

## บทที่ 3

### ทฤษฎี

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำให้อากาศสะอาดที่มีใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมมีหลายชนิดแต่ละชนิดจะมีประสิทธิภาพและความเหมาะสมที่จะใช้งานแตกต่างกันออกไป โดยทั่วไปแล้วจะแบ่งอุปกรณ์ดังกล่าวเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆดังนี้ ประเภทที่ต้องใช้ของเหลวเป็นตัวกลาง เช่นเครื่องดักเก็บอนุภาคแบบเปียก(Wet Scrubber) และประเภทที่ไม่ต้องใช้ของเหลวเป็นตัวกลางในการดักเก็บอนุภาค เช่น เครื่องดักเก็บอนุภาคแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางหรือไซโคลน(Cyclone) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่นิยมใช้กันทั่วไปในงานอุตสาหกรรม ทั้งนี้เพราะว่ามีต้นทุนในการสร้างต่ำ และมีการบำรุงรักษาง่าย

#### 3.1 หลักการทำงานของไซโคลน

ไซโคลนมีหลักการทำงานโดยอาศัยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง(Centrifugal Force)เป็นกลไกหลักในการเก็บอนุภาคของเครื่องเก็บฝุ่นแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง การหมุนของแก๊สทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ด้วยแรงเฉื่อย(Inertia Force) และโมเมนตัม(Momentum)เข้าหาผนังของเครื่องแยกแล้วตกสู่ที่สำหรับรองรับอนุภาค(Hopper) แก๊สที่ถูกป้อนเข้าไซโคลนสามารถไหลเข้าได้ทั้งในแนวสัมผัส หรือไหลเข้าตามแนวแกน โดยที่ตัวเครื่องแยกจะมีลักษณะเป็นกรวยที่ตั้งเอียงอดแหลมลง ที่บริเวณกลางของฝาบนมีท่อ เรียกว่าท่อจับ(Vortex Finder) ติดอยู่ แก๊สที่ไหลผ่านเข้าไปในช่วงแรกจะเคลื่อนที่ลงไปตามกรวยโดยอนุภาคจะตกลงไปในที่รองรับ(Hopper) ด้านล่าง ส่วนอากาศที่สะอาดจะถูกดูดกลับขึ้นไปตามท่อเพื่อออกสู่บรรยากาศ

##### 3.1.1 ลักษณะการไหลในไซโคลน

ลักษณะการไหลในไซโคลนที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้เป็นแบบแก๊สไหลเข้าในแนวสัมผัสและอนุภาคออกในแนวแกน(Tangential Inlet, Axial Discharge) ซึ่ง Stairmand ได้แบ่งประเภทของไซโคลนแบบนี้เป็น 2 ประเภทดังรูปที่3.1

ไซโคลนในรูปที่3.1(a) และรูปที่3.1(b) มีการไหลที่เหมือนกันคือแก๊สที่ไหลเข้าในแนวสัมผัสสัมผัสใกล้ด้านบนของตัวทรงกระบอกจะชักน้ำให้เกิดการหมุนวน(Vortex) หรือการไหลวนแบบ

กั้นหอยระหว่างผนังของไซโคลนและผนังของท่อทางออกของแก๊ส ในลักษณะที่หมุนลงข้างล่าง การหมุนวนนี้จะกลับทิศทางการเคลื่อนที่ในแนวแกนจากเคลื่อนที่ลงเป็นเคลื่อนที่ขึ้น โดยที่ยังคงไว้ซึ่งการไหลหมุนวน นั่นคือจะเปลี่ยนเป็นการหมุนวนแบบบังคับ (Force Vortex) ซึ่งเปรียบเสมือนการหมุนตัวของของแข็งอยู่ระหว่างประมาณครึ่งหนึ่งของรัศมีของท่อทางออกของแก๊สกับใจกลางของทางออก การหมุนวนด้านในนี้จะเป็ย่านความดันต่ำ และมีชื่อเรียกว่าแกน (Core) รูปที่ 3.2 แสดงลักษณะการไหลหมุนวนและการไหลวน (Eddy Flow) ภายในไซโคลนแบบแก๊สไหลเข้าในแนวสัมผัส, อนุภาคออกในแนวแกน

$$v_t = v_{tp} \left( R / R_{tp} \right)^n$$

เมื่อ

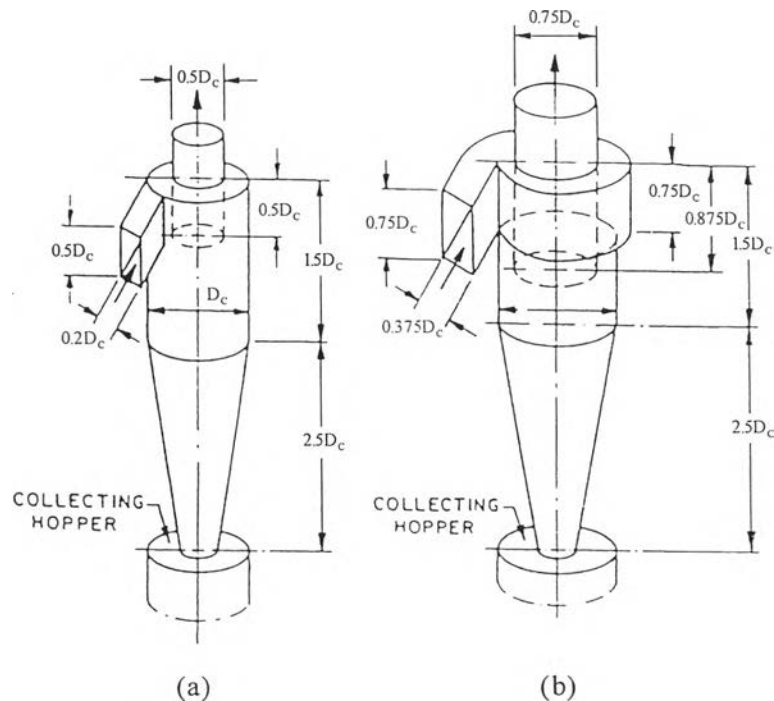
R = รัศมีของตัวไซโคลน

$R_{tp}$  = รัศมีการหมุนวนของอนุภาค

$v_t$  = ความเร็วของแก๊สในแนวสัมผัสกับอนุภาคที่รัศมี  $R_{tp}$

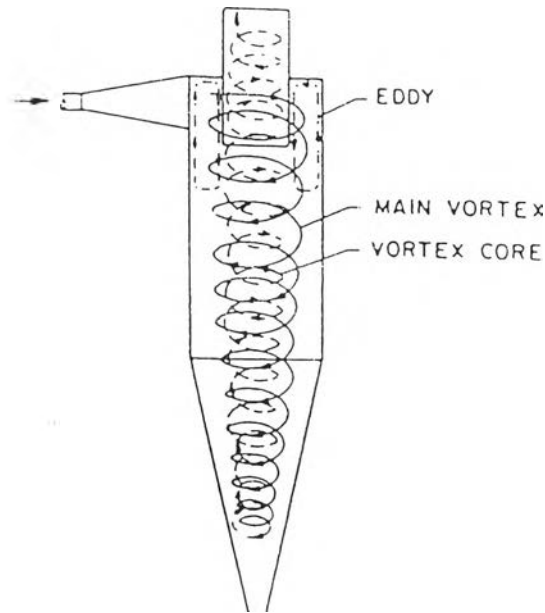
$v_{tp}$  = ความเร็วของแก๊สในแนวสัมผัสกับผนังของไซโคลนที่รัศมี R (ผนังของตัวไซโคลน)

n = ตัวเลขยกกำลัง (Vortex exponent)



รูปที่ 3.1 แสดงรูปแบบไซโคลนของ Stairmand (a) high efficiency, medium throughput (b) medium efficiency, high throughput<sup>(5)</sup>

ในกรณีของ  $n = 1$  จะเป็นกรณีของการหมุนวนอิสระ(Free Vortex) ซึ่งไม่มีการสูญเสียความดัน กรณีที่  $0 < n < 1$  เรียกว่า การหมุนวนแบบกึ่งอิสระ(Semi-Free Vortex) หรือกรณีที่ของไหลเป็นของไหลจริง(Real Gas)แต่ในทางปฏิบัติแล้ว  $n$  ของการหมุนวนกึ่งอิสระในไซโคลนจะมีค่าระหว่าง 0.5 ถึง 0.8 ส่วนกรณี  $n = -1$  เรียกว่าการหมุนวนแบบบังคับ



รูปที่ 3.2 แสดงลักษณะการหมุนวน

นอกจากการหมุนวนในรูปที่ 3.2 แล้วยังมีการไหลขึ้นของแก๊สเฉียบผนังส่วนบนของทรงกระบอก แก๊สที่ไหลเฉียบผนังด้านนอกของท่อทางออกของแก๊ส การไหลนี้เรียกว่าการไหลวน(Eddy Flow)ระหว่างที่แก๊สไหลเฉียบลงผ่านขอบล่างของท่อทางออก อนุภาคอาจติดไปกับแก๊สออกจากไซโคลนได้ ถ้าท่อทางออกของแก๊สยังลึกเข้าไปในทรงกระบอกมากเท่าไรก็จะเกิดการไหลวนที่รุนแรงมากขึ้นซึ่งมีผลกระทบต่อแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางของอนุภาคและประสิทธิภาพการดักเก็บของอนุภาคด้วย<sup>(6)</sup>

### 3.1.2 การแยกอนุภาคในแก๊สที่เกิดจากการหมุนวน

อนุภาคจะถูกแยกออกจากแก๊สโดยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางซึ่งจะบังคับให้อนุภาคเคลื่อนตามเส้นทางการไหลของแก๊สไปยังผนังของไซโคลน แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่กระทำต่ออนุภาค

$$F_c = \frac{mv_p^2}{r}$$

เมื่อ

$F_C$  = แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางของอนุภาค, N

$m$  = มวลของอนุภาค, kg

$v_t$  = ความเร็วของแก๊สในแนวสัมผัสกับอนุภาคที่รัศมี  $R_{tp}$ , m / s

$r$  = รัศมีการหมุนวนของอนุภาค, m

ถ้าคิดว่าความเร็วของแก๊สในแนวสัมผัสกับอนุภาคมีค่าเท่ากับความเร็วของแก๊สในแนวเส้นสัมผัสกับผนังของไซโคลอน (นั่นคือ  $v_{tp} = v_p$ ) และพิจารณาว่าอนุภาคเป็นทรงกลมดั่งนั้น

$$m = \rho_p \left( \frac{d_p^3 \pi}{6} \right)$$

เมื่อ

$\rho_p$  = ความหนาแน่นของอนุภาค, kg / m<sup>3</sup>

$d_p$  = เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค, m

ดั่งนั้นแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่กระทำต่ออนุภาคเมื่ออนุภาคนั้นเป็นทรงกลมคือ

$$F_C = \frac{\pi \rho_p d_p^3 v_{tp}^2 R^{2n}}{6 R_{tp}^{(2n+1)}}$$

เมื่ออนุภาคถูกทำให้เกิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางเพื่อใช้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางแยกอนุภาคนั้นออกจากแก๊สที่เกิดจากการหมุนวน ขณะเดียวกันอนุภาคก็จะมีแรงต้านทานการเคลื่อนที่ของอนุภาคผ่านกระแสแก๊สเข้าไปยังผนังของไซโคลอน ซึ่งสามารถแสดงในรูปของสมการโดยใช้กฎของสโตกส์(Stoke's Law) ดังสมการ

$$F = 3\pi\mu d_p \bar{u}_r$$

เมื่อ

$F$  = แรงต้านทานการเคลื่อนที่ของอนุภาคในแนวรัศมี, N

$\mu$  = ความหนืดของแก๊ส, kg / (m · s)

$\bar{u}_r$  = ความเร็วสัมพัทธ์ในแนวรัศมีระหว่างอนุภาคกับแก๊ส, m / s

จากสมการข้างต้นจะพบว่าแรงที่ใช้สำหรับแยกอนุภาคจะเพิ่มขึ้นตามเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคยกกำลังสามแต่แรงต้านทานการเคลื่อนที่ของอนุภาคไปยังผนังของไซโคลอนจะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค ดั่งนั้นไซโคลอนจึงสามารถแยกอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ได้ดี อนุภาคที่มีขนาดใหญ่ที่วิ่งไปยังผนังไซโคลอนจะตกลงเลียบผนังด้วยแรงโน้มถ่วง

ของโลกไปยังที่รองรับด้านล่างของไซโคลน ในทางปฏิบัติอนุภาคที่วิ่งเข้าหาตัวไซโคลนจะกระจายตลอดเต็มพื้นที่หน้าตัดบริเวณทางเข้าของไซโคลนเพราะฉะนั้นรัศมีของการหมุนวน (Radius Vortex) ความเร็วในแนวสัมผัส (Tangential Velocity) และระยะห่างจากผนังไซโคลนของอนุภาคที่เข้ามาจะมีค่าต่าง ๆ กันด้วยเหตุนี้ไซโคลนจึงเป็นเครื่องแยกอนุภาค (Classifier) อย่างหยาบ

### 3.2 ประสิทธิภาพของไซโคลน (Cyclone Performance)

ประสิทธิภาพการทำงานของไซโคลน หมายถึง ความสามารถของไซโคลนในการดักเก็บอนุภาคที่แขวนลอยอยู่ในแก๊ส โดยทั่วไปแล้วอนุภาคที่มีอยู่ในแก๊สที่ได้จากการเผาไหม้นั้นจะมีขนาดต่าง ๆ กัน การเก็บอนุภาคที่มีขนาดใหญ่หรือหยาบจะสามารถทำได้ง่ายกว่าอนุภาคที่มีขนาดเล็กหรือละเอียด ในการประมาณค่าประสิทธิภาพของไซโคลนให้มีความแม่นยำกับความเป็นจริงมากที่สุดจึงจำเป็นต้องคำนวณประสิทธิภาพย่อย ในแต่ละช่วงขนาดของอนุภาค เช่น 5-10  $\mu\text{m}$  มีชื่อเรียกว่าประสิทธิภาพย่อย (Fraction or Grade Efficiency) สำหรับอนุภาคที่ช่วงขนาด  $i$ , แล้วนำไปหาประสิทธิภาพรวม

$$\eta_T = \sum_{i=1}^n m_i \eta_i \quad (3-1)$$

เมื่อ

$\eta_T$  = ประสิทธิภาพการทำงานรวมของไซโคลน, %

$\eta_i$  = ประสิทธิภาพย่อย, %

$m_i$  = สัดส่วนมวล

=  $\frac{\text{ปริมาณของอนุภาคที่ไซโคลนดักเก็บได้ในช่วงขนาด } i \text{ ของอนุภาค}}{\text{ปริมาณของอนุภาคทั้งหมดที่ทางเข้าไซโคลน}}$

การหาประสิทธิภาพย่อย (Grade or Fraction Efficiency) ของไซโคลนสมการที่นำมาคำนวณหาประสิทธิภาพย่อยมีหลายสมการ แต่สมการที่นิยมใช้กันคือสมการของ Leith and Licht<sup>(7)</sup> เนื่องจากให้ผลที่ได้จากการคำนวณใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลอง โดยตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพย่อยคือ สภาวะเข้าไซโคลน ได้แก่ อุณหภูมิเข้าไซโคลน อัตราการไหลเชิงปริมาตร และคุณสมบัติของอนุภาคที่ปนอยู่ในแก๊สก่อนที่จะเข้าไซโคลน ได้แก่ ความหนาแน่นของอนุภาค การกระจายของอนุภาค สมการหาประสิทธิภาพย่อยของ Leith and Licht คือ

$$\eta_i = 1 - \exp \left\{ -2 \left[ \frac{G \tau_i Q_{\text{total}}}{D_c^3} (n+1) \right]^{0.5} \right\}^{n+1} \quad (3-2)$$

โดยที่

$Q$  = อัตราการไหลเชิงปริมาตรที่เข้าไซโคลน,  $m^3 / s$

$D_c$  = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไซโคลน,  $m$

$n$  = Vortex Exponent

$$n = 1 - \left[ 1 - 0.669 \cdot D_c^2 \right] \left[ \frac{t + 273}{293} \right]^{0.3} \quad (3-3)$$

เมื่อ

$t$  = อุณหภูมิเข้าไซโคลน,  $^{\circ}C$

$\tau_i$  = Relaxation time , sec

$$= \frac{\rho_p (d_{pi})^2}{18\mu} \quad (3-4)$$

เมื่อ

$\rho_p$  = ความหนาแน่นจริงของอนุภาค,  $kg / m^3$

$d_{pi}$  = ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคในช่วงขนาด  $i$  ของอนุภาค,  $\mu m$

$\mu$  = ความหนืดของแก๊สที่อุณหภูมิเข้าไซโคลน,  $N \cdot s / m^2$

$G$  = ตัวประกอบรูปร่างของไซโคลน (Cyclone Configuration factor)

$$= \frac{8K_c}{K_a^2 K_b^2} \quad (3-5)$$

โดยที่

$$K_a = a/D_c \quad (3-6)$$

$$K_b = b/D_c \quad (3-7)$$

$$K_c = (2V_s + V_{nl,H}) / 2D_c^3 \quad (3-8)$$

เมื่อ

$V_H$  = ปริมาตรข้างใต้ท่อทางออกส่วนบนของแก๊สสะอาด,  $m^3$

$V_{nl}$  = ปริมาตรของความยาวธรรมชาติ(Natural Length),  $m^3$

$V_s$  = ปริมาตรของวงแหวนเหนือท่อออกของแก๊สสะอาดส่วนล่างถึงกึ่งกลางทางเข้าแก๊สสกปรก,  $m^3$

$$V_s = \frac{\left[ \pi(S - a/2)(D_c^2 - D_c'^2) \right]}{4} \quad (3-9)$$

สำหรับการที่จะพิจารณาว่าจะเลือกใช้  $V_{nl}$  หรือ  $V_H$  นั้นให้พิจารณาเมื่อความยาวธรรมชาติ (Natural Length,  $l$ ) ถ้า  $l$  มีค่าน้อยกว่าผลต่างระหว่างความสูงทั้งหมดของไซโคลน,  $H$  กับความยาวของท่อทางออกของแก๊สสะอาด,  $S$  ให้เลือกใช้  $V_{nl}$  มีสมการดังนี้

ถ้า  $l < (H - S)$  แล้ว

$$V_{nl} = \frac{\pi D_c^2}{4} (h - S) + \left( \frac{\pi D_c^2}{4} \right) \left( \frac{1 + S - h}{3} \right) \left( 1 + \frac{d}{D_c} + \frac{d^2}{D_c^2} \right) - \frac{\pi D_c^2 l}{4} \quad (3-10a)$$

ถ้าความยาวธรรมชาติมีค่ามากกว่าผลต่างระหว่างความสูงทั้งหมดของไซโคลน,  $H$  กับความยาวของท่อทางออกของแก๊สสะอาด,  $S$  จะเลือกใช้  $V_H$  มีสมการดังนี้

ถ้า  $l > (H - S)$  แล้ว

$$V_H = \frac{\pi D_c^2}{4} (h - S) + \left( \frac{\pi D_c^2}{4} \right) \left( \frac{H - h}{3} \right) \left( 1 + \frac{B}{D_c} + \frac{B^2}{D_c^2} \right) - \frac{\pi D_c^2}{4} (H - S) \quad (3-10b)$$

เมื่อ

$$l = 2.3 D_c (D_c^2 / ab)^{1/2} \quad (3-11)$$

$$d = D_c - (D_c - B) [(S + l - h) / (H - h)] \quad (3-12)$$

$d$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของการหมุนวนของของไหลเมื่อมีการกลับทิศทางการหมุนวน

### 3.3 ความเร็วฉบับปล้น (Saltation Velocity)

ความเร็วฉบับปล้นอาจจะให้ความหมายได้หลายความหมาย สำหรับการออกแบบไซโคลน มี 2 ความหมาย คือ

1. ความเร็วของของไหลที่น้อยที่สุด ที่ไม่ทำให้อนุภาคที่ปนอยู่ในของไหลตกตะกอนลงมาก่อนที่จะถึงไซโคลน
2. ความเร็วที่พัดพาเอาอนุภาคขึ้นมาและเคลื่อนที่ไปโดยปราศจากการตกตะกอนของอนุภาค

ในการศึกษาเพื่อที่จะคำนวณหาความเร็วที่เหมาะสมที่จะเข้าสู่ไซโคลน ความหมายแรกใช้ในการคำนวณหาความเร็วของของไหลที่น้อยที่สุด ที่ไม่ทำให้อนุภาคที่ปนอยู่ในของไหลตกตะกอนลงมาก่อนที่จะเข้าสู่ไซโคลน ในความหมายที่สองศึกษาเพื่อที่จะกำหนดค่าความเร็วที่มากที่สุดที่เข้าสู่ไซโคลน (Upper Limit) และไม่ทำให้อนุภาคที่ปนมาในของไหลหลุดลอยออกไปจากไซโคลน Kalen and Zenz<sup>(8)</sup> ได้ทำการทดลองหาความสัมพันธ์ของความเร็วเข้าไซโคลน (Inlet

velocity),  $v_i$  กับความเร็วฉับพลัน (Saltation Velocity),  $v_s$  สำหรับใช้ในการออกแบบไซโคลน ภายใต้อสมมติฐานดังนี้

1. ไม่คิดว่าจะมีการลื่นไหลหรือสูญเสียพลังงานระหว่างของไหลกับอนุภาค
2. ความกว้างของทางเข้าไซโคลนมีผลต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ สำหรับคำนวณหาอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงฉับพลัน (Saltation Effect)
3. มีความเข้มข้นของอนุภาค (Grain Loading) ที่ป้อนอยู่ในแก๊สมีค่าน้อยกว่า  $73.53 \text{ mg/m}^3$  ( $10 \text{ grain / ft}^3$ )
4. อิทธิพลของเส้นผ่านศูนย์กลางไซโคลนต่อ Saltation Velocity มีสัดส่วนเท่ากับของความกว้างของทางเข้ายกกำลัง 0.4 จาก Kalen and Zenz

จากสมมติฐานข้างต้นนี้ Kalen and Zenz สามารถหาสมการความสัมพันธ์ของความเร็วเข้าไซโคลนกับความเร็วฉับพลันที่ได้จากการทดลองดังนี้

$$\frac{v_s}{\omega(\text{No. of grains})^{1/3}} = 5.19b^{0.4} \quad (3-13)$$

โดยที่

$$\omega = \left[ \frac{4g\mu(\rho_p - \rho_f)}{3\rho_f^2} \right]^{1/3}, \text{ ft / s} \quad (3-14a)$$

$$\text{No. of grains} = \frac{v_i^2}{32.2r} \quad (3-14b)$$

$$r = \frac{(D_C - b)}{2}, \text{ ft} \quad (3-14c)$$

จัดรูปให้ความกว้างทางเข้า,  $b$  ให้อยู่ในรูปของตัวแปรไร้มิติ,  $(b / D_C)$  และแทนสมการ (3-14a), (3-14b), (3-14c) ใน (3-13) จะได้

$$v_s = 0.228\omega \left[ \frac{(b/D_C)^{0.4}}{(1 - b/D_C)^{1/3}} \right] D_C^{0.067} v_i^{2/3}, \text{ m / s} \quad (3-15)$$

ผลจากการศึกษาของ Kalen and Zenz พบว่าอัตราส่วนของความเร็วเข้าไซโคลนต่อความเร็วฉับพลันควรมีค่าไม่ต่ำกว่า 1.25 เพื่อไม่ให้อนุภาคตกตะกอนก่อนเข้าไซโคลน Zenz ยังได้สรุปผลที่ได้จากการทดลองอีกว่าที่อัตราส่วนของความเร็วเข้าไซโคลนต่อความเร็วฉับพลันนั้นจะต้องมีค่าไม่เกิน 1.35 ถ้าอัตราส่วนของความเร็วมีค่ามากกว่าค่านี้จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ไหลย้อนกลับ (Reentrainment) ของอนุภาคซึ่งจะทำให้ความดันสูญเสียในไซโคลนมีค่าสูง



อัตราส่วนความเร็ว (Velocity Ratio) หาได้จากสภาวะเข้าไซโคลนประกอบด้วยอุณหภูมิเข้าไซโคลน ความหนาแน่นของอนุภาค และอัตราส่วนความเร็ว  $(v_i / v_s)_{base}$  เท่ากับ 1.25 ที่อุณหภูมิ  $38^{\circ}C$  และความหนาแน่นของอนุภาค  $2.58 \text{ g/cm}^3$  สมการหาอัตราส่วนความเร็ว<sup>(9)</sup> คือ

$$\frac{v_i}{v_s} = \frac{(v_i/v_s)_{base}}{f_t f_p} \quad (3-16)$$

เมื่อ

$f_t$  คือ Correction Factor สำหรับอุณหภูมิ

$$f_t = \frac{6.88}{10.52 - \ln t} \quad (3-17a)$$

$f_p$  คือ Correction Factor สำหรับความหนาแน่นของอนุภาค

$$f_p = \frac{2.25}{3.11 - \ln \rho_p} \quad (3-17b)$$

โดยที่อุณหภูมิเข้าไซโคลน ,  $t$  หน่วย ( $^{\circ}C$ ) และความหนาแน่นของอนุภาค ,  $\rho_p$  หน่วย ( $\text{g/cm}^3$ )

### 3.4 การคำนวณค่าความดันสูญเสียในไซโคลน (Pressure Drop)

ความดันสูญเสียในไซโคลนกับประสิทธิภาพรวมในการดักเก็บอนุภาคมีความสำคัญสำหรับการประมาณค่าในการติดตั้งไซโคลน การคำนวณหาความดันสูญเสียในไซโคลนจะพิจารณาระหว่างทางเข้าของแก๊สสกรกถึงทางออกของแก๊สสะอาด ปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อความดันสูญเสียในไซโคลนที่ศึกษาโดย Leith and Mehta<sup>(7)</sup> มีดังนี้

- 1) การสูญเสียเนื่องจากการขยายตัวของแก๊สขณะที่เข้าไซโคลน
- 2) การสูญเสียเนื่องจากพลังงานจลน์ของการหมุน (Kinetic Energy of Rotation) ในไซโคลน
- 3) การสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานที่ผนังของไซโคลน
- 4) การสูญเสียเนื่องจากความเสียดทาน (Friction Loss) ของท่อซึ่งเป็นผลมาจากการไหลหมุนวน (Swirling Flow)
- 5) การสูญเสียเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานการหมุน (Rotation Energy) เป็นพลังงานความดัน (Pressure Energy)

สมการหาความดันสูญเสียในไซโคลนโดยทั่วไปจะพิจารณาจากการสูญเสียเนื่องจากพลังงานจลน์ของการหมุนในไซโคลนหรือการสูญเสียเนื่องจากความเร็วเข้าไซโคลน (Inlet Velocity Head) ซึ่งการสูญเสียเนื่องจากความเร็วเข้าไซโคลนจะขึ้นอยู่กับพื้นที่ทางเข้าไซโคลนหรืออัตรา

ส่วนรูปร่างของไซโคลน(Geometric Ratio) โดยทั่วไปการสูญเสียความดันในไซโคลนจะมีค่าอยู่ระหว่าง 1-20 เท่าของการสูญเสียเนื่องจากความเร็ว สำหรับการออกแบบไซโคลนโดยทั่วไปแล้วค่าความดันสูญเสียที่มากที่สุดที่ยอมให้เกิดขึ้นได้ในไซโคลนเท่ากับ 25 cm H<sub>2</sub>O จากการศึกษา Leith and Mehta สามารถสรุปได้ว่าสมการการประมาณค่าความดันสูญเสียในไซโคลนที่ให้ผลการคำนวณใกล้เคียงกับความจริงเป็นสมการของ Shepherd and Lapple<sup>(10)</sup> คือ

$$\Delta P = \left( \frac{\rho_f v_i^2}{2g} \right) \left( \frac{N_H}{\rho_{H_2O}} \right) \quad (3-18)$$

$$N_H = K \left( \frac{ab}{D_e^2} \right) \quad (3-19)$$

จากสมการที่ (3-18) และ (3-19) จะได้

$$\Delta P = 8.19 \times 10^{-3} \rho_f v_i^2 N_H \quad (3-20)$$

เมื่อ

$\Delta P$  = ค่าความดันสูญเสียในไซโคลน, cm H<sub>2</sub>O

$\rho_f$  = ความหนาแน่นของของไหล, g / cm<sup>3</sup>

$v_i$  = ความเร็วเข้าไซโคลน, cm / s

$N_H$  = ตัวเลขการสูญเสียเนื่องจากความเร็วเข้าไซโคลน(NO. of Inlet Velocity Heads)

$K$  = 16 สำหรับไซโคลนที่มีบานบังค้ำการไหลของไหล(Inlet Vane)

= 7.5 สำหรับไซโคลนที่ไม่มีบานบังค้ำการไหลของแก๊ส(Neutral Inlet Vane)

ข้อกำหนดสำหรับการคำนวณออกแบบไซโคลน

1. อัตราส่วนความเร็วเข้าไซโคลนจะต้องมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1.35 เพื่อไม่ให้มีการไหลย้อนกลับ (Reentrainment) ของอนุภาค
2. อัตราส่วนความเร็วเข้าไซโคลนควรมีค่าประมาณ 1.25 สำหรับการออกแบบที่เหมาะสม หรือมีค่าไม่ต่ำกว่า 1.25 เพื่อไม่ให้อนุภาคตกตะกอนก่อนเข้าไซโคลน
3. ค่าความดันสูญเสียในไซโคลนมีค่าไม่เกิน 10 in H<sub>2</sub>O
4. อุณหภูมิเข้าไซโคลนมีค่าน้อยกว่า 1000 °C
5. ความหนาแน่นของอนุภาคที่จะดักเก็บได้ด้วยไซโคลนมีค่าไม่เกิน 3.20 g/cm<sup>3</sup>
6. ความเข้มข้นของอนุภาคที่ออกสู่บรรยากาศจะต้องเป็นไปตามมาตรฐานอากาศ

ข้อกำหนดสำหรับการออกแบบสัดส่วนไซโคลน

7. ความสูงบริเวณทางเข้าไซโคลนต้องมีค่าน้อยกว่าความยาวของท่อทางออกไซโคลน

8. ความกว้างบริเวณทางเข้าของไซโคลนต้องมีค่าน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของผลต่างระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไซโคลนกับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อทางออกของไซโคลน
9. ความยาวของท่อทางออกไซโคลนต้องมีค่าน้อยกว่าความยาวทรงกระบอกของไซโคลน
10. ความยาวทรงกระบอกของไซโคลนต้องมีค่าน้อยกว่าความยาวทั้งหมดของไซโคลน

### 3.5 ทฤษฎีสำหรับพัดลม

ทฤษฎีสำหรับพัดลมในที่นี้จะพิจารณาพัดลมแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง(Centrifugal-Fan) โดยวิธีการของ David K. Eads<sup>(11)</sup> จะหาฟังก์ชันในการประมาณค่าเส้นโค้งสมรรถนะ (Performance Curve) จากพฤติกรรมเบื้องต้นของพัดลม David K. Eads ได้แบ่งการพิจารณาหลักๆเป็น 2 ส่วนคือ กฎการอนุรักษ์โมเมนตัม(Law of Conservation of Momentim) และกฎทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Law of Thermodynamics)

#### พิจารณากฎการอนุรักษ์โมเมนตัม ( Momentum Considerations )

พิจารณาพัดลมแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง สมมุติว่าอัตราการไหลเชิงมวลรวมของของไหลเป็นการไหลแบบสม่ำเสมอรอบๆเส้นรอบวงของพัดลม แรงที่มากจะทำให้พัดลมหมุนสามารถอธิบายได้จากกฎการอนุรักษ์โมเมนตัมคือ

$$\tau = \frac{\Delta(\dot{m} v_{abs} r)}{g} \quad (3-21)$$

เมื่อ

$\tau$  = แรงที่มากทำให้พัดลมหมุน (Torque) , N · m

$\dot{m}$  = อัตราการไหลเชิงมวลรวม (Total Mass Flow Rate), kg / s

$v_{abs}$  = ความเร็วสัมผัสในแนวสัมผัส (Absolute Tangential Velocity), m / s

$r$  = รัศมีของพัดลม, m

$g$  = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง, m / s<sup>2</sup>

โดยทั่วไปพัดลมแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางจะมีทางเข้าในแนวแกนและทางออกของลมในแนว จากการทดสอบพัดลมที่สภาวะปกติทั่วไปพบว่าแรงที่มากทำให้พัดลมหมุนที่เกิดขึ้นตอนแรกไม่มาคิด ดังนั้นสามารถเขียนสมการใหม่ได้คือ

$$\tau = \frac{(\dot{m} v_{abs} r)}{g} \quad (3-22)$$

กำลังที่พัดลมต้องใช้ในการสร้างความเร็วเชิงมุม (Angular Velocity) และแรงที่กระทำทำให้พัดลมหมุนจะเขียนใหม่ในรูปของอัตราส่วนระหว่างพลังงานต่อหนึ่งหน่วยมวลของไหลได้ดังนี้

$$W_{si} = \frac{p}{\dot{m}} = \frac{\tau \omega}{\dot{m}} = \frac{2\pi N r v_{abs}}{g} = \frac{p v}{Q} \tag{3-23}$$

เมื่อ

$W_{si}$  = พลังงานเพลตต่อหนึ่งหน่วยมวลของของไหล, J / kg

$p$  = กำลังงานเพลต, W

$\omega$  = ความเร็วเชิงมุม, rad / s

$N$  = ความเร็วรอบ, rpm

$v$  = ปริมาตรจำเพาะ,  $m^3 / kg$

จาก  $u_t = 2\pi N r$  เมื่อ  $u_t$  เป็นความเร็วของใบพัด

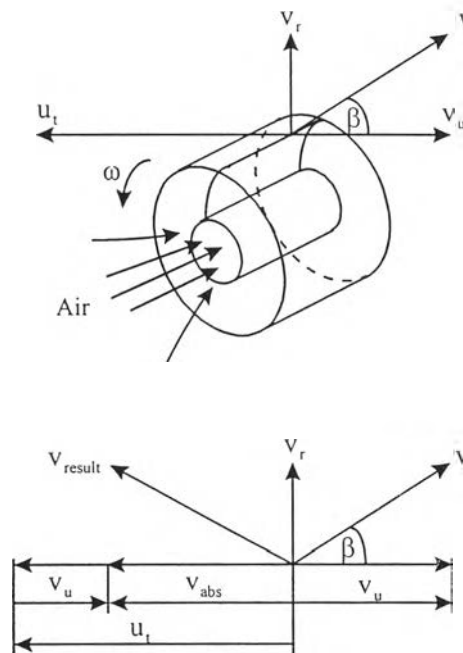
$$W_{si} = \frac{u_t v_{abs}}{g} \tag{3-24}$$

จากรูปที่ 3.3 การวิเคราะห์เวกเตอร์ของความเร็ว

$$v_{abs} = u_t - v_u = u_t - v_r \cot \beta \tag{3-25}$$

เมื่อ

$v_u$  = ความเร็วในแนวสัมผัสของของไหล, m / s



รูปที่ 3.3 การวิเคราะห์เวกเตอร์ความเร็วของกังล้อพัดลม

$v$  = ความเร็วสุทธิตามสัมพัทธ์กับการเคลื่อนที่ของกบฏพัดลม, m / s

$\beta$  = มุมของของไหลที่ออกจากใบพัด, องศา

เขียนความสัมพันธ์ของ  $W_{si}$  ใหม่ได้ว่า

$$W_{si} = \frac{u_t^2 - u_r v_r \cot \beta}{g} \quad (3-26)$$

จากความสัมพันธ์  $v_r = \frac{Q}{\pi DN}$  (3-27)

โดยที่

$v_r$  = ความเร็วของของไหลในแนวรัศมีพัดลม, m / s

$D$  = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพัดลม, m

$N$  = ความเร็วรอบของพัดลม, rpm

ดังนั้นสามารถเขียน  $W_{si}$  ในรูปของอัตราส่วนของพลังงานต่อหนึ่งหน่วยมวลของของไหล ได้คือ

$$W_{si} = \Delta E_0 - \Delta E_b \cot \beta \quad (3-28)$$

เมื่อ

$$\Delta E_0 = \frac{(\pi DN)^2}{g}$$

$$\Delta E_b = \frac{(QN / W)}{g}$$

$W_{si}$ ,  $\Delta E_0$  และ  $\Delta E_b$  เป็นตัวแปรที่อยู่ในรูปอัตราส่วนของพลังงานต่อหนึ่งหน่วยมวลของไหล

### พิจารณาทางเทอร์โมไดนามิกส์ ( Thermodynamic Considerations )

จากกฎทรงพลังงานของปริมาตรควบคุมดังรูปที่ 3.3 สมมุติว่าของไหลเป็นแบบไม่อัดตัว (Incompressible Flow) และไม่พิจารณาผลของการเปลี่ยนแปลงของระดับความสูง ดังนั้น

$$\Delta E_t = \Delta E_k + \Delta E_p = W_{si} - \delta E \quad (3-29)$$

เมื่อ

$\Delta E_t$  = พลังงานรวมที่ของไหลได้รับต่อหนึ่งหน่วยมวลของของไหล, J / kg

$\Delta E_k$  = พลังงานจลน์ที่ของไหลได้รับต่อหนึ่งหน่วยมวลของของไหล, J / kg

$$= \frac{1}{2g} \left( \frac{Q}{A} \right)^2$$

$\Delta E_p$  = พลังงานความดันที่ของไหลได้รับมาต่อหนึ่งหน่วยมวลของของไหล, J / kg

$$= v \Delta P$$

$\delta E$  = พลังงานที่ใส่เข้าไปต่อหนึ่งหน่วยมวลของแก๊สแล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน, J / kg

จากกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์พลังงานที่สูญเสียไปอาจเขียนให้อยู่ในรูปของอัตราส่วนระหว่างพลังงานที่ใส่เข้าไปต่อพลังงานเพลลาหรือเรียกว่าการสูญเสียพลังงานเพลลา (Shaft Input losses),  $\varphi$

$$\varphi = \frac{\delta E}{W_{si}} \quad (3-30)$$

การสูญเสียพลังงานเพลลาสามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนได้เพราะว่าเป็นการสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทาน ดังนั้นจากสมการพลังงานสมการ(3-29) เขียนใหม่จะได้ว่า

$$\Delta E_t = W_{si}(1 - \varphi) \quad (3-31a)$$

หรือ

$$\eta_{fan} = 1 - \varphi = \frac{\Delta E_t}{W_{si}} \quad (3-31b)$$

เมื่อ  $\eta_{fan}$  คือประสิทธิภาพการทำงานของพัดลม

สหสัมพันธ์สำหรับ  $\beta$  (Correlation for  $\beta$ )

สหสัมพันธ์ของมุมของของไหลที่ออกจากกังล้อพัดลมสามารถพิจารณาเป็นเทอมไร้มิติได้โดยตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์โมเมนต์ของพัดลมเป็นไปตามตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์โมเมนต์ของพัดลม

สัญลักษณ์	มิติ
p	LF / $\theta$
v	L <sup>3</sup> / M
Q	L <sup>3</sup> / $\theta$
D	L
N	1 / $\theta$
W	L
$\Delta P$	F / L <sup>2</sup>
A	L <sup>2</sup>
g	ML / F $\theta$ <sup>2</sup>

หมายเหตุ F, L, M,  $\theta$  = แรง, ความยาว, มวล, เวลา

จาก Buckingham PI Theorem สามารถจัดรูป  $\beta = f(p, v, Q, D, N, W, \Delta P, A, g)$  ในเทอมไร้มิติได้คือ

$$\beta = f\left(\frac{p v / Q}{v \Delta P}, \frac{(Q / A)^2 / g}{v \Delta P}, \frac{(Q N / W) / g}{v \Delta P}, \frac{(D N)^2 / g}{v \Delta P}, \frac{A}{D^2}\right)$$

เขียนให้อยู่ในรูปของเทอมพลังงานได้ดังนี้

$$\beta = f\left(\frac{W_{si}}{\Delta E_p}, \frac{\Delta E_k}{\Delta E_p}, \frac{\Delta E_b}{\Delta E_p}, \frac{\Delta E_0}{\Delta E_p}, \frac{A}{D^2}\right) \quad (3-32)$$

จากสมการ(3-28)  $W_{si} = \Delta E_0 - \Delta E_b \cot \beta$  หรือ  $\frac{W_{si}}{\Delta E_p} = \frac{\Delta E_0}{\Delta E_p} - \frac{\Delta E_b}{\Delta E_p} \cot \beta$

จากสมการ(3-32) เขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\frac{W_{si}}{\Delta E_p} = \frac{\Delta E_0}{\Delta E_p} - \frac{\Delta E_b}{\Delta E_p} f\left(\frac{\Delta E_k}{\Delta E_p}, \frac{A}{D^2}\right) \quad (3-33)$$

เมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของสมการ(3-28), สมการ(3-29) และสมการ(3-32) จะเห็นว่า  $\beta$  ขึ้นอยู่กับ  $\Delta E_k$  และ  $\Delta E_p$  สำหรับพัดลมทุกชนิดเนื่องจากพัดลมจะมีความคล้ายคลึงทางเรขาคณิต (Geometric Similarity) ที่เหมือนกัน

ในการหาค่าสหสัมพันธ์สำหรับ  $\beta$  ซึ่งขึ้นอยู่กับค่า  $\Delta E_k$  และ  $\Delta E_p$  ให้ใช้ตัวแปรค่าซึ่ง  $\gamma$  มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 โดยที่  $\gamma$  เป็นฟังก์ชันของ  $\beta$  ดังนี้

$$\gamma = \frac{\Delta E_k}{\Delta E_k + \Delta E_p}$$

**สหสัมพันธ์สำหรับสัมประสิทธิ์การสูญเสีย (Correlation for Loss Coefficient)**

การพิจารณาหาเทอมไร้มิติของสัมประสิทธิ์การสูญเสียนั้นตัวแปรที่นำมาพิจารณาจะเป็นไปตามตารางที่ 3.1 เพียงแต่ว่าสำหรับการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การสูญเสีย,  $\phi$  จะไม่พิจารณาความเร็วรอบของพัดลมและขนาดของพัดลม ( $N, D, W$ ) จาก Buckingham PI Theorem สามารถจัดรูป  $\phi = f(P, v, Q, \Delta P, A, g)$  ให้อยู่ในเทอมไร้มิติได้ดังนี้

$$\phi = f\left(\frac{W_{si}}{\Delta E_p}, \frac{\Delta E_k}{\Delta E_p}\right) \quad (3-34)$$

จากสมการ(3-34) และสมการ(3-35) เขียนใหม่จะได้สมการ(3-36b)

$$\eta_{fan} = 1 - \phi = f\left(\frac{\Delta E_k}{\Delta E_p}\right) \quad (3-35)$$

เนื่องจากสมการมุมของของไหลที่ออกจากกอลฟ์พัดลมเป็นฟังก์ชันของ  $\gamma$  และประสิทธิภาพของพัดลมเป็นฟังก์ชันของ  $\gamma$  ดังนั้นสามารถสร้างสมการในรูปของฟังก์ชันอันดับสอง (Quadratic Function) ซึ่งมีรูปแบบฟังก์ชันคือ

$$\ln y = a + b(\ln \gamma) + c(\ln \gamma)^2$$

### 3.6 พลังงานไฟฟ้าที่ใช้สำหรับพัดลม (Power Requirement)

พลังงานไฟฟ้าที่ต้องใช้ในการขับเคลื่อนของพัดลม(Fan or Blower) จะต้องมีค่ามากกว่าพลังงานที่ต้องการเอาชนะแรงเสียดทานในท่อ ทั้งนี้ต้องพิจารณาถึงประสิทธิภาพของพัดลมและประสิทธิภาพของมอเตอร์ด้วย ดังนั้นพลังงานที่ใช้สำหรับการทำงานของพัดลม<sup>(12)</sup> คำนวณจาก

$$(\text{Power}) = \frac{Q \cdot \Delta P_{cyclone}}{\eta_{motor} \cdot \eta_{fan}} \quad (3-37)$$

เมื่อ

(Power) = พลังงานไฟฟ้าที่พัดลมใช้, Watt

Q = อัตราการไหลของแก๊ส, m<sup>3</sup> / s

$\Delta P_{cyclone}$  = ความดันสูญเสียในไซโคลน, Pa

$\eta_{motor}$  = ประสิทธิภาพของมอเตอร์

$\eta_{fan}$  = ประสิทธิภาพของพัดลม

### 3.7 การเลือกออกแบบไซโคลน

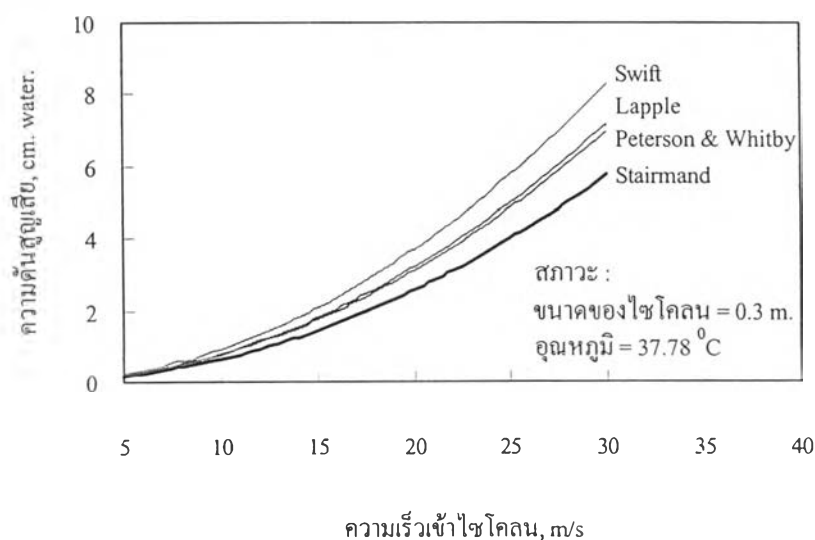
การเลือกออกแบบไซโคลนให้เหมาะสม<sup>(12)</sup> พิจารณาจากอัตราส่วนระหว่างประสิทธิภาพการทำงานต่อความดันสูญเสีย เนื่องจากประสิทธิภาพการทำงานจะขึ้นอยู่กับตัวประกอบรูปร่างของไซโคลน (Cyclone Configuration factor), G และความดันสูญเสียจะขึ้นอยู่กับตัวเลขการสูญเสีย เนื่องจากความเร็วเข้าไซโคลน (Number Inlet Velocity Head),  $N_H$  ดังนั้นอัตราส่วนที่ใช้พิจารณาการเลือกออกแบบไซโคลนให้เหมาะสม(Optimum Design) คือ อัตราส่วนของตัวประกอบรูปร่างกับตัวเลขการสูญเสียเนื่องจากความเร็วเข้าไซโคลน ( $G / N_H$ )



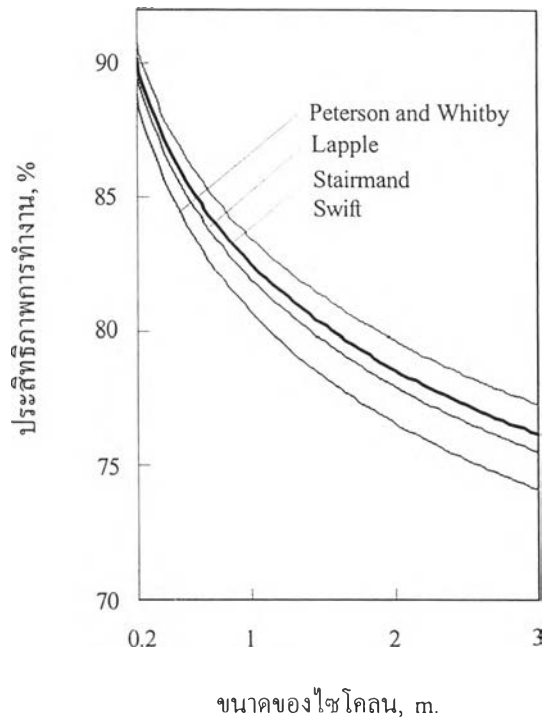
ตารางที่ 3.2 แสดงสัดส่วนไซโคลนและอัตราส่วนของตัวประกอบรูปร่างกับการสูญเสียเนื่องจากความเร็ว

	Stairmand	Swift	Lapple	Peterson&Whitby
body dia.	1.0	1.0	1.0	1.0
Inlet height	0.5	0.44	0.5	0.583
inlet width	0.2	0.21	0.25	0.208
outlet length	0.5	0.5	0.625	0.583
outlet dia.	0.5	0.4	0.5	0.5
cylinder height	1.5	1.4	2.0	1.333
overall height	4.0	3.9	4.0	3.17
dust outlet dia.	0.375	0.4	0.25	0.5
$G / N_H$	86.14	75.67	50.36	41.86

จากตารางที่ 3.2 จะเห็นว่าอัตราส่วนของตัวประกอบรูปร่างกับการสูญเสียเนื่องจากความเร็วเข้าไซโคลน ( $G / N_H$ ) ของ Stairmand จะมีค่ามากที่สุดดังนั้นการออกแบบไซโคลนของ Stairmand เป็นการออกแบบไซโคลนที่เหมาะสมที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับของ Swift, Lapple และ Peterson&Whitby รูปที่ 3.4 และรูปที่ 3.5 แสดงการเปรียบเทียบของความดันสูญเสียในไซโคลนและประสิทธิภาพการทำงานของแต่ละทฤษฎีการออกแบบไซโคลน



รูปที่ 3.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความดันสูญเสียกับการออกแบบของไซโคลน



รูปที่ 3.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพกับการออกแบบของไซโคลน