในแร่ป้อน

การเพิ่มความเข้มข้นของของผสมในแร่ป้อน มีผลทำให้ประสิทธิภาพการคัดขนาดของไฮโดรไซโคลอนลดลง เนื่องจากความหนืดของของผสมที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดการต้านทานการไหลของของไหล อนุภาคของแข็งในของผสมจะมีรูปแบบการตกตัวแบบ Hindered Settling ทำให้เกิดการอุดตันของทางออกส่วนหยาบ และความดันลดของแร่ป้อนลดลง

Dahlstrom (76) พบว่าความเข้มข้นของของผสมที่สูงกว่าร้อยละ 11 โดยปริมาตรนั้น จะทำให้อนุภาคของแข็งมีการตกตัวแบบ Hindered Settling ขึ้น สำหรับการคัดขนาดอนุภาคที่ไม่ใช่ทรงกลมด้วยไฮโดรไซโคลอนขนาดเล็ก (70) ความเข้มข้นของของผสมในแร่ป้อนไม่ควรเกินร้อยละ 4 โดยปริมาตร

ในทางปฏิบัติ พบว่าขนาด d_{50} จะใหญ่ขึ้น ถ้าความเข้มข้นของของผสมในแร่ป้อนสูงขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของของผสมในแร่ป้อนกับขนาด d_{50} ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.19

สำหรับผลของความเข้มข้นของของผสมในแร่ป้อน ที่มีต่อความหมดจดของการคัดขนาด Fahlstrom (77) พบว่าความหมดจดของการคัดขนาดจะเลวลงเมื่อความเข้มข้นของของผสมในแร่ป้อนสูงขึ้น แต่สำหรับ Lynch (71) พบว่าค่าความหมดจดของการคัดขนาด (α) จากสมการที่ (3.49) จะไม่เปลี่ยนแปลงเลยเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของของผสมในแร่ป้อนแต่จะเป็นฟังก์ชันของคุณสมบัติทางกายภาพของอนุภาคของแข็ง เช่น ความถ่วงจำเพาะ และ รูปร่างของอนุภาคของแข็ง เป็นต้น



รูปที่ 3.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของของผสมในแร่ป้อน กับขนาด d_{50} (78)

3.5.3 ทางออกส่วนละเอียดของไฮโดรไซโคลน

ในทางปฏิบัติ (71) จุดตัดหรือขนาดแร่ที่แยกได้นั้น จะถูกควบคุมโดยตัวแปรที่ได้จากการออกแบบเป็นหลัก โดยเฉพาะอย่างยิ่งขนาดทางออกส่วนละเอียดของไฮโดรไซโคลน ดังนั้น ไฮโดรไซโคลนที่ผลิตชิ้นส่วนใหญ่ มักออกแบบให้สามารถปรับเปลี่ยนขนาดทางออกส่วนละเอียดได้ เพื่อที่จะสามารถปรับปรุง และควบคุมประสิทธิภาพการคัดขนาด ในสภาวะเงื่อนไขการคัดขนาดที่แตกต่างกันออกไป ด้วยเหตุนี้ ขนาดทางออกส่วนละเอียดของไฮโดรไซโคลน มักจะถูกพิจารณาว่าเป็นตัวแปรทำงาน มากกว่าที่จะเป็นตัวแปรที่ได้จากการออกแบบ

Bradley (70) เสนอว่า ทางออกส่วนละเอียดของไฮโดรไซโคลน ต้องมีขนาดใหญ่กว่ารัศมีของ LMTV เพื่อป้องกันรูปแบบการไหลแบบ Short Circuit Flow ที่จะนำอนุภาคแร่ป้อนออกไปทางทางออกส่วนละเอียด โดยไม่มีการคัดขนาด และมีขนาดเล็กกว่า LZVV เพื่อที่ความเร็วตามแนวรัศมีของของไหล จะได้มีโอกาสนำส่วนละเอียดที่ผ่านการคัดขนาดแล้วออกไปทางทางออกส่วนละเอียด นั่นคือ ทางออกส่วนละเอียดของไฮโดรไซโคลน ควรจะมีค่าอยู่ในช่วง $D_c/8$ และ $D_c/2.3$

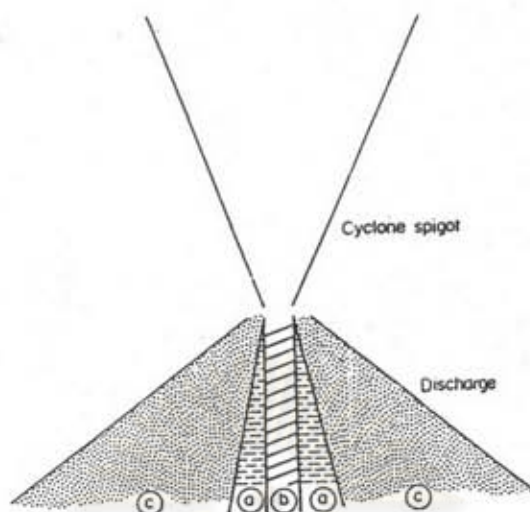
ผลของการเปลี่ยนแปลงขนาดทางออกส่วนละเอียดของไฮโดรไซโคลนที่มีต่อขนาด d_{50} พบว่า เมื่อความตันลดของแร่ป้อนคงที่ การลดขนาดของทางออกส่วนละเอียดทำให้ขนาด d_{50} ที่ได้จาก การคัดขนาดเล็กลง Plitt (76) ได้แสดงสมการความสัมพันธ์ระหว่างขนาด d_{50} กับขนาดทางออกส่วนละเอียดของไฮโดรไซโคลนดังนี้

$$d_{so} \propto D_o^{1.21} \dots (3.53)$$

สำหรับผลของขนาดทางออกส่วนละเอียดของไฮโดรไซโคลน ที่มีต่อความ
 หมดจดของการคัดขนาด พบว่า เมื่อขนาดทางออกส่วนละเอียดใหญ่ขึ้น ความหมดจดของการคัด
 ขนาดดีขึ้น นอกจากนี้ ความหมดจดของการคัดขนาดดีขึ้น เมื่อสัดส่วนระหว่างขนาดทางออกส่วน
 หยาบและละเอียดของไฮโดรไซโคลน (D_u/D_o) ลดลง

3.5.4 ทางออกส่วนหยาบของไฮโดรไซโคลน

ด้วยเหตุผลเดียวกันกับขนาดทางออกส่วนละเอียด ขนาดทางออกส่วนหยาบ
 ของไฮโดรไซโคลนมักจะถูกพิจารณาว่าเป็นตัวแปรทำงาน มากกว่าที่จะเป็นตัวแปรที่ได้จากการ
 ออกแบบ พบว่า ขนาดทางออกส่วนหยาบต้องมีขนาดใหญ่พอที่จะให้อนุภาคหยาบที่ถูกคัดขนาด
 แล้วออกจากไฮโดรไซโคลนโดยสะดวก ในทางปฏิบัติขนาดทางออกส่วนหยาบที่เหมาะสม
 ในการคัดขนาดนั้น สามารถสังเกตได้จากรูปแบบการปล่อยของของผสมที่เรียกว่า Vortex หรือ
 Spray Discharge (บริเวณแถบ a ในรูปที่ 3.20) คือมีการปล่อยเป็นรูปกรวยมีมุมกรวย
 ประมาณ 20 - 30 องศา รูปแบบการปล่อยแบบนี้สามารถจะปล่อยให้อนุภาคขนาดหยาบที่ถูก
 คัดขนาดแล้วออกมาทางทางออกส่วนหยาบสะดวกและมากที่สุด ถ้าขนาดทางออกส่วนหยาบเล็ก
 เกินไปจะมีรูปแบบการปล่อยของของผสมที่เรียกว่า Sausage หรือ Rope Discharge
 (บริเวณแถบ b) และจะทำให้โอกาสของอนุภาคหยาบที่จะออกไปทางทางออกส่วนละเอียด
 มากขึ้น เนื่องจากมีการอุดตันบริเวณทางออกส่วนหยาบ ถ้าขนาดทางออกส่วนหยาบใหญ่เกินไป
 จะมีรูปแบบการปล่อยของของผสมที่เรียกว่า Overloaded Discharge (บริเวณแถบ c) และ
 ส่วนหยาบที่ปล่อยออกมา จะประกอบด้วยน้ำ ซึ่งมีอนุภาคหยาบที่บดละเอียดที่ยังไม่ได้คัดขนาด
 ปนออกมาด้วยแทนที่อนุภาคหยาบเหล่านี้จะถูกคัดขนาดและออกไปทางทางออกส่วนละเอียด ดังนั้น
 ขนาดของทางออกส่วนหยาบที่มีขนาดใหญ่และเล็กเกินไปมีผลทำให้ประสิทธิภาพการคัดขนาดต่ำลง



รูปที่ 3.20 รูปแบบการปล่อยของของผลรวมออกทางทางออกส่วนเหยาบ (67)

- บริเวณแถบ a แสดงถึง Vortex หรือ Spray Discharge.
- บริเวณแถบ b แสดงถึง Sausage หรือ Rope Discharge.
- บริเวณแถบ c แสดงถึง Overloaded Discharge.

ผลของการเปลี่ยนแปลงขนาดทางออกส่วนเหยาบของไฮโดรไซโคลน ที่มีต่อขนาด d_{50} นั้น พบว่าขนาด d_{50} จะใหญ่ขึ้นถ้าขนาดทางออกส่วนเหยาบลดลง เพราะว่าการอุดตันของทางออกส่วนเหยาบทำให้ความดันลดของแบริบ่อนลดลง Plitt (71) ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาด d_{50} กับขนาดทางออกส่วนเหยาบดังสมการ

$$d_{50} \propto D_u^{0.71} \quad \dots (3.54)$$

สำหรับ Lynch (71)

$$d_{50} \propto \exp(0.13D_u) \quad \dots (3.55)$$

สำหรับผลของขนาดทางออกส่วนเหยาบ ที่มีต่อความหยาบของการคัดขนาดพบว่า เมื่อขนาดทางออกส่วนเหยาบเล็กลง ความหยาบของการคัดขนาดดีขึ้น