



บทที่ 4

แบบจำลองกังหันลมแบบดันและดึง

A Push-Pull Windmill Model

4.1 ทฤษฎี

เพื่ออธิบายแบบจำลองกังหันลมชนิดนี้ จำเป็นต้องใช้ทฤษฎีที่ได้พัฒนาขึ้นมาจากบทก่อน ในหัวข้อที่ 3.5 ซึ่งเป็นทฤษฎีเฉพาะของกังหันลมที่มีใบติดแน่นกับแกน กรณีที่ตัวโรเตอร์มีรูปร่างเป็นทรงกระบอก  $r = R$  และ  $\delta = 0$

แรงที่ได้จะเป็นไปตามสมการดังนี้

$$F = \frac{pl + H}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{2\pi} q \left( C_n \sin \theta - C_t \frac{\cos \theta}{\cos \delta} \right) d\theta dz \tag{4.1}$$

$P$  = จำนวน ใบของกังหันลม

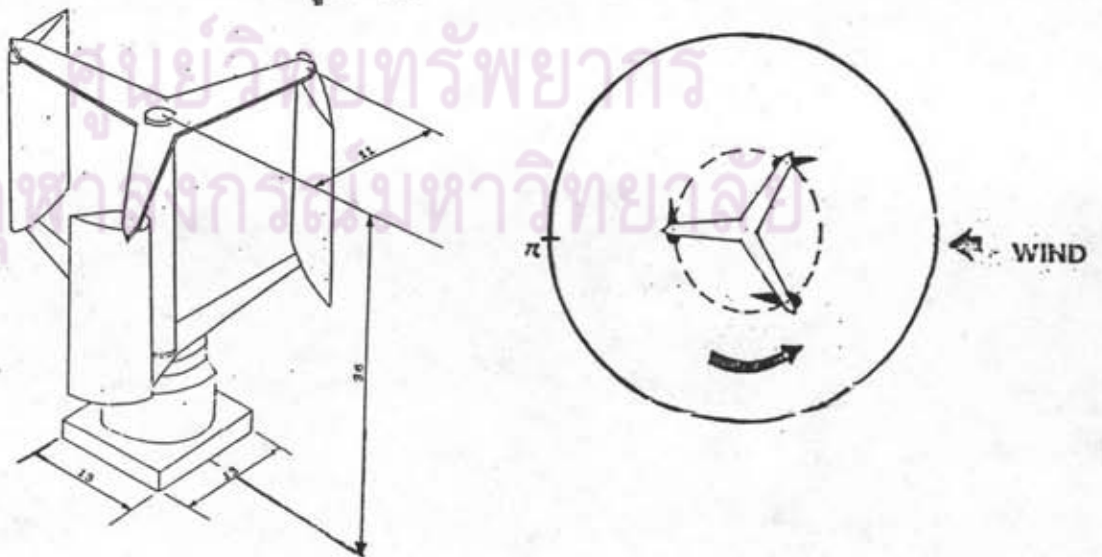
โมเมนต์บนตัวโรเตอร์ทั้งหมด

$$M = \frac{pl + H}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{2\pi} \frac{C_t qr}{\cos \delta} d\theta dz \tag{4.2}$$

กำลังงานที่ได้จากสมการข้างบน

$$P = M\omega = \frac{pl + H}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{2\pi} \frac{C_t qr\omega}{\cos \delta} d\theta dz \tag{4.3}$$

ในกรณีที่ใบไม่ติดแน่นกับแกน ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แบบจำลองกังหันลมแบบใบสับรับลม มองจากด้านข้างและด้านบน



บทที่ 4

แบบจำลองกังหันลมแบบดันและดึง

A Push-Pull Windmill Model

4.1 ทฤษฎี

เพื่ออธิบายแบบจำลองกังหันลมชนิดนี้ จำเป็นต้องใช้ทฤษฎีที่ได้พัฒนาขึ้นมาจากบทก่อน ในหัวข้อที่ 3.5 ซึ่งเป็นทฤษฎีเฉพาะของกังหันลมที่มีใบติดแน่นกับแกน กรณีที่ตัวโรเตอร์มีรูปร่างเป็นทรงกระบอก  $r = R$  และ  $\delta = 0$

แรงที่ได้จะเป็นไปตามสมการดังนี้

$$F = \frac{\rho l}{2\pi} \int_{-H}^H \int_0^{2\pi} q \left( C_n \sin \theta - C_t \frac{\cos \theta}{\cos \delta} \right) d\theta dz \quad (4.1)$$

$P$  = จำนวนใบของกังหันลม

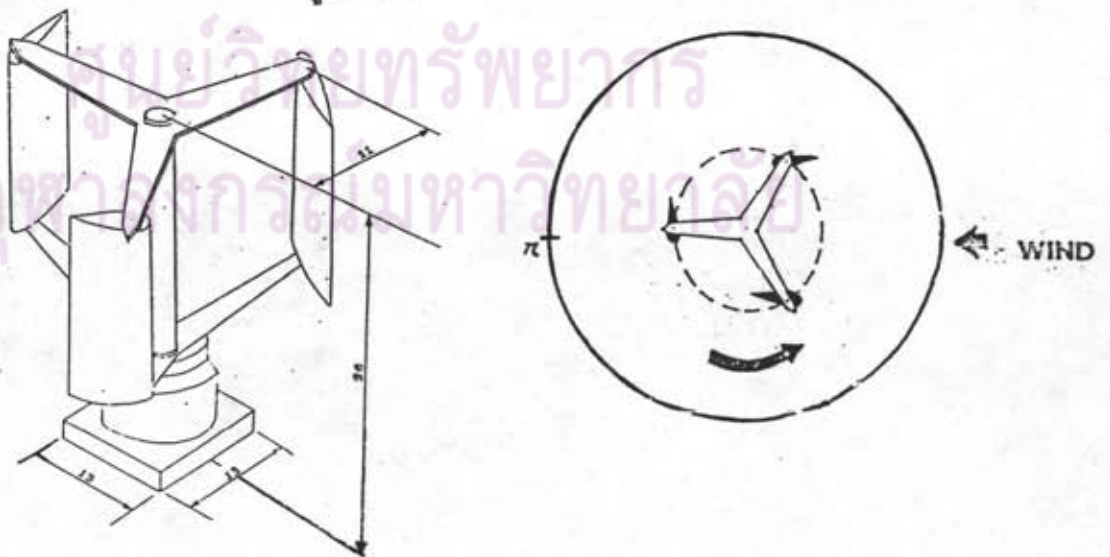
โมเมนต์บนตัวโรเตอร์ทั้งหมด

$$M = \frac{\rho l}{2\pi} \int_{-H}^H \int_0^{2\pi} \frac{C_t q r}{\cos \delta} d\theta dz \quad (4.2)$$

กำลังงานที่ได้จากสมการข้างบน

$$P = M\omega = \frac{\rho l}{2\pi} \int_{-H}^H \int_0^{2\pi} \frac{C_t q r \omega}{\cos \delta} d\theta dz \quad (4.3)$$

ในกรณีที่ใบไม่ติดแน่นกับแกน ดังรูปที่ 4.1

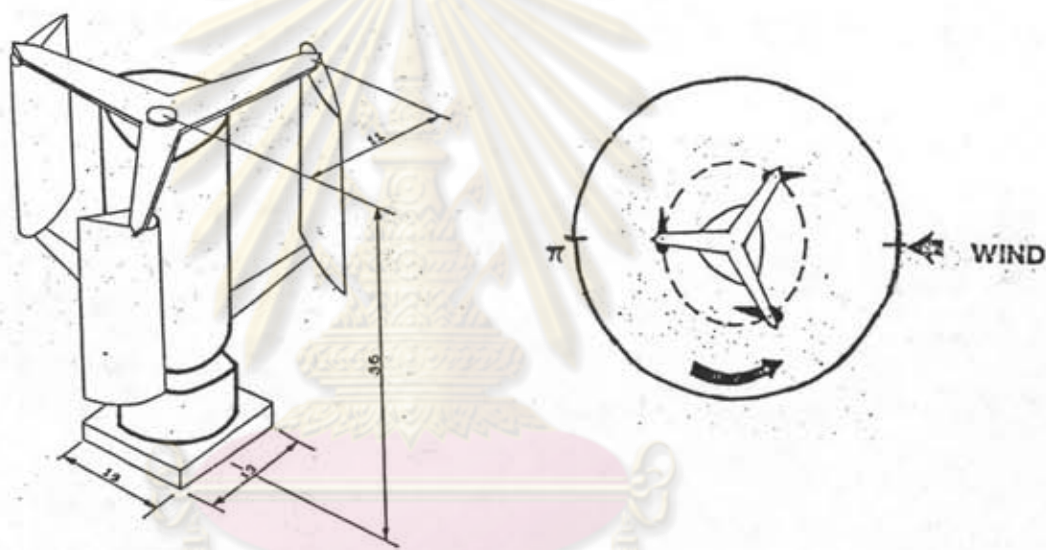


รูปที่ 4.1 แบบจำลองกังหันลมแบบใบสับรับลม มองจากด้านข้างและด้านบน

จากรูปที่ 4.1 อินทิเกรตจาก 0 ถึง  $2\pi$  ไม่ได้ เนื่องจากใบมีการสับตัวลมตั้งแต่บริเวณ 0 ถึง  $\pi$  ดังนั้นแรงที่ทำให้เกิดการหมุนจากสมการข้างต้น อินทิเกรต จาก  $\pi$  ถึง  $2\pi$  โดยประมาณ ส่วนด้านที่ใบสับตัวลม แรงได้จากสมการในบทที่ 2 เป็นแรงที่เกิดจากแรงผลักเป็นส่วนใหญ่

$$D = \frac{1}{2} \rho V^2 SC_D \quad \text{ที่ตำแหน่งต่างๆจาก 0 ถึง } \pi \quad (4.4)$$

กรณีของแบบจำลองกังหันลมแบบต้นและตั้งมองจากด้านข้างและด้านบน เมื่อเสริมปริซึมผิวโค้งเข้าไปตรงเพลากลางของแบบจำลองกังหันลมแบบใบสับตัวลม



รูปที่ 4.2 แบบจำลองกังหันลมแบบต้นและตั้ง มองจากด้านข้างและด้านบน

จาก

$$\vec{W} = \vec{V} - \vec{U} \quad (4.5)$$

$\vec{V}$  = ความเร็วลมที่ผ่านใบ

เมื่อมีปริซึมผิวโค้งสวมอยู่ความเร็วลมที่ผ่านใบจะมีค่ามากกว่าเมื่อไม่ได้สวมอยู่

ดังนั้น W จะมีค่ามากขึ้น เมื่อ V เพิ่มขึ้น

$q$  (Dynamic Pressure) =  $\frac{1}{2} \rho W^2$  ก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย



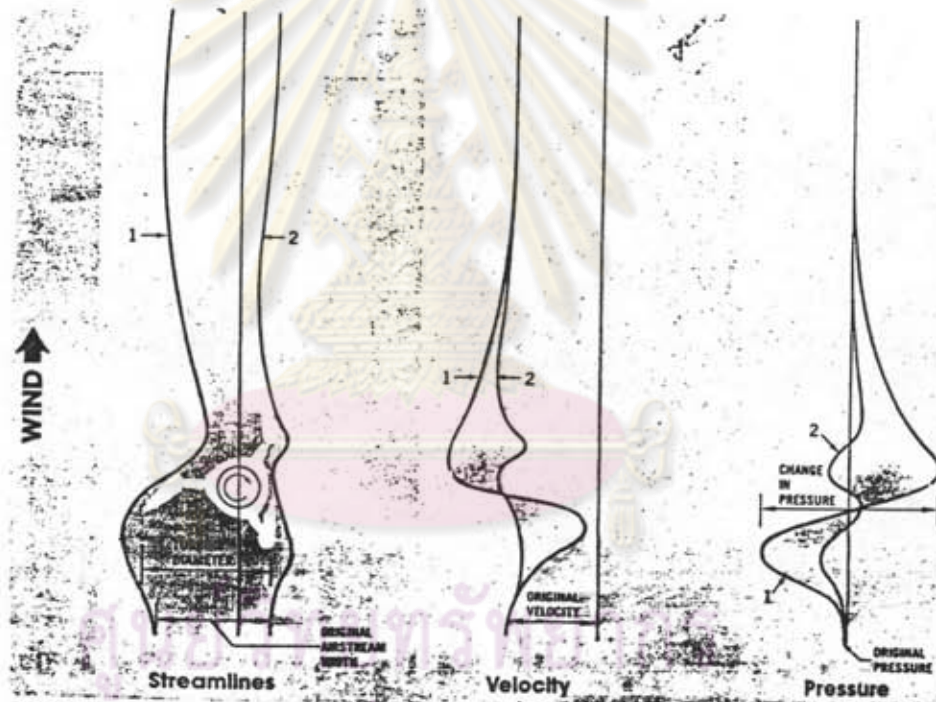
ดังนั้นแรงที่เกิดจากแบบจำลองกึ่งหันลมแบบตันและตั้งทางด้านแรงยก

$$F = \frac{\rho l^2}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{2\pi} q \left( C_s \sin \theta - C_p \frac{\cos \theta}{\cos \theta} \right) d\theta dz. \quad (4.6)$$

เมื่อใส่ปริซึมผิวโค้งเสริมเข้าไปมีผลทำให้แรงจาก  $\pi$  ถึง  $2\pi$  มีค่ามากขึ้นกว่าไม่ได้เสริมปริซึม ทั้งนี้ก็เพราะเป็นผลที่เกิดจากปรากฏการณ์เวนจูรี

ส่วนบริเวณ 0 ถึง  $\pi$  เป็นแรงที่เกิดจากแรงดันเป็นส่วนใหญ่ จะกล่าวอีกครั้งในหัวข้อที่ 4.3

รูปข้างล่างแสดงถึงเส้นกระแส (Streamlines) ที่พัดผ่านตัวกึ่งหันลมชนิดนี้



## จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.3 แสดงถึงเส้นกระแส (Streamlines) ที่ผ่านแบบจำลองกึ่งหันลมแบบตันและตั้ง

รูปทางด้านซ้ายมือ มองจากทางด้านบน รูปกลางแสดงให้เห็นถึงความเร็วบริเวณต่างๆ เส้น

หมายเลข 2 มีความเร็วสูงมากเมื่อผ่านใบ ทั้งนี้ก็เพราะปรากฏการณ์เวนจูรี รูปทางขวามือ

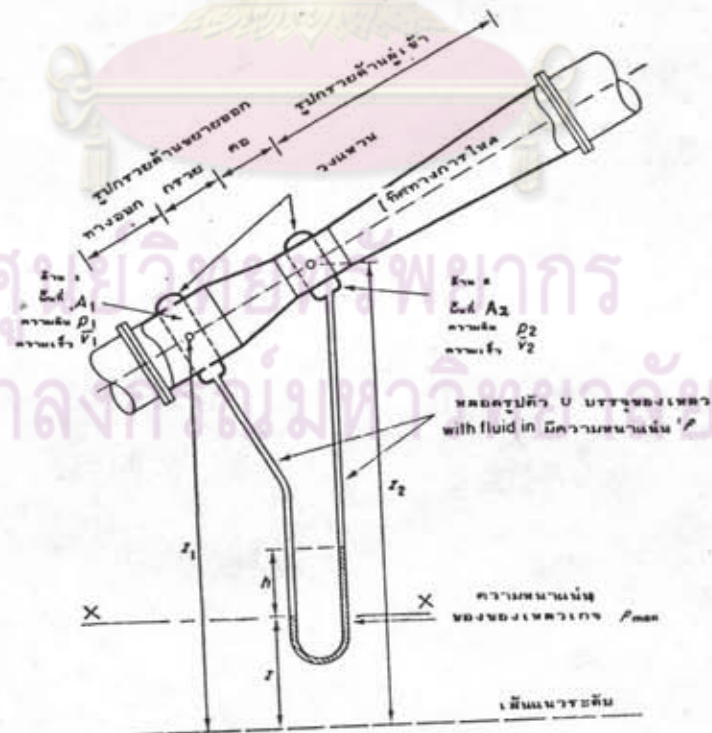
เป็นผลจากรูปกลาง เมื่อความเร็วลมผ่านใบบริเวณนี้สูงความดันก็จะต่ำลง

#### 4.2 ปรากฏการณ์เวนจูรี

จากหัวข้อที่ 4.1 ผลของปริซึมผิวโค้งทำให้ความเร็วลมได้ใบสูงขึ้นกว่าปกติมาก  
 เป็นผลจากการไหลของของไหล ในสาขาวิชากลศาสตร์ของไหลเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า เวนจูรี  
 ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการคำนวณความเร็วภายในช่องแคบเวนจูรี ว่ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร

รูปที่ 4.4 แสดงถึงความแตกต่างของความดัน ระหว่างระดับ  $z_2$  และ  $z_1$   
 ความเร็ว  $v_2$  และ  $v_1$  โดยเฉพาะความแตกต่างของความดันสามารถที่จะอธิบายอัตรา  
 การส่งถ่ายปริมาตรของของไหลได้  $Q$

การทดลองปรากฏการณ์เวนจูรี โดยใช้ส่วนที่เป็นทรงกระบอก หรือ  
 ทรงสี่เหลี่ยม และค่อยลดลง ส่วนที่แคบเรียกว่าคอ (Throat) ซึ่งมีพื้นที่แคบกว่าบริเวณ  
 ทรงกระบอก การวัดความดันจะวัดที่บริเวณที่ 1 และ บริเวณที่ 2 โดยการใช้ มาโนมิเตอร์  
 อุปกรณ์อาจจะเอียงทำมุมเท่าไรก็ได้แล้วแต่ความสะดวก สมมติไว้ว่าไม่มีการสูญเสียพลังงานเลย



รูปที่ 4.4 เวนจูรีมิเตอร์ และมาโนมิเตอร์รูปตัวยู

สมการเบอร์นูลี บริเวณที่ 1 และ 2 เขียนได้ดังนี้

$$z_1 + p_1/\rho g + v_1^2/2g = z_2 + p_2/\rho g + v_2^2/2g,$$

$$v_2^2 - v_1^2 = 2g \left\{ (p_1 - p_2)/\rho g + (z_1 - z_2) \right\}.$$

(4.7)

สำหรับการไหลอย่างต่อเนื่อง

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

$$v_2 = (A_1/A_2)v_1.$$

แทนลงในสมการที่ 4.7

$$v_1^2 \left\{ (A_1/A_2)^2 - 1 \right\} = 2g \left\{ (p_1 - p_2)/\rho g + (z_1 - z_2) \right\},$$

$$v_1 = \frac{A_2}{(A_1^2 - A_2^2)^{1/2}} \sqrt{\left\{ 2g \left( \frac{p_1 - p_2}{\rho g} + z_1 - z_2 \right) \right\}}$$

อัตราการส่งถ่ายปริมาตร

$$Q = A_1 v_1 = \frac{A_1 A_2}{(A_1^2 - A_2^2)^{1/2}} \sqrt{(2gH)}.$$

(4.8)

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
โดยที่  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$H = (p_1 - p_2)/\rho g + (z_1 - z_2) \quad m = \text{area ratio} = A_1/A_2,$$

$$Q = \frac{A_1}{(m^2 - 1)^{1/2}} \sqrt{(2gH)}.$$

(4.9)

ในการปฏิบัติ มีการสูญเสียที่เกิดขึ้นจากด้าน 1 ไปด้าน 2 ค่า Q จากสมการที่ (4.8) และ (4.9) เป็นค่าที่ได้จากทฤษฎี มีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากการปฏิบัติ

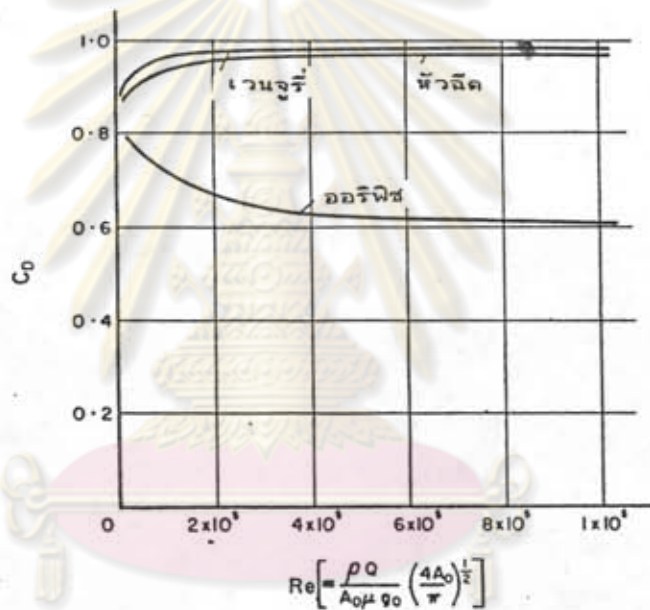


สัดส่วนระหว่างค่าที่วัดได้จริงกับค่าที่ได้จากการคำนวณ กำหนดให้เป็นตัวประกอบการฉีด (Discharge Coefficient)  $C_d$  แสดงได้ด้วยสมการดังนี้

$$Q_{Actual} = \text{อัตราการส่งถ่ายปริมาตรจริง}$$

$$Q_{Theoretical} = \text{อัตราการส่งถ่ายปริมาตรทางทฤษฎี}$$

$$Q_{actual} = C_d \times Q_{theoretical}$$



รูปที่ 4.5 ตัวประกอบการฉีด เทียบกับเลขเรย์โนลด์ สำหรับ เววนจูรี หัวฉีด (Nozzle) และ ออริฟิส

## ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.5 จะเห็นว่าตัวประกอบการฉีดของปรากฏการณ์ เววนจูรี มีค่าเข้าใกล้หนึ่ง ซึ่งขึ้นกับ เลขเรย์โนลด์ การออกแบบตัวใบเช่น แรงเสียดทานที่ผิว รูปทรงของใบ ฯลฯ เพื่อให้ง่ายแก่การคำนวณในวิชานี้แนะนำให้  $C_d = 1$

ค่าของ H ในสมการที่ 4.2 และ 4.3 วัดได้จากมาตรวัดโดยตรง

โดยสมมติให้ของเหลวที่ไหลผ่านมีความหนาแน่น =  $\rho$

เพราะฉะนั้นความดันที่ระดับ XX

$$p_x = p_1 + \rho g(z_1 - z) = p_2 + \rho g(z_2 - z - h) + \rho_{\text{man}} h.$$

ขยายและจัดรูปได้ดังนี้

$$H = (p_1 - p_2)/\rho g + (z_1 - z_2) = h(\rho_{\text{man}}/\rho - 1).$$

แทนลงในสมการที่ 4.9 ได้ดังนี้

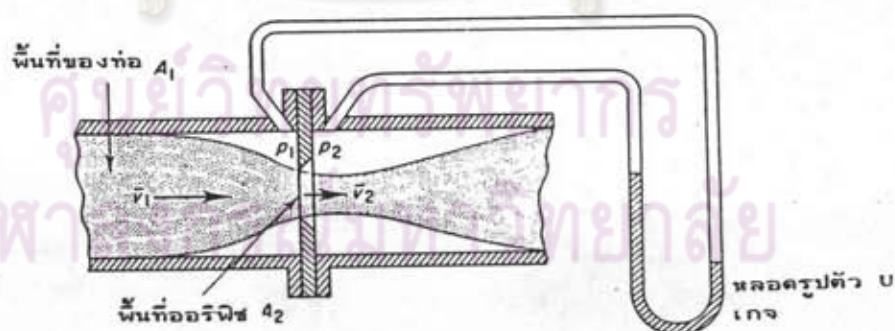
$$Q = \{a_1/(m^2 - 1)^{1/2}\} \sqrt{\left\{2gh \left(\frac{\rho_{\text{man}}}{\rho} - 1\right)\right\}}. \quad (4.10)$$

จะเห็นว่าสมการที่ 4.10 ไม่ขึ้นกับค่า  $Z_1$  และ  $Z_2$  ซึ่งอ่านได้จากมานอมิเตอร์โดยตรง แต่ใช้ค่า  $m$  ในสมการที่ 4.10 เป็นหลัก

ดังนั้นการใช้ความลาดชัน (Slope) ก็เพียงพอที่จะคำนวณหาค่า  $Q$

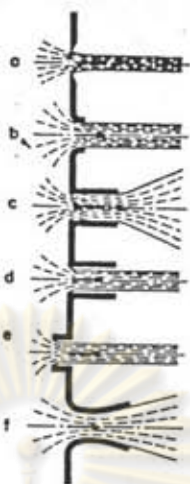
#### 4.3 ผลของออริฟิส (Orifices Effect)

ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.6 มีลักษณะคล้ายกับปรากฏการณ์ เวนจูรี มีความแตกต่างกันคือ ลักษณะเป็นการกั้นลมโดยแผ่นบางๆ หรือช่องแคบ ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าเวนจูรี มีอยู่หลายรูปแบบตามรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.6 ออริฟิสมิเตอร์





รูปที่ 4.7 ชนิดต่างๆของออริฟิซ

ภาคคำนวณใช้สมการที่ 4.8 และ 4.9 เป็นหลัก แตกต่างที่ตัวประกอบการอัด ซึ่งมีค่าต่ำกว่า เนื่องจากการสูญเสียที่สูงกว่า โดยเฉลี่ย  $C_d = 0.65$

#### 4.4 การเสริมปรากฏการณ์เวนจูร์และออริฟิซ เข้ากับใบรูปร่างที่หน้าตัดเหมือนปีกเฮลิคอปเตอร์

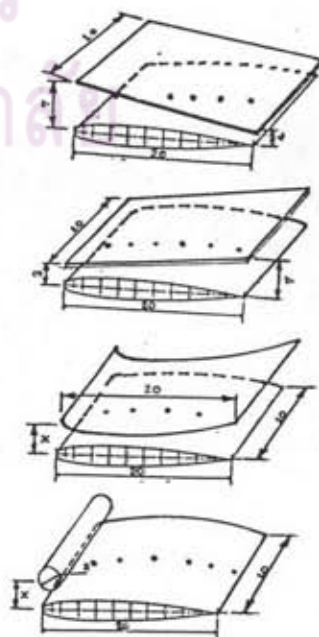
ใช้สมการที่ 4.7 ถึง 4.10 นำมาใช้ในการอธิบายและทดลอง รวมทั้งผลของออริฟิซ โดยใช้ทรงกระบอกกั้นลมไว้ จะกล่าวอีกครั้งในผลการทดลอง

รูปที่ 4.8 แสดงถึงปรากฏการณ์เวนจูร์

รูปที่ 4.9 กลับแผ่นเพลตลง

รูปที่ 4.10 ปรากฏการณ์เวนจูร์

รูปที่ 4.11 ผลของออริฟิซ



4.5 แรงดัน จากรูปที่ 4.9 ค่าตัวประกอบแรงลากของเพลต และ อื่นๆจะเห็น ว่า  $C_d$  ของเพลตที่มีค่าสูงสุด ใบที่สับดีไปมาของแบบจำลองที่สร้างขึ้น เพื่อให้แรงลากสูงสุด เมื่อไม่มีทิศทางตามลม

และเพื่อหลีกเลี่ยงปรากฏการณ์เวนจูรี ซึ่งไม่ต้องการให้เกิดขึ้นในตำแหน่งนี้ เหตุผลต่างๆนั้นสามารถอธิบายในด้านการคำนวณ ดูได้จากตัวประกอบแรงลาก

ตารางแสดงถึงค่าตัวประกอบแรงลากสำหรับรูปทรงต่างๆ

วัตถุ	สัดส่วน	รูปทรง	$C_d$
แผ่นสี่เหลี่ยม กว้าง $a$ ยาว $b$	1		1.16
	4		1.17
	8		1.23
	12.5		1.34
	25		1.57
	50		1.76
จาน $z$ แบนอยู่ข้างกั้น - $z$	1		0.93
	1.5		0.78
	2		1.04
	3		1.52
รูปทรงกระบอก	1		0.91
	2		0.85
	4		0.87
	7		0.99
จาน			1.11
ทรงกลมครึ่งใบ คมหน้าโค้ง			0.41
ทรงกลมครึ่งใบ คมหน้าเรียบ			1.35
รูปทรงกรวย ปลายปิด			$\alpha = 60^\circ, 0.51$ $\alpha = 30^\circ, 0.34$

แรงที่เกิดบนเพลตได้จากสมการที่ (2.10)

$S$  = พื้นที่ใบ เปลี่ยนแปลงค่าต่างๆได้ในการทดลอง โดยการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเพื่อนำมาสร้างกังหันลมในภาคสนาม