

บทที่ 2

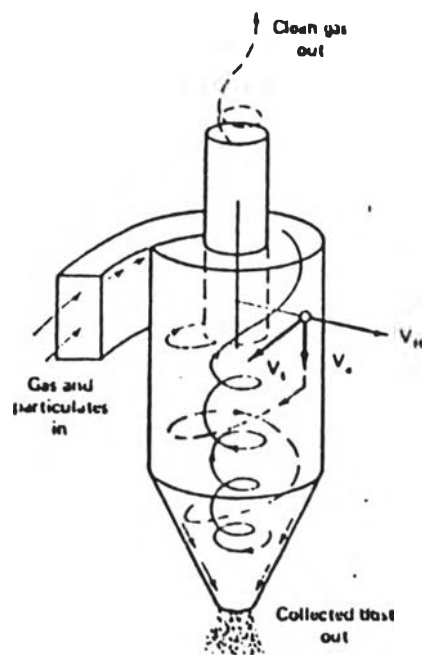
เหตุผลและสมมติฐาน

ไซโคลน เป็นเครื่องเก็บฝุ่นแบบแรงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal Dust Collector) อาศัยหลักการเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ของก๊าซที่ป้อนเข้าไปให้ไหลวนเวียนลงตามแนวผนัง เพื่อให้ฝุ่นที่แขวนลอยได้รับอิทธิพลของแรงโน้มถ่วงของโลก เทียบเท่ากับแรงเฉื่อยและโมเมนตัมของฝุ่นให้เปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่จากแบบเส้นตรง (Linear Motion) ไปเป็นแบบตามแนวเส้นรอบวง (Circular Motion) เกิดเป็นแรงหนีศูนย์กลาง (รูปที่ 3) ผลักดันฝุ่นให้เบนออกจากแนวการเคลื่อนที่เข้าสู่แนว Boundary Layer บริเวณใกล้ผนังไซโคลน ประสิทธิภาพสูงสูญเสียพลังงานจลน์ในการเคลื่อนที่ ทำให้แรงภายนอกซึ่งเกิดจากการหมุนของใบพัดภายนอก สามารถผลักดันฝุ่นให้ตกลงสู่ภาชนะรองรับเบื้องล่าง (Dust Hopper) เพื่อนำไปกำจัดทิ้ง ในขณะที่ก๊าซที่ได้รับการแยกฝุ่นบางส่วนออกแล้ว จะถูกปล่อยออกจากไซโคลนทางท่อทางออก (Outlet Duct) ด้านบนต่อไป

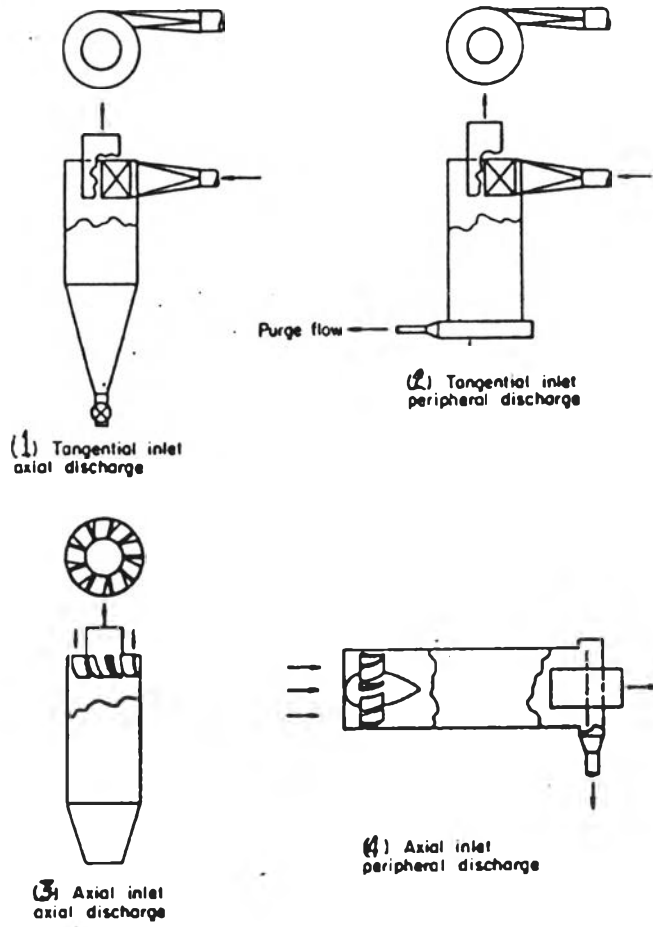
2.1 โครงสร้าง ชนิดและหน้าที่การทำงานของส่วนประกอบไซโคลน

โครงสร้างไซโคลนทั่วไป ประกอบขึ้นด้วยส่วนประกอบหลักที่สำคัญ ได้แก่ ท่อทางเข้า (Inlet) ท่อทางออก (Outlet) และช่องปล่อยฝุ่นออก (Dust Discharge) ซึ่งส่วนประกอบเหล่านี้สามารถใช้เป็นเกณฑ์ช่วยแบ่งประเภทของไซโคลนออกเป็นแบบต่างๆ (รูปที่ 4) ดังนี้

- แบบที่หนึ่ง - ไซโคลนชนิดก๊าซเข้าแนวสัมผัส ฝุ่นออกแนวแกน (Tangential Inlet & Axial Discharge Type)
- แบบที่สอง - ไซโคลนชนิดก๊าซเข้าแนวสัมผัส ฝุ่นออกแนวเส้นรอบวง (Tangential Inlet & Peripheral Discharge Type)



รูปที่ 3 - กลไกการทำงานของไซโคลนทั่ว ๆ ไป



รูปที่ 4 - ไซโคลนแบบต่าง ๆ ที่ใช้งาน

แบบที่สาม - ไชโคลนชนิดก๊าซเข้าแนวแกน ฝุ่นออกแนวแกน (Axial Inlet & Axial Discharge Type)

แบบที่สี่ - ไชโคลนชนิดก๊าซเข้าแนวแกน ฝุ่นออกแนวเส้นรอบวง (Axial Inlet & Peripheral Discharge Type)

ไชโคลนแบบที่หนึ่ง เป็นแบบที่นิยมใช้เนื่องจาก มีโครงสร้างง่าย ประหยัด ราคาถูก สามารถบำบัดก๊าซได้ในปริมาณสูง ค่าบำรุงรักษาต่ำ ส่วนแบบที่สองคล้ายคลึงกับแบบแรกมาก แต่มีการไหลกลับ (Purge Flow) ทางด้านล่างจึงไม่นิยมใช้ เพราะมักเกิดการผสมกันของก๊าซที่บริเวณด้านล่างและไหลกลับขึ้นสู่ท่อทางออกในแนวแกนได้ง่าย

สำหรับไชโคลนแบบที่สามและสี่ เป็นแบบหมุน (Rotary Type) สามารถบำบัดก๊าซได้ปริมาณมากกว่าสองแบบแรกถึงสามเท่า นิยมใช้เป็นมัลติไชโคลนหรือไชโคลนแบบชุด (Multi-Cyclone) เพราะการกระจายของก๊าซเข้าแต่ละตัวสม่ำเสมอว่าสองแบบแรก แต่ความดันตกที่เกิดขึ้นมีค่าสูง ประมาณ 80 - 100 มิลลิเมตรของน้ำในแบบที่สามและประมาณ 50 มิลลิเมตรของน้ำในแบบที่สี่ ปัจจุบันไม่นิยมใช้ไชโคลนแบบหมุนนี้แล้ว เพราะความดันภายในเสียสมดุลได้ง่าย ทำให้สมรรถนะที่ได้ต่ำ

สำหรับการศึกษาค้างนี้ เลือกไชโคลนแบบที่หนึ่งเป็นชุดทดสอบ เพราะเป็นที่นิยมใช้ในกิจการอุตสาหกรรมทั่วไป ซึ่งส่วนประกอบและหน้าที่การทำงานของแต่ละส่วน (รูปที่ 1) ได้แก่

ส่วนประกอบ	หน้าที่การทำงาน
1. ท่อลำเลียงก๊าซ (Dust Laden Gas)	เป็นท่อที่ต่อจากท่อส่งก๊าซออกของขบวนการผลิต เพื่อรับก๊าซเข้าสู่ไชโคลน
2. ท่อทางเข้าสัมผัส (Tangential Inlet)	เป็นท่อติดตั้ง แนวสัมผัสเส้นรอบวงของทรงกระบอก ใช้บังคับให้ก๊าซเปลี่ยนทิศทางการไหล จากการไหลแบบตรงเป็นการไหลเวียนแบบก้นหอย (Spiral Flow)
3. ท่อทรงกระบอก (Cylindrical Body)	เป็นท่อกลวงรูปทรงกระบอก ใช้เป็นแนวปะทะของฝุ่น (Barrier) เพื่อลดพลังงานจลน์ในการเคลื่อนที่

- | | |
|--|---|
| 4. กรวยไซโคลน (Conical Base) | เป็นกรวยกลวงยอดตัด ใช้เพื่อช่วยลดความยาวของทรงกระบอกลง ไม่ให้ไซโคลนสูงเกินไปและช่วยเป็นแนวปะทะบังคับให้ก๊าซที่หมุนเวียนเปลี่ยนทิศการไหลย้อนกลับที่บนได้ |
| 5. ที่รองรับฝุ่น (Dust Hopper) | ใช้รองรับฝุ่นที่แยกจากก๊าซ เพื่อนำออกจากไซโคลนมาจัดทิ้งต่อไป |
| 6. ท่อทางออกก๊าซ (Cleaned Gas Discharge) | ใช้ระบายก๊าซที่ได้แยกฝุ่นบางส่วนออกมา |

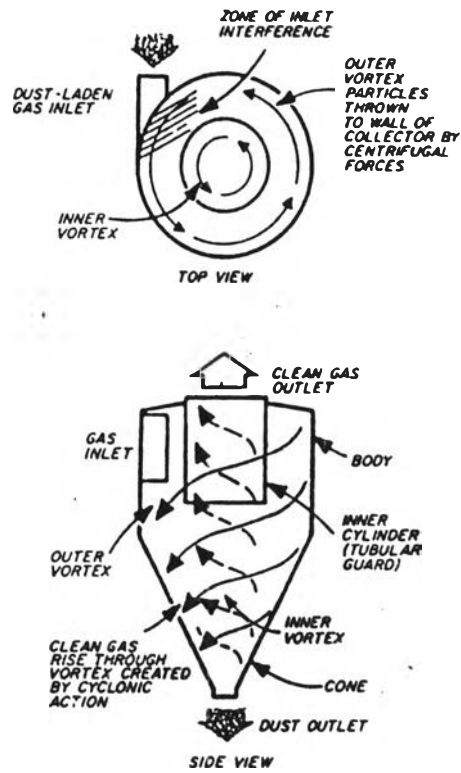
2.2 ขั้นตอนการทำงาน (Cyclone Performance)

การทำงานของไซโคลน เป็นเกลียวที่เกิดขึ้นไม่ซับซ้อน มีปรากฏการณ์เกิดขึ้นคล้ายๆ กันในไซโคลนทั่วไป สามารถแบ่งการทำงานออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่

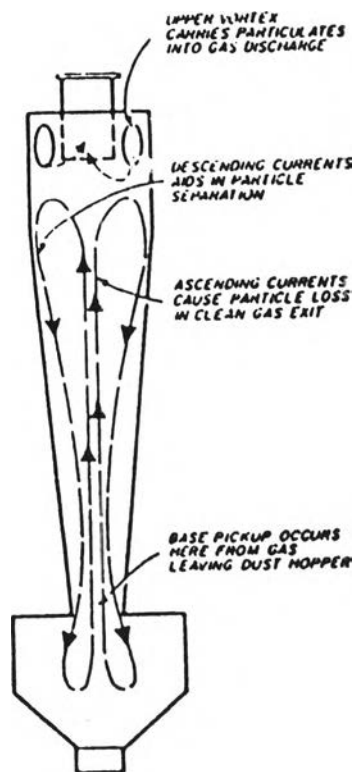
1. การเกิดการไหลเวียนของก๊าซ (Gas Flow Patterns) ก๊าซเมื่อถูกป้อนเข้าไปในแนวสัมผัสบริเวณส่วนบนของทรงกระบอก (รูปที่ 5) จะถูกชักนำให้เกิดวอร์เทคหรือการไหลเวียนแบบก้นหอยระหว่างผนังไซโคลนและผนังท่อทางออกก๊าซ ลักษณะการไหลเป็นแบบหมุนวนเวียนลงด้านล่าง (Descending Motion) ซึ่งเรียกว่าวอร์เทคชนิดนี้ว่า วอร์เทคแบบกึ่งอิสระ (Semi - Free Vortex) หรือวอร์เทคหลัก (Main Vortex) หรือวอร์เทคชั้นนอก (Outer Vortex) และเมื่อเข้าใกล้ก้นกรวย วอร์เทคจะถูกบังคับให้กลับทิศการไหล เปลี่ยนเป็นหมุนเคลื่อนที่ขึ้นแทรกผ่านด้านใน (Inner Vortex) หรือวอร์เทคหลักเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นวอร์เทคแบบบังคับ (Forced Vortex) ซึ่งเรียกวอร์เทคที่เกิดด้านในนี้ว่า แกน (Core)

ความเร็วที่เกิดขึ้นเนื่องจากการหมุนของวอร์เทคในแนวสัมผัส จะเป็นความเร็วเส้นสัมผัส ซึ่งจะแปรกลับกับรัศมีของไซโคลน เท่ากับ

$$U_T = U \left[R_p / R \right]^n \quad (1)$$



รูปที่ 5 - การไหลเวียนของก๊าซในไซโคลน



รูปที่ 6 - การไหลวนของก๊าซในไซโคลน

เมื่อ

$$\begin{aligned}
 U_T &= \text{ความเร็วเส้นสัมผัสที่รัศมีการหมุน, } R \\
 U_{T_p} &= \text{ความเร็วเส้นสัมผัสที่รัศมีการหมุน, } R_p \\
 n &= \text{ค่าคงที่ขึ้นกับลักษณะของก๊าซ}
 \end{aligned}$$

นอกจากนี้ ที่ส่วนบนของไซโคลอน (รูปที่ 6) บริเวณช่องว่างระหว่างไซโคลอน และท่อทางออก ความเร็วเส้นสัมผัสจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอจากผนังไซโคลอนถึงผนังท่อทางออก ทำให้เกิดการไหลของก๊าซเฉียดผนังส่วนบนของทรงกระบอก นวดาฝุ่นให้ไหลเวียนตามและไหลตัดเข้าสู่ด้านใน เฉียบลงตามแนวผนังด้านนอกของท่อทางออก ทำให้ฝุ่นมีโอกาสหลุดติดกับก๊าซที่ไหลออกจากไซโคลอนสู่อากาศได้ ซึ่งลักษณะการไหลของก๊าซแบบนี้เรียกว่าการไหลวน (Eddy Flow)

2. การแยกฝุ่นในวอร์เทกซ์ (Separation of Dust in the Vortex) ผลจากการเกิดวอร์เทกซ์ ช่วยเหนี่ยวนำให้เกิดแรงหนีศูนย์กลางขึ้น ทำให้ฝุ่นที่แขวนลอยเคลื่อนตัวเข้าปะทะผนังไซโคลอน เกิดการสูญเสียพลังงานจลน์ในการเคลื่อนที่และแยกตัวออกจากวอร์เทกซ์เคลื่อนที่ลงสู่เบื้องล่าง ซึ่งขนาดของแรงที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ

$$F_c = m_p \cdot U_T^2 / gR \quad (2)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned}
 F_c &= \text{แรงหนีศูนย์กลาง} \\
 m_p &= \text{มวลของฝุ่น} \\
 g &= \text{ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก} \\
 R &= \text{รัศมีการหมุน}
 \end{aligned}$$

3. การปล่อยฝุ่นที่แยกแล้ว (Discharge of Separated Dust) ฝุ่นที่ปะทะผนังไซโคลอน จะสูญเสียพลังงานจลน์ในการเคลื่อนที่ รวมตัวกันเป็นกลุ่มของฝุ่นที่มีความเข้มข้นสูง หมุนตัวลงอย่างช้าๆ และถูกดึงดูดให้เคลื่อนตัวลงสู่ที่รองรับฝุ่นเบื้องล่าง อาศัยอิทธิพลของแรงโน้มถ่วงของโลกทำให้ฝุ่นสามารถหลุดออกจากวอร์เทกซ์ที่กำลังหมุนวนอยู่ได้

2.3 กลไกการทำงานของไซโคลน (Mechanism of Cyclone)

กลไกการทำงานที่เกิดขึ้นในไซโคลน มีลักษณะคล้ายการไหลของของไหลที่มีอนุภาคปะปน อยู่ภายในกระแสของของไหล กล่าวคือ อนุภาคที่ปะปนจะเกิดสถานะเสถียร (Steady State) หรือเกิดสภาวะสมดุลย์ของแรงต่างๆ ที่กระทำต่ออนุภาค (รูปที่ 7) ซึ่งแรงเหล่านี้ได้แก่ แรงลาก (Drag Force, F_D) แรงภายนอก (External Force, F_E) และแรงลอยตัว (Buoyancy force, F_b)

แรงลาก เป็นแรงที่เกิดขึ้นจากการไหลของของไหลกระทำต่ออนุภาค สามารถทำนายอนุภาค ให้เคลื่อนที่ตามที่การไหลได้ ซึ่งขนาดของแรงที่เกิดขึ้นจะสัมพันธ์กับความเร็วในการไหลของของไหล มีค่าเท่ากับ

$$F_D = \frac{C_D \cdot U_{p,0}^2 \cdot \rho_f \cdot s}{2g} \quad (3)$$

เมื่อ

$$U_{p,0} = \text{ความเร็วสัมพัทธ์ในการไหล}$$

$$\rho_f = \text{ความหนาแน่นของของไหล}$$

$$C_D = \text{สัมประสิทธิ์ของแรงลาก}$$

$$s = \text{พื้นที่ผิวรับแรงกระทำ}$$

ขณะเดียวกัน อนุภาคเหล่านี้จะอยู่ภายใต้อิทธิพลของแรงกระทำภายนอกด้วย ซึ่งเท่ากับ

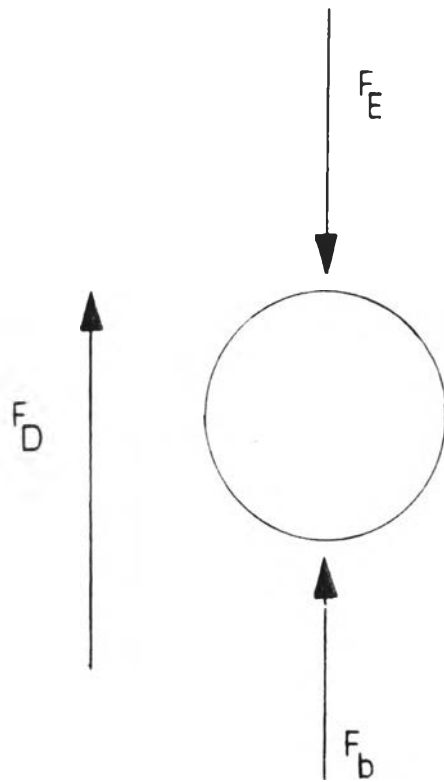
$$F_E = m_p \cdot \frac{dU}{dt} \quad (4)$$

เมื่อ

$$F_E = \text{แรงภายนอกที่กระทำต่ออนุภาค}$$

$$m_p = \text{มวลของอนุภาค}$$

$$\frac{dU}{dt} = \text{ความเร่งในการเคลื่อนที่ ในเทอมของ } a_E$$



รูปที่ 7 แรงต่าง ๆ ที่กระทำต่ออนุภาคแขวนลอยในของไหล

และอนุภาคจะมีแรงต้านทานหรือแรงลอยตัว ซึ่งเกิดจากการที่ของไหลถูกแทนที่ด้วยปริมาตรของอนุภาค (กฎของอาคีเมดีส) เท่ากับ

$$F_b = \frac{m \cdot \rho_f \cdot a_E}{\rho_s} \quad (5)$$

เมื่อ

$$\frac{m \cdot \rho_f}{\rho_s} = \text{มวลของของไหลที่ถูกแทนที่}$$

ดังนั้น อนุภาคที่แขวนลอย จะเคลื่อนที่ไปในทิศทางของแรงลัพธ์ ซึ่งความเร่งในการเคลื่อนที่เท่ากับ

$$a = a_E - \frac{C_D \cdot U_{P,0}^2}{2g} - \frac{\rho_f \cdot a_E}{\rho_s} \quad (6)$$

a = ความเร่งลัพธ์ของการเคลื่อนที่ของอนุภาค

เมื่อเปรียบเทียบกับไซโคลน แรงภายนอกจะเกิดจากการไหลเวียนของก๊าซ ซึ่งความเร่งจะสัมพันธ์กับอัตราเร็วเชิงมุม (w) ดังนั้นการหาค่าความเร็วเส้นสัมผัส (U_T) จะได้จาก

$$U_T = R w \quad (7)$$

เมื่อ R = รัศมีการไหลของก๊าซ

และความเร่งในเทอมของแรงหนีศูนย์กลาง, a_c เท่ากับ

$$a_c = U_T^2 / R = R w^2 \quad (8)$$

จะเห็นได้ว่า ในไซโคลนต่างๆ ไป กลไกการทำงานเป็นการบังคับให้ฝุ่นอนุภาควิวิน ตามแนววงรีที่แคบๆ เบื้องล่าง ฉะนั้นปัจจัยหลักในการออกแบบไซโคลนจึงเป็นการพยายามสร้างวงรีที่ เกิดขึ้น เพื่อช่วยผลักดันให้เคลื่อนตัวเข้าหาแนวผนังและลงสู่ที่รองรับเบื้องล่าง จึงทำให้แรงหนีศูนย์กลางที่เกิดจะต้องมีค่ามากพอที่จะกระทำให้ฝุ่นหลุดพ้นจากอิทธิพลของวงรีที่อนุภาควิวินอยู่ได้ Lapple (1972) ได้เสนอว่า ฝุ่นที่อนุภาควิวินอยู่จะได้รับแรงกระทำต่างๆ กัน โดยฝุ่นขนาดใหญ่จะเคลื่อนไปตามแนวเส้นรอบวงของไซโคลน ส่วนฝุ่นขนาดเล็กกว่าจะเบนเข้าสู่แนวแกนกลาง และฝุ่นขนาดที่ไซโคลนสามารถเก็บรวบรวมได้โดยไม่หลุดรอดออกทางท่อนำก๊าซออกเลข จะเรียกว่า "ฝุ่นขนาดวิกฤต" (Critical Size)



สำหรับแผ่นขนาดวิกฤต (Critical Size) นี้จะถือว่าเป็นแผ่นที่มีความเร็วปลายเป็นศูนย์ จึงทำให้สมการ (8) ความเร่งภายนอกเท่ากับ $a_c \cdot U_{p,0}$ และเป็นค่าของอัตราเร็วเชิงมุมด้วย นอกจากนี้ เมื่อความเร็วปลาย, $U_{c,r} = U_{r,0}$ (อัตราเร็วเชิงมุมค่าสุดท้าย) แผ่นขนาดวิกฤตจะมีปรากฏการณ์การเคลื่อนที่ในไซโคลน ดังนี้

แทนค่า $F = Ma$;

$$0 = a_c - \frac{C_D \cdot U_{P,0}^2 \cdot \rho_f \cdot s}{2M} - \frac{a_c \cdot \rho_f}{\rho_s}$$

$$\frac{(\rho_s - \rho_f)}{\rho_s} \cdot a_c = \frac{C_D \cdot U_{P,0}^2 \cdot \rho_f \cdot s}{2M} \quad (9)$$

ในบรรยากาศปกติ $\rho_s \gg \rho_f$ ทำให้

$$U_{T,S}^2 = \frac{U_T^2}{R} \cdot \frac{2M}{C_D \cdot \rho_f \cdot s} \quad (10)$$

พื้นที่หน้าตัดของแผ่น (Projection Area) ที่รับแรงกระทำในแนวตั้งฉาก

$$s = \frac{\pi}{4} \cdot D_{Pc}^2 \quad (11)$$

และอัตราส่วนของปริมาตรต่อพื้นที่ผิวเท่ากับ $\frac{2}{3} D_P$

ดังนั้น สมการ (10) ความเร็วเชิงมุมค่าสุดท้าย จะมีค่าเป็น

$$U_{T,S}^2 = \frac{U_T^2}{R} \cdot \frac{2\rho_s}{C_D \cdot \rho_f} \cdot \frac{2}{3} D_{Pc} \quad (12)$$

เมื่อ

 D_{Pc} = เส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นขนาดตัด

Stokes (1850) ได้เสนอความสัมพันธ์ของการหาสัมประสิทธิ์แรงลาก, C_D กับสภาพการไหลเป็นฟังก์ชันของ Reynold Number (N_{Re}) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่น, D_p ซึ่งเท่ากับ

$$C_D = \frac{24}{N_{Re}} \quad (1,000 < N_{Re} < 250,000) \quad (13)$$

และ

$$N_{Re} = D_{Pc} \cdot U_T \cdot \rho_f / \mu \quad (14)$$

เมื่อ

 μ = ความหนืดของก๊าซ

ดังนั้นขณะที่ความเร็วปลายมีค่าเท่ากับ อัตราเชิงมุมค่าสุดท้าย N_{Re} จะเท่ากับ

$$N_{Re} = D_{Pc} \cdot U_{T,S} \cdot \rho_f / \mu \quad (15)$$

ซึ่งทำให้

$$U_{T,S} = \frac{\rho_s}{\mu} \cdot \frac{U_T^2 D_{Pc}^2}{18} \quad (16)$$

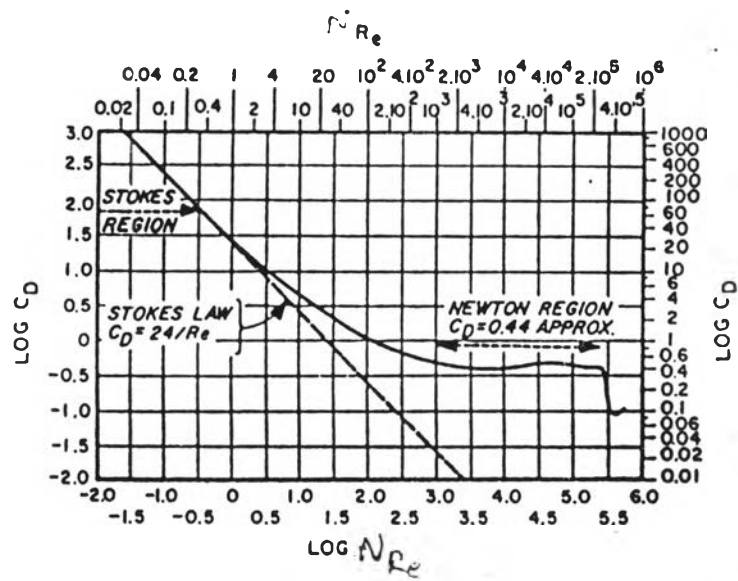
ความสัมพันธ์ดังกล่าวข้างต้นสามารถสรุปได้ด้วยภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงลาก, C_D และ N_{Re} สำหรับแผ่นทรงกลม (รูปที่ 8) ซึ่งได้ช่วยในการประมาณขนาดตัดของแผ่นที่เหมาะสม โดยต้องพิจารณาความเร่งในการเคลื่อนที่เป็นจำนวนเท่าแรงโน้มถ่วงโลก ซึ่งได้แก่

$$\begin{aligned} \text{สมการ (8),} \quad a_c &= U_T^2 / R \\ &= ng \end{aligned} \quad (17)$$

เมื่อ

 n = จำนวนเท่าของความเร่งต่อแรงโน้มถ่วงโลก

จากสมการ (16) และ (17)



รูปที่ 8 - ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงลากและเรโนลด์นัมเบอร์สำหรับแผ่นทรงกลม

$$\text{ฉะนั้น } D_{P_c} = \sqrt{\frac{18 \cdot \mu \cdot U_{T,S}}{ng \cdot \rho_s}} \quad (18)$$

สมมติฐานข้างต้น อาศัยพื้นฐานจากอนุรูปทรงกลม (Spherical Shape) ซึ่งในทางปฏิบัติ อนุที่แขวนลอยจะมีขนาดและรูปร่างของอนุภาคคละกัน (Aggregates) จึงต้องมีการหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสมดุลย์ (Equivalent Diameter) เพราะเป็นการหาขนาดอนุ ที่มีขนาดและความหนาแน่นเทียบเท่าทรงกลม เพื่อใช้เก็บตัวแทนต่อไป

การหาขนาดสมดุลย์ จำเป็นต้องทราบความเร็วของก๊าซบริเวณช่องทางเข้าและความเร็วเส้นสัมผัส ซึ่งสามารถหาได้จาก Velocity Distribution Curve (รูปที่ 9) เพราะในออร์เทกหลัก เมื่อก๊าซมีความหนืดเป็นศูนย์ ความเร็วสัมผัสจะแปรกลับรัศมีการไหล ดังนี้

$$\frac{U_{T_1}}{U_{T_2}} = \frac{R_2}{R_1} \quad (19)$$

แต่ในบรรยากาศปกติ ก๊าซจะมีความหนืดไม่คงที่ เมื่อความเร็วเชิงมุมคงที่ ก๊าซจะไม่สามารถเคลื่อนผ่านไปได้อย่างอิสระ (รูปที่ 10) ทำให้

$$U_T^2 \cdot R = \text{Constant} \quad (20)$$

$$\frac{U_{T_1}}{U_{T_2}} = \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (21)$$

ฉะนั้น ความสัมพันธ์ของความเร็วก๊าซในไซโคลน (รูปที่ 11) เท่ากับ

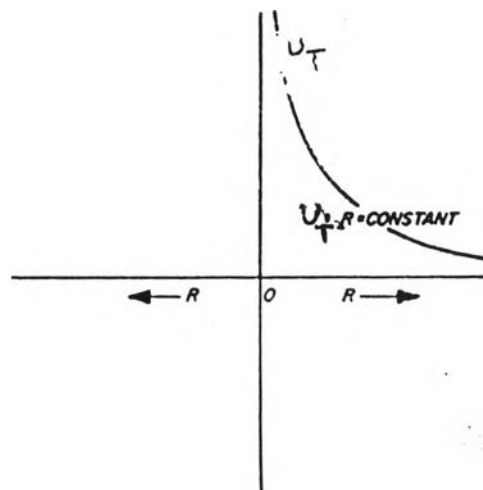
$$U_T \cdot R^y = \text{Constant} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } y &= \text{constant} \\ &= -1.0 \text{ ถึง } 0.5 \end{aligned}$$

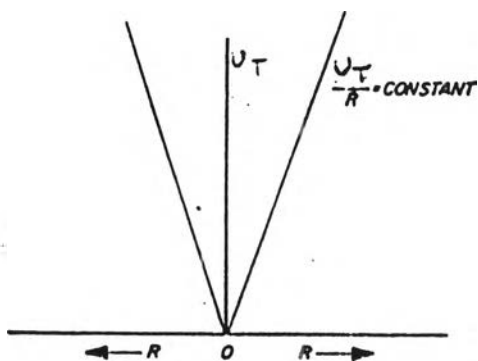
แม้ว่า Velocity Distribution Curve ไม่เป็นเส้นตรง แต่บริเวณกึ่งกลางระหว่างช่องทางออกและผนังไซโคลน การกระจายความเร็วจะเท่ากับ

$$U_T \cdot R^{0.5} = \text{Constant} \quad (23)$$

ฉะนั้น ในทุกส่วนของไซโคลน เมื่อรัศมีการไหลเป็นศูนย์ ความเร็วเส้นสัมผัสมีค่าเป็น



รูปที่ 9 - การกระจายความเร็วของของไหลบริเวณวอร์เทกซ์อิสระ
และความหนืดของของไหลเป็นศูนย์



รูปที่ 10 - การกระจายความเร็วของของไหลเมื่อค่าความหนืดไม่จำกัด

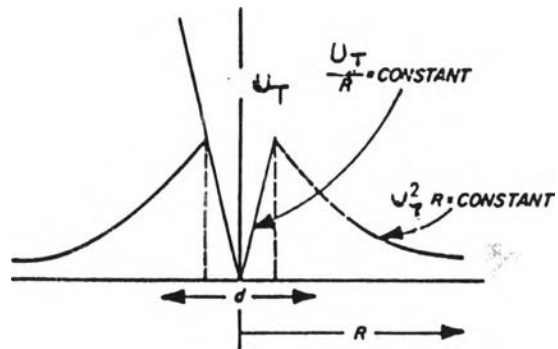


Fig 11 - Velocity Distribution

สูงสุดและที่บริเวณกึ่งกลางถึงผิวด้านนอกท่อทางออก การกระจายความเร็วจะอยู่ในเทอมของ U_T โดยที่แทนไฮโดรเจน U_T จะมีค่าเป็นศูนย์ และที่จุดอื่นๆ เท่ากับ

$$U_T = R \cdot \text{Constant} \quad (0 < R < d/2)$$

$$= \frac{\text{Constant}}{R^{0.5}} \quad (d/2 < R < D/2) \quad (24)$$

เมื่อ

d = เส้นผ่านศูนย์กลางกึ่งกลางของท่อทางออกก๊าซ

D = เส้นผ่านศูนย์กลางกึ่งกลางของไฮโดรเจน

และ ถ้ากำหนดให้

H = โหมดของแรงรอนแทนไฮโดรเจน

U_I = ความเร็วของก๊าซไหลเข้าไฮโดรเจน

A_I = พื้นที่หน้าตัดของท่อทางเข้า

A_S = พื้นที่ผิวของไฮโดรเจนส่วนที่สัมผัสกับก๊าซที่ไหลเวียน

$U_{I,T}$ = ความเร็วเส้นสัมผัสที่ท่อทางเข้า

$U_{O,T}$ = ความเร็วเส้นสัมผัสที่ท่อทางออก

$R_{I,av}$ = ค่าเฉลี่ยของรัศมีของท่อทางเข้า

$R_{O,av}$ = ค่าเฉลี่ยของรัศมีของท่อทางออก

Q = อัตราการไหลของก๊าซ

C_{DS} = สัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทาน

โหมดของแรงของก๊าซที่ออกจากไฮโดรเจน คิรอนแทนไฮโดรเจน เท่ากับ

$$H_O = \frac{Q \cdot \rho_f \cdot U_{O,T} \cdot R_{O,av}}{g} \quad (25)$$

แทนค่าสมการ (25),

$$H_O = \frac{U_I \cdot A_I \cdot \rho_f \cdot U_{I,T} \cdot (R_{I,av} \cdot R_{O,av})^{\frac{1}{2}}}{g} \quad (26)$$

ในทำนองเดียวกัน โหมดของแรงเนื่องจากก๊าซไหลเข้า เท่ากับ

$$H_I = \frac{U_I^2 \cdot A_I \cdot \rho_f \cdot R_{I,av}}{g} \quad (27)$$

เนื่องจาก ในขณะที่ก๊าซไหลจะเกิดแรงเสียดทานหรือแรงเฉือน (Shear Force) ขึ้น ทำให้โมเมนต์ของแรงที่ช่องทางเข้าและออกมีขนาดต่างกัน ซึ่งขนาดของแรงที่เกิดขึ้นเท่ากับ

$$\text{Shear} = \frac{C_{DS} \cdot \rho_f \cdot U_T^2 \cdot A_s \cdot R}{g} \quad (28)$$

และ โมเมนต์แรงเฉือนรอบแนวนอน เท่ากับ

$$H = \frac{C_{DS} \cdot \rho_f \cdot U_{I,T} \cdot R_{I,av} \cdot A_s}{g} \quad (29)$$

ดังนั้น โมเมนต์ของแรงของก๊าซเข้าไซโคลนจะเท่ากับผลรวมของโมเมนต์ของก๊าซที่ออก จากไซโคลนและของแรงเฉือน ได้แก่

$$H_{Inlet} = H_{Outlet} + H_{Shear} \quad (30)$$

แทนค่าสมการ (26), (27), (29) ทำให้

$$\frac{U_{I,T}}{U_I} = \frac{-(R_{O,av}/R_{I,av})^{0.5} + [(R_{O,av}/R_{I,av}) + (4C_{DS} \cdot A_s/A_I)]^{0.5}}{2(C_{DS} \cdot A_s/A_I)} \quad (31)$$

แทนค่าสมการ (26), (27), (29) ทำให้

(32)

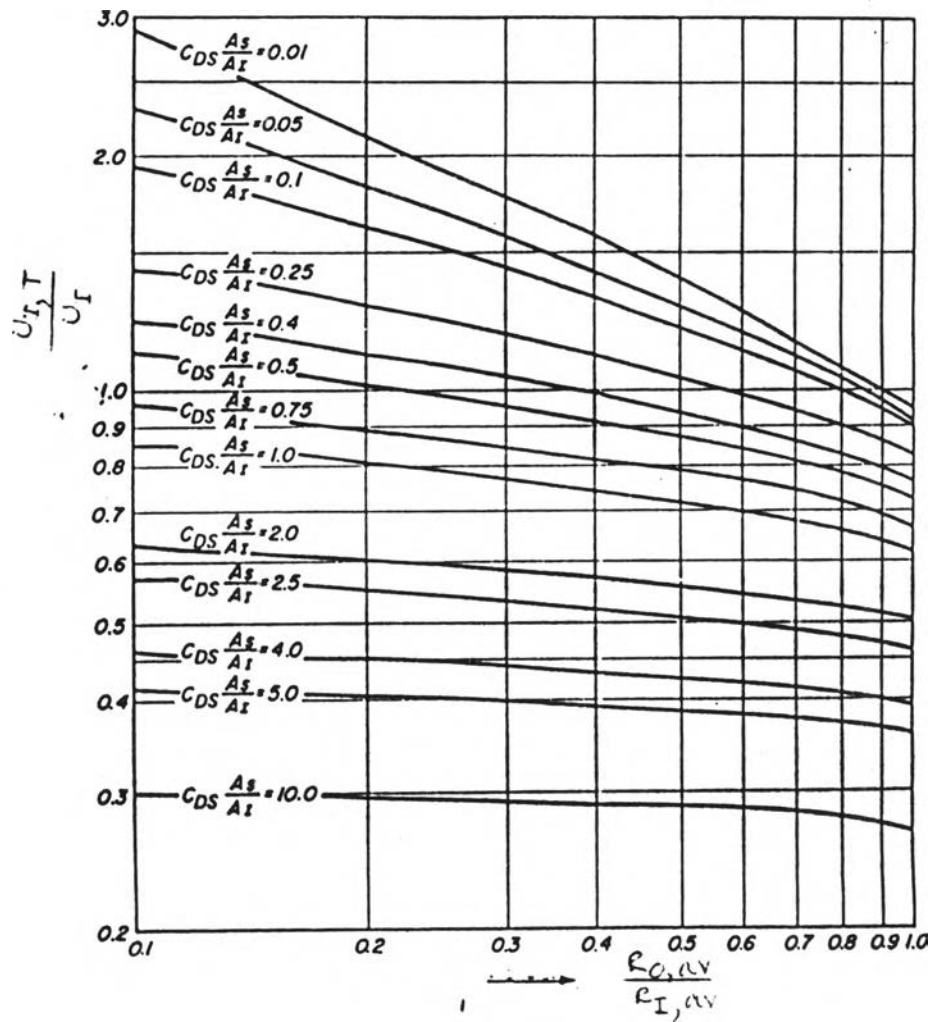
ผลลัพธ์ที่ได้ของอัตราส่วนของ $U_{I,T}/U_I$ จะใช้เฉพาะค่าบวกเท่านั้น และอัตราส่วน ของ $C_{DS} \cdot A_s/A_I$ สามารถหาค่าได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $U_{I,T}/U_I$ กับ $\frac{R_{O,av}}{R_{I,av}}$ (รูปที่ 12) ส่วนค่า C_{DS} (Bhatia & Cheremisinoff, 1975) ได้ประมาณไว้เท่ากับ 1/200 และความลดภายในท่อเมื่อ N_{Re} สัมพันธ์กับการไหลของก๊าซที่ผนังไซโคลนนั้นคือ หนึ่ง ความยาว Velocity Head เท่ากับ 50 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อซึ่งเท่ากับ

$$A_s = 50 \cdot \pi D^2 \quad (33)$$

แทนค่าสมการ (32),

$$C_{DS} = 1/200$$

จะได้การศึกษากลไกการทำงานของไซโคลน จะกระทำได้เมื่อทราบความเร็วของก๊าซที่ ไหลเข้าไซโคลนก่อนเท่านั้น ส่วนตัวแปรอื่นๆ จะสามารถหาค่าได้โดยอาศัยสมการข้างต้น



รูปที่ 12 - กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของความเร็วของก๊าซไหลเข้า และอัตราส่วนของปริมาตรเฉลี่ยของท่อทางออกและเข้าของก๊าซ

2.4 การประเมินสมรรถนะของไซโคลน (Prediction of Cyclone Performance)

การประเมินสมรรถนะของไซโคลน เป็นการประมาณผลการทำงานและความดันลดที่เกิดขึ้นในไซโคลน สามารถแบ่งรูปแบบของการประเมินออกเป็น 2 ประเภทได้แก่

1. การประเมินประสิทธิภาพของไซโคลน (Prediction of Efficiency)
2. การประเมินความดันลดของไซโคลน (prediction of Pressure Drop)

การประเมินประสิทธิภาพของไซโคลน เป็นการหาขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางฝุ่นขนาดวิกฤต (Critical particle Diameter) ซึ่งเป็นขนาดที่ถือว่า ไซโคลน สามารถเก็บรวบรวมได้ประสิทธิภาพร้อยละแปดสิบ โดยอาศัยสมมติฐาน (Rosin, Rammler และ Intelmann, 1932) ดังนี้

1. ฝุ่นต้องเป็นอิสระซึ่งกันและกัน
2. ฝุ่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะผนังแล้ว จะไม่ย้อนกลับเข้าสู่ก๊าซที่ไหลวนอีก
3. ลักษณะการเคลื่อนที่ของฝุ่นและก๊าซ สามารถวิเคราะห์ด้วย Stokes' Law ได้
4. ไม่คิดผลกระทบของแรงลอยตัว
5. ไซโคลนต้องเป็นรูปทรงกระบอก
6. ความเร็วเส้นสัมผัสของฝุ่นต้องคงที่ และมีแนวทางการเคลื่อนที่เป็นอิสระต่อการเคลื่อนที่ของฝุ่นเข้าปะทะแนวผนังตามสมมติฐานนี้ ฝุ่นจะรักษารูปทรงเดิมไว้ได้ ทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางของฝุ่นขนาดวิกฤตมีค่าคงที่ ซึ่งเท่ากับ

$$D_C = 3 \sqrt{\frac{\mu g}{\pi \cdot \rho_p \cdot U_I} \cdot \frac{R}{N_e} \cdot \left(1 - \frac{R}{D}\right)} \quad (34)$$

เมื่อ

$$D_C = \text{เส้นผ่านศูนย์กลางของฝุ่นขนาดวิกฤต}$$

$$\begin{aligned} R &= \text{ระยะเฉลี่ยของฝุ่นในท่อทางเข้าจากแนวแกน} \\ &= D/2 - b/2 \quad (\text{รูปที่ 13}) \end{aligned}$$

$$N_e = \text{จำนวนรอบก๊าซที่หมุนในไซโคลน}$$

จำนวนรอบของก๊าซที่หมุนในไซโคลน , N_e เท่ากับ

$$N_e = \frac{t \cdot U_I}{\pi D} \quad (35)$$

เมื่อ

t = เวลาในการไหลวนของก๊าซ

Dalla Valla (1932) ได้ประเมินค่าของ N_e เท่ากับ 0.5 - 3.0 และได้เสนอวิธีการหาปริมาตรของไซโคลน (รูปที่ 13) ซึ่งเท่ากับ

$$V = \frac{\pi}{4} \left[\frac{H-h}{D-B} \cdot \frac{D^3 - B^3}{3} + D^2 h - D_e^2 \cdot s \right] \quad (36)$$

ต่อมา Rietema (1934) ได้เสนอวิธีการหาขนาดวิกฤต โดยพิจารณาลักษณะการไหลของก๊าซแทน (รูปที่ 13) ดังนี้

$$D_c = \sqrt{\frac{9U_H}{U_I} \cdot \frac{D}{a \cdot H} \cdot \frac{Q}{\Delta P} \cdot \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f}} \quad (37)$$

สมมติฐานของ Rietema จะไม่พิจารณาค่าของ Reynold Number และกำหนดให้อัตราส่วนของ U_H / U_I คงที่ ฉะนั้น เมื่อทราบขนาดของ D, a และ H แล้ว จะสามารถประมาณค่าของความดันลดได้ด้วย

Davies (1934) เสนอสมมติฐานที่ต่างจาก Rosin และคณะ โดยกำหนดให้ฝุ่นเคลื่อนที่ผ่านแนวออร์เทกซิสแทน (รูปที่ 13) ทำให้ขนาดวิกฤตเท่ากับ

$$D_c = 1.5 \sqrt{\frac{D \cdot \mu}{2H(\rho_s - \rho_f)U_I} \cdot \left[1 - \left(\frac{D_e}{D}\right)^4\right]} \quad (38)$$

ส่วน Feifel (1936) ได้เสนอสมมติฐานที่คิดเวลาในการเคลื่อนที่ของก๊าซในไซโคลน

ในเทอมของอัตราส่วนของความสูงทั้งหมด ของไซโคลนต่อความเร็วของก๊าซที่ไหลเข้าไซโคลน, (รูปที่ 13) ทำให้ขนาดวิกฤตเท่ากับ

$$D_c = 3 \sqrt{\left[\frac{Q \cdot \mu}{2 U_I^2 (\rho_s - \rho_f)} \cdot \left(\frac{1 - (2D_e/3D)^4}{\frac{H-h}{D-B} \cdot \frac{D^3 - B^3}{D^2} + h - s \cdot (D_e/D)^2} \right) \right]} \quad (39)$$

Stairmand (1940) ได้เสนอสมมติฐานคัดค้านการหาขนาดวิกฤตว่า ไม่สามารถใช้เป็นเกณฑ์อ้างอิงในทางปฏิบัติได้ จึงเสนอการหาขนาดฝุ่นที่เหมาะสมที่ไซโคลน สามารถรวบรวมได้ที่ประสิทธิภาพ 50% ซึ่งเรียกว่า ขนาดตัด (Cut. Size) และยังเสนอวิธีการหาค่าความเร็วเส้นสัมผัสสูงสุด, U_{Tmax} ที่บริเวณกึ่งกลางของท่อทางออก โดยจะต้องทราบค่าความเร็วเฉลี่ยในการเคลื่อนที่เข้าสู่แนวศูนย์กลาง, U_{Rav} ก่อน (รูปที่ 14.a)

$$U_{Rav} = \frac{2Q}{\pi \cdot D_e \cdot (H - s)} \quad (40)$$

ปกติ ก๊าซจะมีแรงต้านทานต่อฝุ่น (Stokes' Law) จึงทำให้ขนาดตัด เท่ากับ

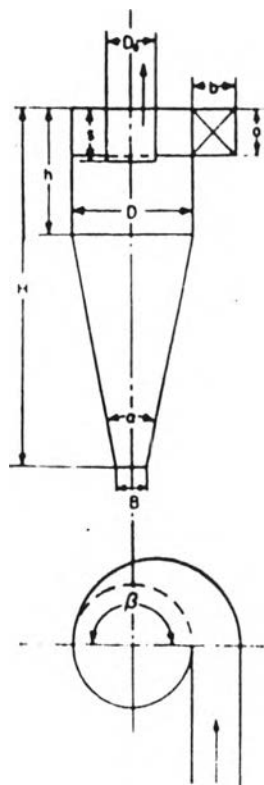
$$D_{Pc} = \frac{3}{U_I \cdot C} \cdot \sqrt{\frac{Q \cdot \mu \cdot D_e}{2\pi (\rho_s - \rho_f) (H - s) D}} \quad (41)$$

และความเร็วเส้นสัมผัสสูงสุด ตามสมมติฐานของ Stairmand เท่ากับ

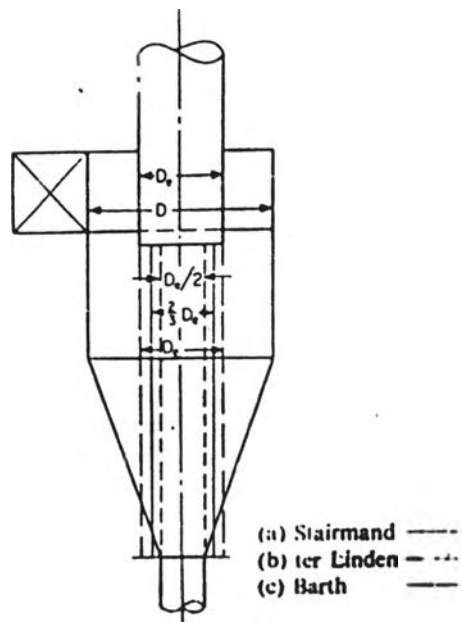
$$\frac{U_{Tmax}^2 \cdot D_e}{4} = \frac{U_I^2 \cdot D}{2} = \text{Constant} \quad (42)$$

ต่อมา Barth (1941) เสนอว่า ความเร็วเส้นสัมผัสสูงสุดควรเกิดขึ้นช่องที่ก๊าซไหลเวียนในท่อทางออก ทำให้ความเร็วเฉลี่ยของการเคลื่อนที่ (รูปที่ 14.c) เท่ากับ

$$U_{Rav} = \frac{Q}{\pi \cdot D_e (H - s)} \quad (43)$$



รูปที่ 18 - สัญลักษณ์ ของสัณฐานต่าง ๆ ของไฮโดรเจนที่ใช้ในการคำนวณ



รูปที่ 14 - แกนกลางตามสมมติฐานของ Stairmand, ter Linden และ Barth

ซึ่งขนาดตัดจะมีความเร็วเท่าความเร็วเฉลี่ยและสัมพันธ์กับความเร็วสูงสุดของการตกแบบอิสระของฝุ่นขนาดสมมูลย์ (Gravitational Settling Velocity, U_{t50}^*) ดังนั้น

$$U_{t50}^* = \frac{U_{Rav}}{n} = \frac{Q \cdot g}{2\pi \cdot (H - s) U_T^2} \quad (44)$$

สำหรับประสิทธิภาพในการเก็บฝุ่นขนาดอื่นๆ ที่ต่างออกไป สามารถอาศัย สมมติฐานของ Barth ซึ่งต้องทราบค่าความเร็วสูงสุดของการตกแบบอิสระของฝุ่นขนาดนั้นๆ ก่อน แล้วนำมาเทียบกับ U_{t50}^* (รูปที่ 15) จึงจะสามารถประเมินประสิทธิภาพของไซโคลนได้โดยคร่าวๆ

ter Linden (1942) ได้เสนอสมมติฐานให้ เส้นผ่านศูนย์กลางของฝุ่นขนาดวิกฤตมีความสัมพันธ์กับความเร็วเส้นสัมผัสและเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อทางออก ในรูปของ Fractional Curve (รูปที่ 16) ซึ่งมีค่าแปรตามสัดส่วนของไซโคลน (รูปที่ 12) ทำให้ขนาดวิกฤต เท่ากับ

$$D_c = 3 \sqrt{\frac{3D_e \cdot g \cdot \mu \cdot U_R}{3U_T^2 \cdot (\rho_s - \rho_f)}} \quad (45)$$

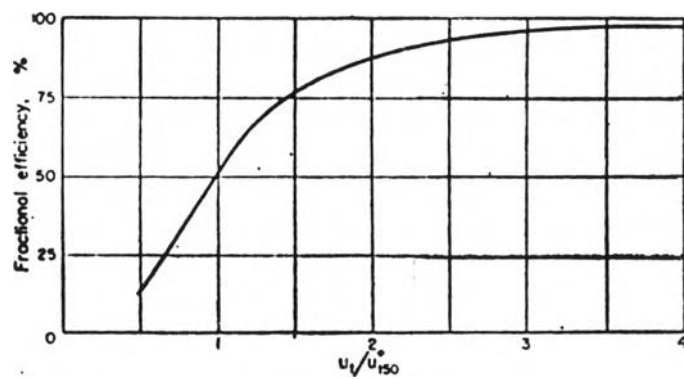
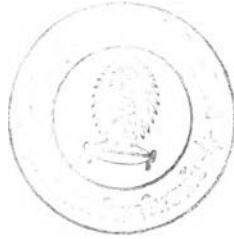
สมมติฐานนี้ กำหนดให้ U_{Tmax} เกิดบริเวณสองในสามของรัศมีท่อทางออก (รูปที่ 14.b) และความเร็วฝุ่นเนื่องจากแรงหนีศูนย์กลางจะเท่ากับความเร็วก๊าซที่ป้อนเข้า ทำให้ Fractional Curve คล้ายของ Barth แต่ ter Linden แสดงผลการทดสอบของไซโคลนเพียงชุดเดียวเท่านั้น (รูปที่ 16)

Stairmand (1945) ได้เสนอ Fractional Curve สำหรับไซโคลนสองชนิด ได้แก่ ไซโคลนชนิดประสิทธิภาพสูงและปานกลาง (รูปที่ 17) โดยใช้ไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 นิ้ว ความถ่วงจำเพาะของวัสดุทดสอบเท่ากับ 2 อุณหภูมิทดสอบ 20° C และความเร็วในการป้อนก๊าซ เท่ากับ 50 ฟุต/วินาที

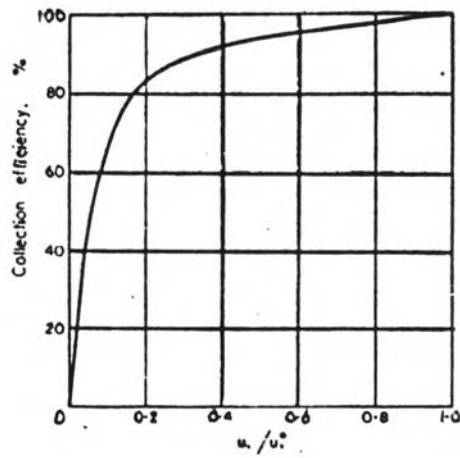
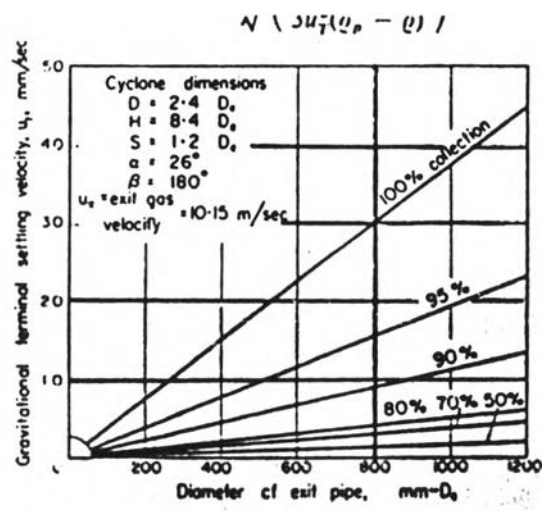
Stairmand ได้ช่วยสนับสนุนสมมติฐานของ ter Linden ที่กล่าวถึง การใช้ไซโคลนที่ช้ากว่าและท่อทางออกขนาดเล็กกว่าอัตราส่วนกำหนด จะทำให้ได้ประสิทธิภาพสูงขึ้นกว่า การใช้ท่อทางออกที่มีขนาดใหญ่ และสามารถใช้ Fractional Curve (รูปที่ 17) มาเป็นเกณฑ์ในการหาขนาดฝุ่น เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงตัวแปรอื่นในการทดสอบ เพื่อต้องการให้ได้ประสิทธิภาพการทำงานคงที่ ดังนี้:-

1. เมื่อเปลี่ยนความถ่วงจำเพาะของฝุ่น ขนาดฝุ่นที่ใช้ เท่ากับ

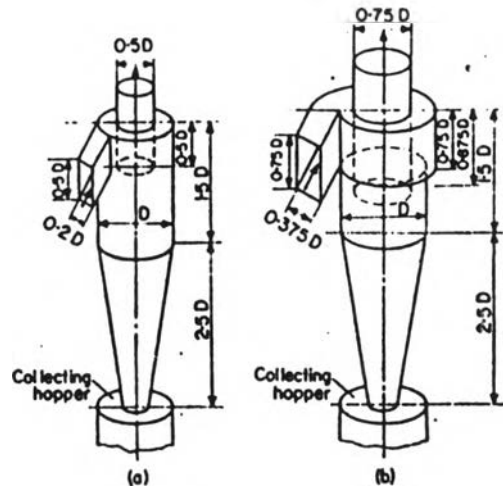
$$\sqrt{\text{ความถ่วงจำเพาะของฝุ่นมาตรฐาน}} \div \text{ความถ่วงจำเพาะของฝุ่นทดสอบ} \quad (46)$$



รูปที่ 15 - Fraction Curve โดยวิธีของ Barth



รูปที่ 16 - Fractional Curve โดยวิธีของ ter Linden



Standard cyclone designs (Stairmand).

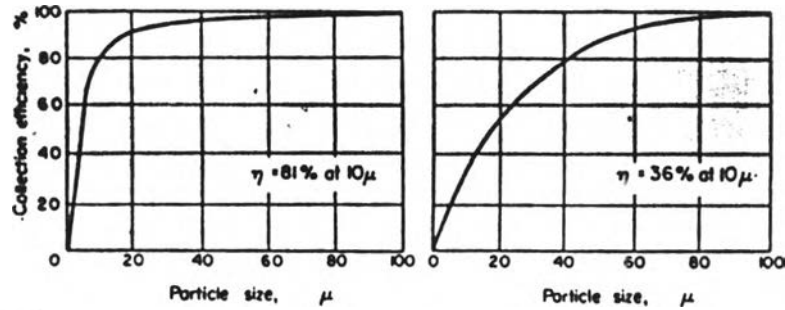
(a) High efficiency, medium throughput pattern.

Normal flow rate = $300D^3 \text{ ft}^3/\text{min}$.

(b) Medium efficiency, high throughput pattern.

Normal flow rate = $900D^3 \text{ ft}^3/\text{min}$.

Entrance velocity at these flows is approx. 50 ft/sec in both types.



Fractional efficiency curves.

(a) High efficiency cyclone

(b) High throughput cyclone

(Density of dust was 2.7 g/cm^3 .)

รูปที่ 17 - Fractional Curve ของ Stairmand

2. เมื่อเปลี่ยนปริมาณการไหล ขนาดพื้นที่ใช้ เท่ากับ

$$\sqrt{\frac{\text{ปริมาณการไหลมาตรฐาน} \div \text{ปริมาณการไหลที่ทดสอบ}}{\text{ความยาวมาตรฐาน}}} \quad (47)$$

3. เมื่อเปลี่ยนความเร็วของก๊าซ ขนาดพื้นที่ใช้ เท่ากับ

$$\sqrt{\frac{\text{ความเร็วที่ทดสอบ} \div \text{ความเร็วมาตรฐาน}}{\text{ความยาวมาตรฐาน}}} \quad (48)$$

4. เมื่อเปลี่ยนเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรเจน ขนาดพื้นที่ใช้ เท่ากับ

$$\sqrt{\frac{\text{เส้นผ่านศูนย์กลางที่ทดสอบ} \div \text{เส้นผ่านศูนย์กลางมาตรฐาน}}{\text{ความยาวมาตรฐาน}}} \quad (49)$$

นอกจากนี้ ความเข้มข้นของแผ่นจะมีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของไฮโดรเจนด้วย เพราะเมื่อเพิ่มอัตราการผลิตแผ่น แผ่นที่มีขนาดใหญ่จะมีโอกาสวิ่งเข้าปะทะผนัง, ปะทะกันเอง หรือ ปะทะกับแผ่นที่มีขนาดเล็กกว่า ทำให้การประเมินผลโดยความเข้มข้นของแผ่นมีโอกาสคลาดเคลื่อนได้ง่าย จึงไม่นิยมนำมาเกี่ยวข้องกับในการประเมิน

การประเมินความดันลดของไฮโดรเจน

การประเมินประเภทนี้ เป็นการประมาณค่าความดันลดที่เกิดขึ้นในไฮโดรเจน เพราะเกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ของพลังงาน (Power Consumption) , การกำหนดสัดส่วนต่างๆ ของไฮโดรเจน และการเลือกใช้พัดลม (Blower) ให้ได้ขนาดที่เหมาะสม ซึ่งทั่วไปสาเหตุการเกิดความดันลด จะเนื่องมาจาก

1. แรงเสียดทานในท่อทางเข้า
2. การสูญเสียจากการขยายและหดตัวของก๊าซที่ท่อทางเข้า
3. การสูญเสียจากแรงเสียดทานที่ผนังไฮโดรเจน
4. การสูญเสียพลังงานจลน์ในไฮโดรเจน
5. การสูญเสียบริเวณช่องทางเข้าของท่อทางออกก๊าซ
6. การสูญเสียความดันสถิตระหว่างท่อทางเข้าและออก
7. การเกิดพลังงานในท่อทางออก

ter Linden (1940) ได้เสนอสมมติฐานนิยามความดันลดจากการเกิด การสูญเสียพลังงานจลน์ของก๊าซในไฮโดรเจน ซึ่งหาค่าได้ในรูปฟังก์ชัน ของความเร็วก๊าซเข้า และสัมประสิทธิ์ความดันลด (Dimensionless Pressure Loss Factor, ζ) แสดงผลในรูปที่ 18 และ 18 ดังนี้

$$\Delta P = \frac{\zeta \cdot U_I^2 \cdot (p_s - p_f)}{g} \quad (50)$$

เมื่อ ΔP = ความดันลดที่เกิดขึ้นในไซโคลน

Barth (1940) ได้เสนอแนวทางการหาค่าความดันลด โดยพิจารณาจาก

1. ความดันลดที่ท่อทางเข้าและการสูญเสียบริเวณผนังไซโคลน
2. ความดันลดที่แนวก้นและบริเวณช่องทางเข้าของท่อทางออกก๊าซ

และ Barth ได้แปลง การหาค่าสัมประสิทธิ์ความดันลด, ζ ของ ter Linden ให้อยู่ในรูปของจำนวนของการสูญเสีย (Function of Loss Number, E) ซึ่งเท่ากับ

$$E = \frac{\zeta}{\left[\frac{ab}{\pi \cdot D_e^2} \right]^2 \cdot \left[\frac{U_{Tmax}}{U_0} \right]^2} \quad (51)$$

หรือ $E = E_i + E_o \quad (52)$

เมื่อ E_i = การสูญเสียที่ท่อทางเข้าและบริเวณผนังไซโคลน

E_o = การสูญเสียที่แนวก้นและบริเวณช่องทางเข้าของท่อทางออก

และ

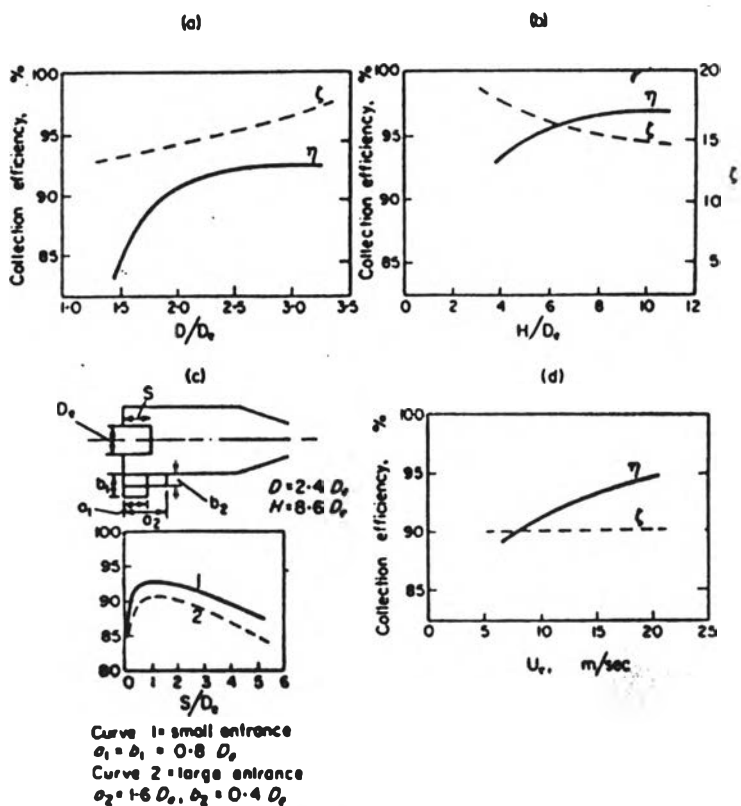
$$E_i = \frac{D_e}{D} \left[\frac{1}{\left[1 - \frac{2U_{Tmax} \cdot (H - s)\mu'}{U_0 \cdot D_e} \right]^2} - 1 \right] \quad (53)$$

เมื่อ

μ' = สัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างก๊าซและแนวก้น

ในกรณีที่

$$E_o = 1 + \frac{K}{\left[\frac{U_{Tmax}}{U_0} \right]^{2/3}} \quad (54)$$



Effect of variation of cyclone dimensions on efficiency and pressure loss factor ξ

- (a) Cyclone diameter.
- (b) Cyclone height.
- (c) Depth of exit pipe.
- (d) Entrance velocity.

รูปที่ 18 - การหาค่าความดันตกโดยวิธีของ ter Linden

เมื่อ

K = สัมประสิทธิ์ความดันลดของ Barth

นอกจากนี้ Barth ได้กำหนดอัตราส่วนของ U_{Tmax} / U_O ในรูปของสัดส่วนไฮโดรลิก, สัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทาน μ' และค่าแปรสของการสูญเสียของท่อทางเข้า (Entrance Design Loss Factor, α) ดังรายละเอียดในรูปที่ 19 ดังนี้

$$\frac{U_{Tmax}}{U_O} = \frac{\pi \cdot D_e \cdot (D - b)}{2ab\alpha + \pi \cdot (H - s) \cdot (D - b) \mu'} \quad (55)$$

Stairmand (1948) ได้เสนอสมมติฐานการหาค่าความดันลด โดยวัดการสูญเสียที่จุดต่างๆ ในไฮโดรลิก ในรูปของ Velocity Head ดังนี้

1. ที่ท่อทางเข้า เท่ากับ $U_I^2 \cdot (\rho_s + \rho_f) / 2g$
2. ที่ท่อทางออก เท่ากับ $U_O^2 \cdot (\rho_s + \rho_f) / 2g$
3. การสูญเสียที่เกิดขึ้นภายในไฮโดรลิก

การสูญเสียที่เกิดขึ้นบริเวณท่อทางเข้าและออก สามารถหาค่าความดันลดที่เกิดขึ้นได้จากระบบท่อ ในขณะที่ความดันลดที่เกิดภายในไฮโดรลิก จะเนื่องจากการที่แผ่นปะทะผนังและเกิดการสูญเสียพลังงานเฉลิ ซึ่ง Stairmand พบว่า จะมีค่าเป็นสองเท่าของผลต่างระหว่าง Velocity Head ที่ท่อทางเข้าและบริเวณรอบเกาะแผ่นในไฮโดรลิก ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$\frac{(\rho_s + \rho_f)(U_I^2 - U_{Tmax}^2)}{g} \quad (56)$$

นอกจากนี้ Stairmand ได้รวมค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานของผนัง (C) เข้าไว้ด้วย (รูปที่ 20) ซึ่งเท่ากับ

$$C = \frac{U_I'}{U_I} = \frac{\sqrt{\frac{D_e}{D - b}} + \sqrt{\frac{D_e}{2(D - b)} + \frac{2G \cdot A_s}{ab}}}{2GA_s / ab} \quad (57)$$

เมื่อ

- G = ค่าคงที่ของแรงเสียดทาน
 = 0.005 สำหรับไฮโดรลิกแห้ง

A_s = พื้นที่ผิวส่วนที่สัมผัสก๊าซของไซโคลน

ab = พื้นที่หน้าตัดของท่อทางเข้า

ฉะนั้น ความดันเกิดตามสมมติฐานของ Stairmand เท่ากับ

$$\Delta P = \frac{P_s + P_f}{2g} \cdot \left[U_I^2 \left\{ 1 + 2C^2 \left(\frac{2(D-b)}{D_e} \right) \right\} + 2U_0^2 \right] \quad (58)$$

ซึ่ง Stairmand ได้ทำการวิจัยผลของความดันเกิดที่ได้จากการทดสอบจริงกับการประเมินค่าต่างกันเพียงไม่เกินสิบเปอร์เซ็นต์เท่านั้น

ต่อมา Bhatia & Cheremisinoff (1974) ได้เสนอการคิดค่าความดันเกิดที่ก่เกิดขึ้นจากการใช้ไซโคลนบำบัดก๊าซ ซึ่งเท่ากับผลบวกของความดันเกิดเนื่องจากแรงหนีศูนย์กลางรวมกับความดันเกิดเนื่องจากพลังงานจลน์ที่ท่อทางเข้าและออก ได้แก่

1. ความดันเกิดเนื่องจากแรงหนีศูนย์กลาง เท่ากับ

$$\frac{P_f \cdot U_{O,T}^2}{g} - \frac{P_f \cdot U_{I,T}^2}{g} \quad (59)$$

2. ความดันเกิดเนื่องจากพลังงานจลน์ที่ท่อทางเข้า เท่ากับ $P_f \cdot U_I^2 / 2g$ (60)

3. ความดันเกิดเนื่องจากพลังงานจลน์ที่ท่อทางออก เท่ากับ $\alpha \cdot P_f \cdot U_O^2 / 2g$ (61)

เมื่อ

α = ค่าคงที่ของท่อทางออก ซึ่งเท่ากับ 2

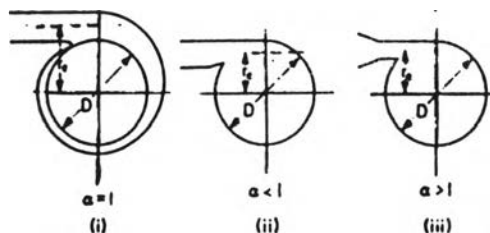
ดังนั้น ความดันเกิดที่เกิดขึ้นทั้งหมดในไซโคลน/ ΔP (ปอนด์/ฟุต²) จะเท่ากับ

$$\Delta P = 0.000217 P_f \left[U_{O,T}^2 - U_{I,T}^2 + U_O^2 + \frac{U_I^2}{2} \right] \quad (62)$$

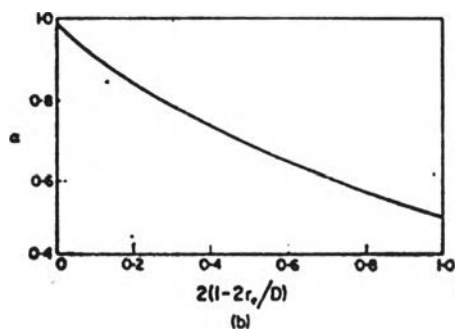
2.5 การออกแบบส่วนประกอบต่างๆ ของไซโคลนที่มีผลต่อสมรรถนะ

(Design Factors of Cyclone affecting Performance)

การออกแบบไซโคลนให้ได้ขนาดที่เหมาะสมและมีสัดส่วนที่ถูกต้อง จะช่วยให้ไซโคลนมีสมรรถนะสูงสามารถที่จะจับเก็บฝุ่นได้ในปริมาณมาก ซึ่งส่วนประกอบแต่ละส่วนที่จะต้องนำมาพิจารณาในรายละเอียด ได้แก่

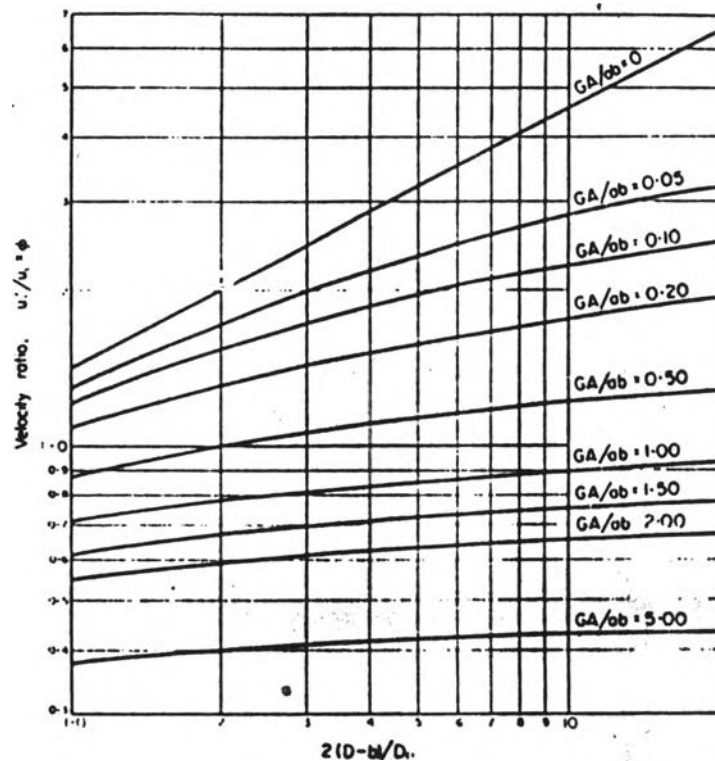


Entrance designs (a)



(a) Alternative cyclone entry designs for loss factor calculations.
 (b) Values of loss factor α for pattern (ii) when $\alpha < 1$.³³

รูปที่ 19 - การหาค่าของ Design Loss Factor, α โดยวิธีของ Barth



Curves for friction loss factor γ against entrance radius ratio for different cyclones.

- h depth of entrance pipe.
- h width of entrance pipe.
- D cyclone diameter.
- D_r cyclone exit pipe diameter.
- A internal surface area of cyclone.
- G friction factor 0.005 (assumed constant).
- γ friction loss factor.

รูปที่ 20 - การหาค่าของ Friction Loss Factor, γ โดยวิธีของ Stairmand

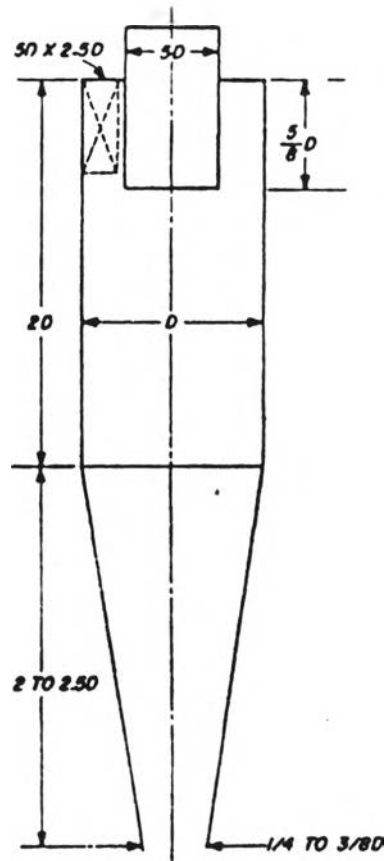
- ก. เส้นผ่านศูนย์กลางและสัดส่วนทั้งหมดของไซโคลน
(Diameter & Dimension Ratio)
- ข. ขนาดกรวยไซโคลน
(Cone Size)
- ค. ท่อทางเข้าก๊าซ
(Gas Inlet)
- ง. ท่อทางออกก๊าซ
(Gas Outlet)
- จ. การปล่อยฝุ่น
(Dust Discharge)
- ฉ. ผลกระทบของผิวภายในที่ไม่เรียบ
(Effect of Internal Roughness)

2.5.1 เส้นผ่านศูนย์กลางและสัดส่วนทั้งหมดของไซโคลน

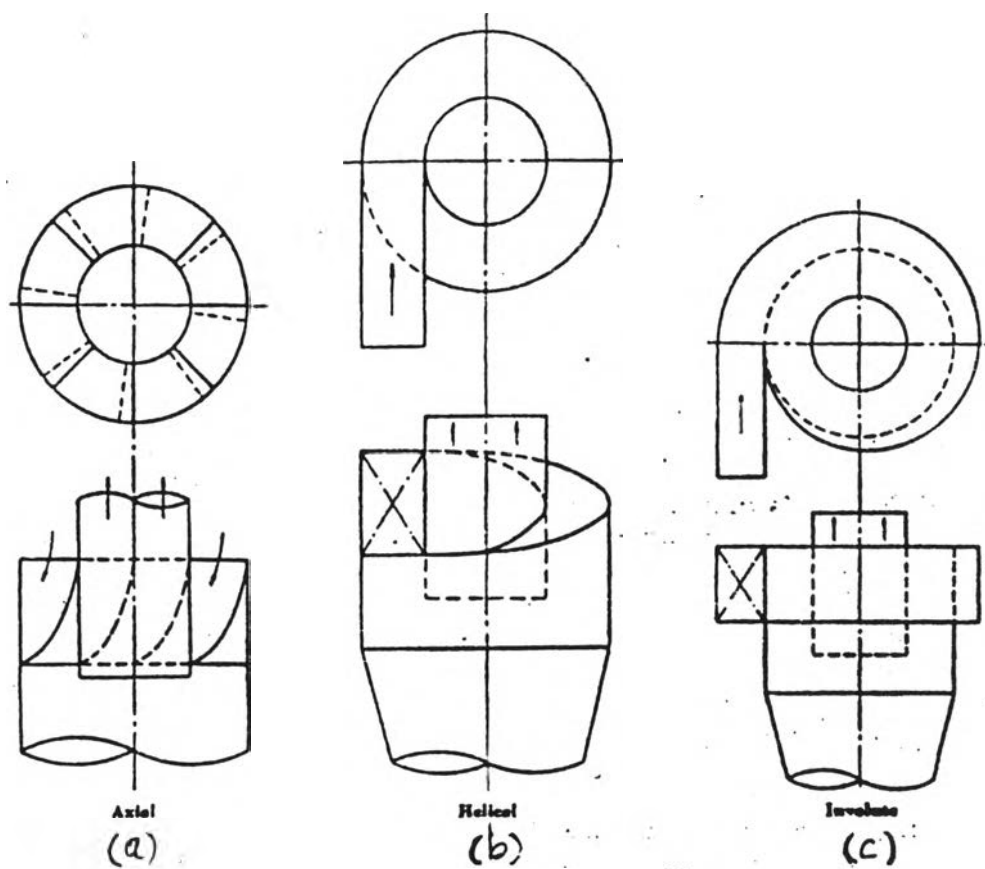
ไซโคลนต่างๆ ไป มีขนาดและสัดส่วนที่แน่นอน (รูปที่ 21) ซึ่งมิติต่างๆ ทั้งหมดขึ้นอยู่กับ การกำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกระบอกเป็นหลัก ทำให้การเพิ่มหรือลดขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางไซโคลน จะมีผลกระทบต่อขนาดและสัดส่วนตลอดจนสมรรถนะของไซโคลนด้วย

Leithe (1971) ได้เสนอสรุปผลการเก็บตัวอย่างของการเพิ่มอัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางไซโคลนต่อขนาดของท่อทางออกก๊าซว่า เป็นการเพิ่มสมรรถนะขึ้นจากเดิมถึงประมาณ 3 เท่า และยังทำให้ความดันลดมีค่าลดลงด้วย หรือ การเพิ่มความยาวไซโคลน เป็นการช่วยเพิ่มสมรรถนะเพราะ ทำให้ก๊าซมีเวลาในการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้นและเป็นการเพิ่มจำนวนรอบในการไหลวน เวียน ซึ่งฝุ่นจะมีโอกาสปะทะผนังเพิ่มขึ้น

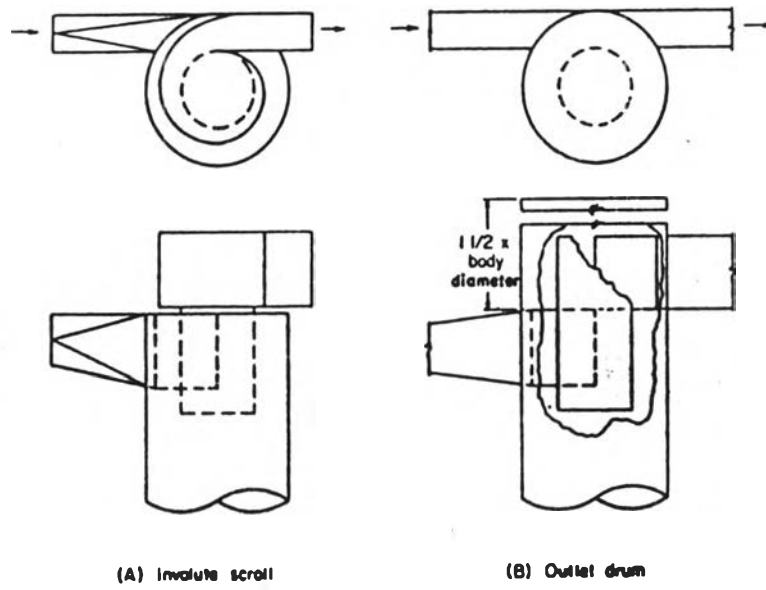
ความยาวของไซโคลนที่เหมาะสม จะประมาณ 4 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางไซโคลน การเปลี่ยนแปลงขนาดให้ต่างออกไป ไม่ควรกระทำให้สั้นกว่า 2.5 เท่า หรือยาวเกินกว่า 6 เท่า และที่สำคัญคือ ต้องให้ระดับของท่อทางเข้าก๊าซอยู่สูงกว่าปลายของท่อทางออกก๊าซที่ขึ้นเข้าภายในไซโคลนเสมอ



รูปที่ 21 - รูปร่างและสัดส่วนของไฮโดรลิกคอลัมน์ทั่ว ๆ ไป



รูปที่ 22 - ท่อทางเข้าเกียร์แบบต่าง ๆ ที่ใช้



(A) Invalute scroll

(B) Outlet drum

รูปที่ 23 - รูปร่างท่อทางออกก๊าศที่ใช้

2.5.2 ขนาดกรวยไซโคลน

ขนาดกรวยไซโคลน จะต้องมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฮอดกรวยมากกว่า $1/4$ ของเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกระบอก เพราะวอร์เทคหลักที่ก่อตั้งขึ้นจะเป็นเส้นโค้ง ซึ่งมีจุด eccentric ของแกนอยู่ที่ $1/4$ ของเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกระบอก ฉะนั้นถ้าลดขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของฮอดกรวยลง วอร์เทคหลักที่ไหลเวียนลงมาจะเข้าปะทะผนังไซโคลนและดึงเอาฝุ่นมาจับเข้าสู่วิถีโคจร ผ่านออกไซโคลนทางวอร์เทคชั้นในและท่อทางออกก๊าซต่อไป

2.5.3 ท่อทางเข้าก๊าซ

ท่อทางเข้าก๊าซใช้เพื่อเพิ่มความเร็วที่ป้อนเข้า เพื่อรักษาการผสมผสานกันของก๊าซ ที่กำลังไหลเข้ากับที่ไหลวนเวียนอยู่ภายในแล้ว ปกตินิยมใช้ท่อกลม ยกเว้นบริเวณที่ต้องการอัตราส่วนความสูงของไซโคลนต่อความกว้างถูกต้องยิ่งขึ้น จึงจะตัดแปลงเป็นท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้า และการตัดแปลงจะใช้วิธีการเพิ่มขนาดหน้าตัดชั้นที่ละน้อย ให้มุมยกไม่เกิน 15° เพื่อช่วยลดการสูญเสียจากการเปลี่ยนแปลงหน้าตัดอย่างเฉียบพลัน (Shock Losses)

การจัดวางแนวท่อทางเข้า มีผลต่อสมรรถนะและความดันตกเป็นอย่างมาก (รูปที่ 22) ซึ่งถ้าจัดวางให้อยู่ในแนวแกน (รูปที่ 22.a) ความดันตกที่เกิดขึ้นจะมีค่าสูงมาก การผสมผสานกันของฝุ่นในท่อทางเข้าและออกเป็นไปได้ง่าย ทำให้สมรรถนะที่ได้ต่ำ หรือ การต่อแบบให้แนวท่อเบนลงจากแนวระดับสู่แนวตั้ง (รูปที่ 22.b) สมรรถนะและความดันตกจะเพิ่มมากขึ้นด้วย ซึ่งต่างจากการต่อแนวท่อทางเข้าที่ต่อในแนวราบให้ตั้งฉากกับแกนของไซโคลนในแนวตั้ง (รูปที่ 22c.) จะช่วยเพิ่มสมรรถนะให้สูงขึ้น และลดค่าของความดันตกที่เกิดขึ้นให้ต่ำลงด้วย

2.5.4 ท่อทางออกก๊าซ

ท่อทางออกก๊าซใช้เพื่อช่วยระบายก๊าซออกจากไซโคลนทางด้านบน ซึ่งการออกแบบที่ดีจำเป็นต้องให้ท่อสามารถกำจัดพลังงานและความดันตกของก๊าซให้หมดก่อนที่จะถูกปล่อยออกวิธีที่ได้ผลดีที่สุด (รูปที่ 23) ได้แก่ การติดตั้งท่อทางออกให้ปลายท่ออยู่ในแนวเดีวกับกับปลายของท่อนำก๊าซเข้า (Involute Scroll) หรือ ทำช่องกักก๊าซตอนบน (Outlet Drum)

การทำ Involute Scroll เป็นการทำวนท่อเป็นกรอบทรงกลม เพื่อก๊าซที่ชนด้วยความเร็วสูงสามารถเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์มาเป็นความดันสถิตได้ ส่วนการทำ Outlet Drum เป็นการออกแบบช่องกักก๊าซตอนบนให้สามารถเปลี่ยนแปลงการไหลจากแบบวอร์เทค เป็นแบบเส้นตรงได้ (Linear Flow) และนอกจากนี้แล้ว ท่อทางออกทั้งสองชนิด ยังมีส่วนในการช่วยลดความดันตก

ลงอีกประมาณ 5 - 10 % โดยไม่มีผลกระทบต่อสมรรถนะของไซโคลน

2.5.5 การปล่อยฝุ่น

การปล่อยฝุ่น จะต้องระบายออกจากไซโคลนให้เร็วที่สุดและเป็นไปอย่างต่อเนื่อง วิธีที่ง่ายที่สุดได้แก่ การใช้ภาชนะรองรับฝุ่นติดตั้งที่ปลายสุดของไซโคลน แต่มีกประสบบัญหาการไหลย้อนกลับ เพราะภายในภาชนะเกิดวอร์เทคได้เหมือนในแนวแกนไซโคลน ฝุ่นจึงสามารถไหลย้อนกลับ (Upflow) ขึ้นสู่ไซโคลนได้อีก

การป้องกันการไหลย้อนกลับ อาศัยการต่อท่อโดยตรงจากภาชนะรองรับ เข้าทางขอดกรวยไซโคลน หรือการติดตั้งแผ่นดักฝุ่น (Baffles) เทนชันไปในไซโคลน ประมาณ 2 เท่า ของเส้นผ่านศูนย์กลางขอดกรวย และเว้นระยะให้ปลายแผ่นดักห่างจากผนังราว 3 นิ้ว จะช่วยลดการไหลย้อนกลับได้ นอกจากนี้ การใช้วาล์ว สามารถป้องกันได้เช่นกัน เพราะไซโคลนทุกๆ ไป จะปรากฏ Negative Pressure ที่บริเวณปลายไซโคลน ทำให้การติดตั้ง Rotary Valve สามารถช่วยปิดกั้นการไหลย้อนกลับได้ แต่ถ้าแรงดันมีค่าสูงจำเป็นต้องอาศัย Rotary Valve ถึงสองตัวช่วย หรือการติดตั้งระบบลำเลียงแบบสกรู (Skew conveyor) สามารถทำหน้าที่เป็นวาล์วปิดกั้นได้ด้วย

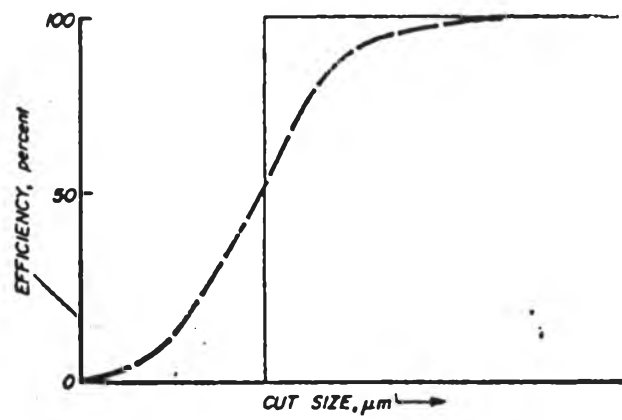
2.5.6 ผลกระทบของพินภายในที่ไม่เรียบ

การใช้พินภายในไม่เรียบ ไม่มีผลต่อความดันลดของไซโคลน เพราะความดันลดเกี่ยวข้องกับ การเกิดวอร์เทคและการออกแบบขนาดท่อทางออก แต่เป็นการช่วยเพิ่มพื้นที่พินภายใน ทำให้เพิ่มโอกาสการเกิดกระแสสวirl (Eddy Flow) และแรงเสียดทานระหว่างผนังมากขึ้น ซึ่งเป็นผลให้ความเข้มข้นของฝุ่นในวอร์เทคหลักและสมรรถนะของไซโคลนลดลง

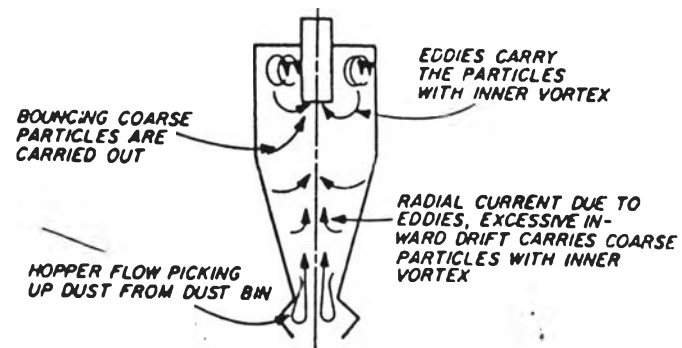
2.6 ตัวแปรที่มีผลต่อสมรรถนะไซโคลน (Factors affecting Performance)

ตัวแปรเหล่านี้ เป็นตัวแปรทางกายภาพที่มีผลต่อประสิทธิภาพและความดันลดที่เกิดขึ้นในไซโคลน ซึ่งได้แก่

1. ผลกระทบทุติยภูมิ (Secondary Effects)
2. สัดส่วนของไซโคลน (Proportional Dimensions)
3. คุณสมบัติทางกายภาพ (Physical properties)
4. ตัวแปรต่างๆ ในขบวนการ (Process Variables)



รูปที่ 24 - Fractional Curve ของไซโคลนในทางทฤษฎี



รูปที่ 25 - ผลกระทบที่ขึ้นอยู่กับความถี่ต่อการเสถียรภาพในการเก็บฝุ่น

2.6.1 ผลกระทบทุติยภูมิ

ในทางปฏิบัติ ประสิทธิภาพที่ได้จะแตกต่างไปจากที่ประมาณค่าได้ในทางทฤษฎี (รูปที่ 24) เนื่องจากผลกระทบทุติยภูมิ ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในขณะไฮโดรลิกทำงาน (รูปที่ 25) ได้แก่

1. การไหลของฝุ่นจากท่อนำก๊าซเข้า ม้วนเข้าสู่แกนวอร์เทค
2. การไหลย้อนของฝุ่นจากที่รองรับฝุ่นด้านล่างเข้าสู่แกนวอร์เทค
3. การเกิดกระแสไหลวนภายในไฮโดรลิก
4. การกระเด็นของฝุ่นเข้าสู่แกนวอร์เทคเนื่องจากแรงหนีศูนย์กลางมีค่าสูง

2.6.2 สัดส่วนของไฮโดรลิก

ไฮโดรลิกโดยทั่วไป มีรูปร่างและสัดส่วนที่แน่นอน (รูปที่ 21) การเปลี่ยนแปลงสัดส่วนใดๆ จะมีผลต่อสมรรถนะไฮโดรลิก (ตารางที่ 5)

2.6.3 คุณสมบัติของกายภาพ

Bhatiat Cheremisinoff (1974) ได้เสนอผลการทดสอบที่ช่วยสนับสนุนการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของฝุ่น ไหลผ่านไฮโดรลิก ที่มีผลต่อสมรรถนะของไฮโดรลิก (รูปที่ 26) ได้แก่

1. การเปลี่ยนแปลงความถ่วงจำเพาะของก๊าซ
2. การเปลี่ยนแปลงขนาดของฝุ่น
3. การเปลี่ยนแปลงความหนืดของก๊าซที่ไหล

2.6.4 การเปลี่ยนแปลงตัวแปรต่างๆ ในระบบทวน

Bhatia & Cheremisinoff (1974) ได้เสนอสมมติฐานกล่าวถึง การเปลี่ยนแปลงตัวแปรต่างๆ ในขบวนการทำงานของไฮโดรลิก เช่น ความเร็วของก๊าซ, อุณหภูมิ, อัตราการป้อนก๊าซ ฯลฯ จะมีผลต่อสมรรถนะของไฮโดรลิก (ตารางที่ 4 และรูปที่ 27) และยังได้เสนอสูตรการหาค่าของประสิทธิภาพและความดันตกที่เกิดขึ้นใหม่ ดังนี้

$$\Delta P_2 = \frac{\Delta P_1}{0.013(C_I + 1)^{0.5}}$$

เมื่อ

$$P_2 = \text{ความดันตกที่เกิดขึ้นใหม่, ปอนด์/ฟุต}^2$$

$$P_1 = \text{ความดันตกของก๊าซเดิม, ปอนด์/ฟุต}^2$$

$$C_1 = \text{ความเข้มข้นของฝุ่นที่ป้อนเข้า, เกรม/ฟุต}^3$$

และ

$$\frac{100 - \eta_a}{100 - \eta_b} = \left(\frac{C_{bI}}{C_{aI}} \right)^{0.182}$$

เมื่อ

$$\eta = \text{ประสิทธิภาพที่สภาวะ } a + b \text{ ตามลำดับ}$$

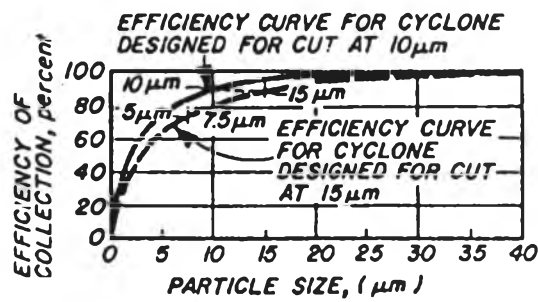
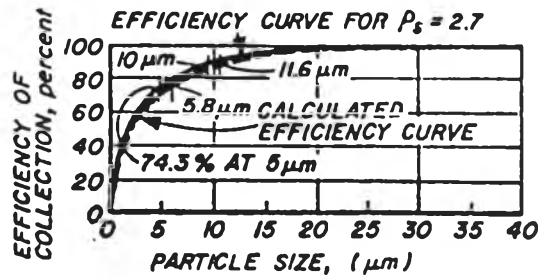
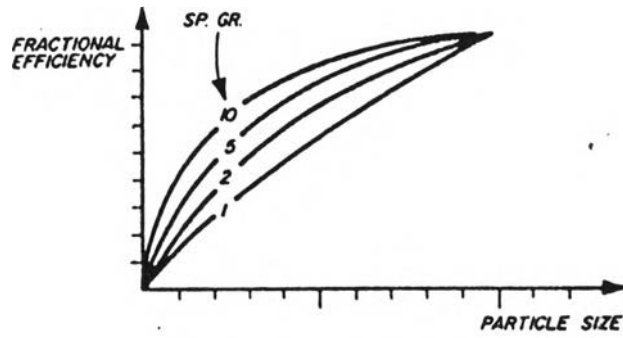
$$C_1 = \text{ความเข้มข้นของฝุ่นที่สภาวะทดสอบ } a + b, \text{ เกรม/ฟุต}^3$$

ตารางที่ 4 - แสดงผลของการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนใด ๆ ของไซโคลนต่อสมรรถนะ

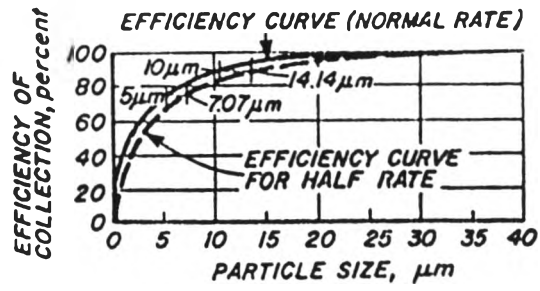
Proportional change	Performance trend		Cost trend
	Pressure loss	Efficiency	
Increase cyclone size	Down	Down	Up
Lengthen cylinder	Slightly lower	Up	Up
Increase inlet area - maintain volume	Down	Down	-
Increase inlet area - maintain velocity	Up	Down	Down
Lengthen cone	Slightly lower	Up	Up
Increase size of cone opening	Slightly lower	Up or down	-
Decrease size of cone opening	Slightly higher	Up or down	-
Lengthen clean gas out- let pipe internally	Up	Up and/or down	Up
Increase clean gas out- let pipe diameter	Down	Down	Up ✓

ที่มา

- Bhatia and Cheremisinoff,



รูปที่ 28 - การเปลี่ยนแปลงตัวแปรทางกายภาพที่มีผลต่อสมรรถนะไซโคลน



รูปที่ 27 - ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนก๊าซต่อสมรรถนะของไซโคลน