เฉลิมพระเกียรติ สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 ประเภทของเครื่องสูบน้ำ

เครื่องสูบน้ำแบ่งออกเป็นประเภทใหญ่ ๆ ได้ 2 ประเภท คือ

2.1.1 ประเภทเคลื่อนไหวไม่ต่อเนื่อง (Positive displacement pump) ของไหลที่ไหลเข้าสู่เครื่องสูบน้ำประเภทนี้ จะไหลเข้าสู่เครื่องในจังหวะที่เกิดความดันต่ำภายในตัวเครื่องสูบน้ำ และถูกแรงกระทำจากลูกสูบหนือตัวโรเตอร์อัดออกจากตัวเครื่องสูบน้ำ เครื่องสูบน้ำประเภทนี้ได้แก่ เครื่องสูบน้ำแบบลูกสูบชัก (Reciprocating pump), แบบตัวหมุนเป็นเฟืองขบกัน (Gear pump) และตัวหมุนเป็นแผ่น (Vane pump) เป็นต้น

2.1.2 เครื่องสูบน้ำแบบหมุนพลวัต (Rotodynamic pump) ของเหลวที่ไหลเข้าสู่เครื่องสูบน้ำประเภทนี้จะถูกเร่งให้เกิดความเร็วสูงขึ้นโดยใบพัดของเครื่องสูบน้ำ และหลังจากนั้นความเร็วจะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของความดัน เครื่องสูบน้ำประเภทนี้ได้แก่ เครื่องสูบน้ำแบบหอยโข่ง (Centrifugal pump) และแบบไหลตามแนวแกน (Axial flow pump) เครื่องสูบน้ำประเภทนี้ยังแบ่งออกเป็นแบบต่าง ๆ ตามทิศทางการไหลได้ 3 แบบ คือ

ก) Radial flow pump เครื่องสูบน้ำแบบนี้ จะทำให้ของไหลที่ไหลออกจากใบพัดมีลักษณะการไหลในแนวรัศมีและแนวเส้นสัมผัส เครื่องสูบน้ำแบบนี้ได้แก่ เครื่องสูบน้ำแบบหอยโข่ง (Centrifugal pump) เหมาะสำหรับงานที่ต้องการหัวความดันสูงและอัตราการไหลไม่มาก

ข) Axial flow pump เครื่องสูบน้ำแบบนี้ จะทำให้ของไหลที่ไหลออกจากใบพัดมีลักษณะการไหลในแนวแกนและแนวเส้นสัมผัส เหมาะสำหรับงานที่ต้องการอัตราการไหลสูงและหัวความดันต่ำ เช่นงานระบายน้ำ

ค) Mixed flow pump เครื่องสูบน้ำแบบนี้ เป็นแบบรวมลักษณะการไหลแบบ Radial flow และ Axial flow เข้าด้วยกัน ดังนั้นของไหลที่ไหลออกจากใบพัดจึงมีทั้งลักษณะการไหลแบบแนวแกน แนวรัศมี และแนวเส้นสัมผัส

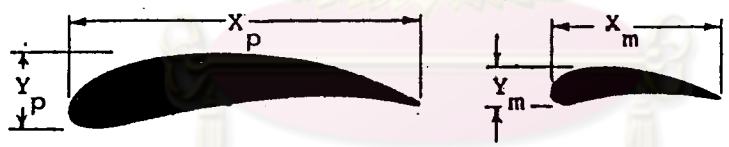
2.2 กฎของความคล้ายคลึงกัน (Similarity Law)

ในการศึกษาเรื่องเครื่องสูบน้ำแบบไหลตามแนวแกน เราอาจศึกษาจากการทำงานของเครื่องสูบน้ำที่มีใบจักรคล้ายคลึงกัน

ถ้าเราอยากเห็นการทำงานของใบจักรที่มีลักษณะการทำงานคล้ายคลึงกัน ใบจักรทั้งสองจะต้องมีความคล้ายคลึงกันดังต่อไปนี้

1. มีความคล้ายคลึงกันทางเรขาคณิต (Geometric Similarity) หมายถึง ความคล้ายคลึงกันทางด้านรูปร่าง หุ่นจำลองจะมีความคล้ายคลึงทางเรขาคณิตกับตัวต้นแบบก็ต่อเมื่อ มิติเชิงเส้น (Linear dimension) ของหุ่นจำลองและของตัวต้นแบบที่อยู่ในลักษณะเดียวกัน จะต้องมีอัตราส่วนที่เท่ากัน หรือเรียกว่ามีสเกล (Scale) คงที่ ดังนั้นถ้าจะอธิบายโดยอาศัยรูปที่ 2.1 ประกอบแล้ว หุ่นจำลองจะมีความคล้ายคลึงทางเรขาคณิตก็ต่อเมื่อ

$$\frac{X_p}{X_m} = \frac{Y_p}{Y_m} = L_r$$



รูปที่ 2.1 มิติเชิงเส้นที่อยู่ในลักษณะเดียวกัน

(อ้างอิง 8)

เราเรียก L_r นี้ว่าอัตราส่วนของสเกล (Scale ratio) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างมิติเชิงเส้นของตัวต้นแบบต่อมิติเชิงเส้นที่อยู่ในลักษณะเดียวกันของหุ่นจำลอง ดังนั้นอัตราส่วนของพื้นที่บนตัวต้นแบบต่อพื้นที่บนหุ่นจำลองก็จะแปรตาม L_r^2 และอัตราส่วนของปริมาตรก็จะแปรตาม L_r^3 สำหรับผลที่ได้จากการที่มีความคล้ายคลึงทางเรขาคณิตของหุ่นจำลองกับตัวต้นแบบก็คือ ลักษณะการไหลของของไหลรอบ ๆ หุ่นจำลองกับรอบ ๆ ตัวต้นแบบจะคล้ายคลึงกัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2. ความคล้ายคลึงกันทางด้านจลศาสตร์ (Kinematic Similarity) หมายถึง ความคล้ายคลึงกันทางด้านการเคลื่อนที่ หุ่นจำลองกับตัวต้นแบบ จะมีความคล้ายคลึงกันทางด้านการเคลื่อนที่ได้ก็ต่อเมื่อ หุ่นจำลองกับตัวต้นแบบมีความคล้ายคลึงทางเรขาคณิตอยู่ก่อนแล้ว นอกจากนี้อัตราส่วนของความเร็วที่จุดต่าง ๆ ของหุ่นจำลองกับตัวต้นแบบที่สอดคล้องกัน จะต้องเท่ากันอีกด้วย

ถ้าให้ตัวห้อยท้าย p และ m หมายถึงตัวต้นแบบและหุ่นจำลองแล้ว อัตราส่วนของความเร็ว คือ V_r ก็จะมีค่าเป็น

$$V_r = \frac{V_p}{V_m}$$

$$= \frac{L_p/T_p}{L_m/T_m}$$

$$= \frac{L_r}{T_r}$$

อัตราส่วนของความเร่ง $A_r = \frac{A_p}{A_m}$

$$= \frac{L_p/T_p^2}{L_m/T_m^2}$$

$$= \frac{L_r}{T_r^2}$$

3. ความคล้ายคลึงกันทางด้านพลศาสตร์ (Dynamic Similarity) หมายถึง ความคล้ายคลึงทางด้านของแรงที่กระทำต่อวัตถุ หุ่นจำลองจะมีความคล้ายคลึงทางด้านพลศาสตร์กับตัวต้นแบบก็ต่อเมื่อ อัตราส่วนของแรงที่กระทำต่อหุ่นจำลองกับตัวต้นแบบที่กระทำในลักษณะเดียวกันจะต้องเท่ากัน แรงกระทำที่มีผลต่อการไหลที่สำคัญ ๆ ได้แก่ แรงเนื่องจากความโน้มถ่วงของโลก F_G, แรงเนื่องจากความดัน F_p, แรงเนื่องจากความหนืด F_v, แรงเนื่องจากความยืดหยุ่น F_E, แรงเนื่องจากความตึงผิว F_T

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถ้าหากผลบวกของแรงที่กระทำต่อวัตถุที่อยู่ในของไหลไม่เท่ากับศูนย์ วัตถุนั้นก็จะมีความเร็วตามกฎของนิวตัน เราสามารถเปลี่ยนระบบที่แรงไม่สมดุลย์นี้เป็นระบบที่สมดุลย์ด้วยการเพิ่มแรงเฉื่อย F_I ให้แก่ระบบที่แรงไม่สมดุลย์นั้น แรงเฉื่อย F_I นี้มีขนาดเท่ากับแรงลัพธ์ R แต่มีทิศทางตรงกันข้างกับแรง R ดังนั้น

$$\varepsilon F = F_G + F_p + F_v + F_E + F_T = R$$

เนื่องจาก $F_I = -R$

$$\therefore \quad F_G + F_p + F_v + F_E + F_T + F_I = 0$$

แรงเหล่านี้สามารถเขียนอยู่ในรูปง่าย ๆ ดังนี้คือ

$$F_G = mg = \rho L^3 g$$

$$F_p = \Delta p.a = \Delta p.L^2$$

$$F_v = \mu (du/dy) A = \mu (V/L) L^2 = \mu VL$$

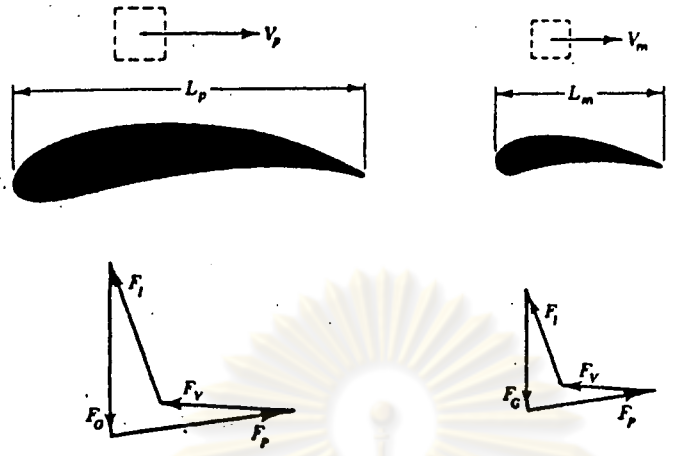
$$F_E = E_v A = E_v L^2$$

$$F_T = \sigma L$$

$$F_I = ma = \rho L^3 \frac{V^2}{L} = \rho V^2 L^2$$

ในปัญหาเกี่ยวกับการเคลื่อนที่เป็นจำนวนมาก แรงบางแรงจะไม่มี หรือมีแต่ก็มีความสำคัญน้อย ในรูปที่ 2.2 แสดงให้เห็นวัตถุที่อยู่ในของไหลสองชิ้นที่มีความคล้ายคลึงทางด้านเรขาคณิต และมีความคล้ายคลึงทางจลศาสตร์อยู่ด้วย โดยมีแรงต่าง ๆ กระทำต่อวัตถุดังต่อไปนี้ คือ F_G, E_p, F_v และ F_I ในกรณีดังกล่าวนี้ ระบบทั้งสองจะมีความคล้ายคลึงทางด้านพลศาสตร์ได้ต่อเมื่อ

$$\frac{(F_G)_p}{(F_G)_m} = \frac{(F_p)_p}{(F_p)_m} = \frac{(F_v)_p}{(F_v)_m} = \frac{(F_I)_p}{(F_I)_m}$$



ก) ตัวต้นแบบ ข) หุ่นจำลอง

รูปที่ 2.2 วัตถุสองชิ้นที่มีความคล้ายคลึงทางด้านพลศาสตร์

(อ้างอิง 8)

ในการใช้แบบจำลองเพื่อการออกแบบหรือทดสอบเครื่องสูบน้ำ นอกจากจะต้องมีสภาพเหมือนกันทางเรขาคณิตแล้ว ภาพเวคเตอร์ความเร็วของของไหลที่ทางเข้าและทางออกของใบจักรจะต้องคล้ายคลึงกันอีกด้วย ในกรณีนี้ผลจากความหนืดจำเป็นต้องตัดออก ทั้งนี้เนื่องจากไม่อาจที่จะได้สภาพเหมือนทั้งสองชนิด พร้อมกันในเวลาเดียวกันทั้งต้นแบบและแบบจำลอง

เราสามารถสร้างกฎความคล้ายคลึงกันเหล่านี้ได้จากการวิเคราะห์มิติหน่วยวัด (Dimensional analysis) สำหรับตัวแปรสำคัญที่มีผลกระทบต่อการทำงานของเครื่องสูบน้ำ ก็คือ

p = ความดัน

Q = อัตราการไหล

P = กำลังที่ส่งผ่านเพลา

N = ความเร็วรอบ

D = เส้นผ่าศูนย์กลางของตัวใบพัด (Impeller)

ρ = ความหนาแน่นของของไหล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

มีจำนวนตัวแปรทั้งหมด $n = 6$

มีมิติตัวแปร $m = 3$

โดยวิธีการของ Buckingham $\P$ - THEOREM (15)

จะต้องมีตัวแปรไร้หน่วย ($\P$) $= n-m$

$= 6-3$

$= 3$ จำนวน

$f(p, Q, P, N, D, \rho) = 0$

เรากำหนดให้ ρ, N, D เป็นตัวแปรที่เกิดขึ้นในทุก $\P$

$$\P_1 = \rho^a N^b D^c p$$

$$M^0 L^0 T^0 = M^a L^{-3a} . T^{-b} . L^c . ML^{-1} T^{-2}$$

$$a+1 = 0$$

$$-3a+c-1 = 0$$

$$-b-2 = 0$$

$\therefore$ $a = -1$, $b = -2$, $c = -2$

$$\P_1 = \frac{p}{\rho N^2 D^2}$$

$$\P_2 = \rho^d N^e D^f Q$$

$$M^0 L^0 T^0 = M^d . L^{-3d} . T^{-e} . L^f . L^3 T^{-1}$$

$$d = 0$$

$$-3d+f+3 = 0$$

$$-e-1 = 0$$

$\therefore$ $d = 0$, $e = -1$, $f = -3$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$\P_2 = \frac{Q}{ND^3}$$

$$\P_3 = \rho^x N^y D^z . P$$

$$M^0 L^0 T^0 = M^x L^{-3x} . T^{-y} . L^z . ML^2 T^{-3}$$

$$x+1 = 0$$

$$-3x+z+2 = 0$$

$$-y-3 = 0$$

$$\therefore x = -1, \quad y = -3, \quad z = -5$$

$$\P_3 = \frac{P}{\rho N^3 D^5}$$

ซึ่งจะเห็นได้ว่า ถ้าให้ใบจักร 2 ใบ ทำงานได้คล้ายคลึงกันทุกประการจะต้องมี

$$\frac{P_1}{\rho_1 N_1^2 D_1^2} = \frac{P_2}{\rho_2 N_2^2 D_2^2} \quad \text{.....(2.1)}$$

$$\frac{Q_1}{N_1 D_1^3} = \frac{Q_2}{N_2 D_2^3} \quad \text{.....(2.2)}$$

$$\frac{P_1}{\rho_1 N_1^3 D_1^5} = \frac{P_2}{\rho_2 N_2^3 D_2^5} \quad \text{.....(2.3)}$$

แต่การที่จะทำให้ตัวแปรไร้หน่วยทั้ง 3 เท่ากันพอดีทำได้ยากมาก ดังนั้นเรามักจะถือเอาความสำคัญของความดัน p และอัตราการไหล Q ว่ามีความสำคัญเป็นอันดับต้นและกำลังงาน P เป็นอันดับรอง

แทนค่า $p = \rho g H$ ใน (1)

$$\frac{g_1 H_1}{N_1^2 D_1^2} = \frac{g_2 H_2}{N_2^2 D_2^2}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค่า g ที่สถานที่ต่าง ๆ บนผิวโลก มีค่าประมาณเท่ากันจะได้

$$\frac{H_1}{N_1^2 D_1^2} = \frac{H_2}{N_2^2 D_2^2} \quad \text{.....(2.4)}$$

(2) และ (4) รวมกันจะได้

$$\frac{N_1 \sqrt{Q_1}}{H_1^{3/4}} = \frac{N_2 \sqrt{Q_2}}{H_2^{3/4}}$$

ดังนั้นค่า $\frac{N\sqrt{Q}}{H^{3/4}}$ จะเป็นตัวเลขที่บอกความคล้ายคลึงกันของใบจักร

$$\frac{N\sqrt{Q}}{H^{3/4}} = \text{ค่าคงที่}$$

ความเร็วจำเพาะ (Specific speed). $N_s = \frac{N\sqrt{Q}}{H^{3/4}}$

ความเร็วจำเพาะ (N_s) คือความเร็วของเครื่องที่ขนาดกำหนดซึ่งสามารถสูบของไหลได้ หัวความดันสูง 1 หน่วย และได้อัตราการไหล 1 หน่วย

2.3 <u>ดัชนีความเร็วขอบ</u> (Peripheral velocity factor)

ดัชนีความเร็วขอบ (ϕ) คืออัตราส่วนของความเร็วขอบกับค่า $\sqrt{2gh}$

$$\phi = \frac{u}{\sqrt{2gh}}$$

$$\omega = \frac{u}{r} = \frac{\phi\sqrt{2gh}}{r}$$

ถ้าใช้ความเร็วเป็นจำนวนรอบต่อนาที จะได้

$$N = \frac{60\ u}{\P D} = \frac{60\ \phi\sqrt{2gh}}{\P D}$$

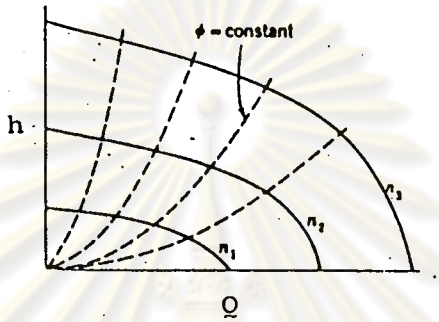
ซึ่งอาจเขียนได้ในรูป $ND = 265.7\ \phi\sqrt{h}$ ในหน่วย SI

ค่าความเร็วที่ขอบอาจจะแปรเปลี่ยนได้ตั้งแต่ศูนย์ถึงค่าสูงสุดเท่าที่สามารถจะได้จาก head อันทำให้ค่า ϕ แปรเปลี่ยนได้เป็นพิสัยกว้าง แต่ความเร็วที่ใช้ประโยชน์มากคือ ค่า

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ความเร็วที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุด ค่า ϕ ที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของเครื่องสูบน้ำ แต่เครื่องสูบน้ำที่คล้ายคลึงกันค่า ϕ นี้จะเป็นค่าคงที่ ค่า ϕ เชิงทฤษฎีของแต่ละสภาพอาจคำนวณหาออกมาได้ แต่โดยทั่วไปมักหาจากการทดลอง

2.4 ข้อจำกัดในการใช้กฎของความคล้ายคลึงกัน (Restriction on use of Similarity Law)



รูปที่ 2.3 สมรรถนะของเครื่องสูบน้ำที่ความเร็วรอบคงที่

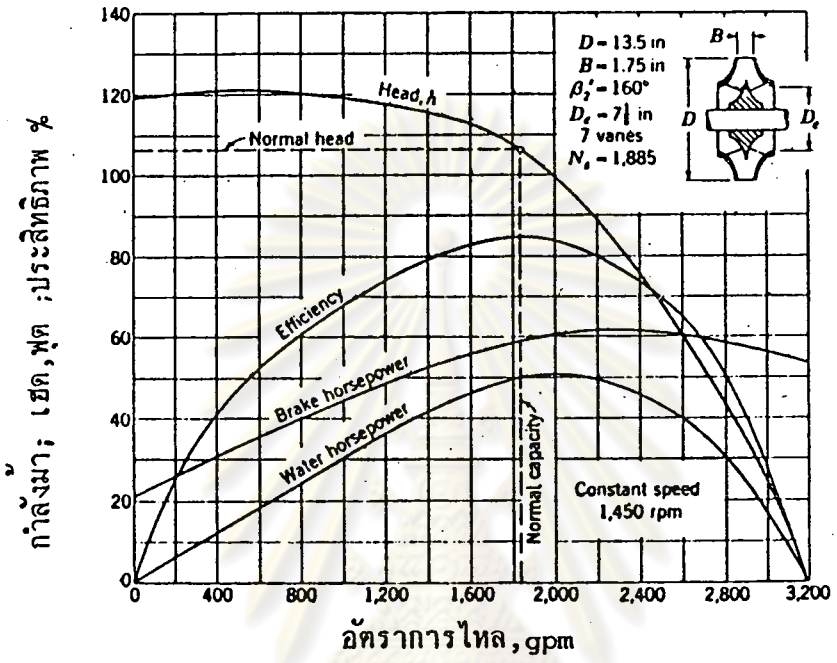
(อ้างอิง 9)

พิจารณาจากรูปที่ 2.3 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง H และ Q ของเครื่องสูบน้ำแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์ ซึ่งหมุนด้วยความเร็วรอบคงที่ N_1 เส้นกราฟที่ได้หามาจากการทดลอง เนื่องจากยังไม่มีทฤษฎีที่ให้เส้นกราฟในรูปง่าย ๆ และถูกต้อง ที่ความเร็วรอบอื่น ๆ เช่น N_2 สมการ(2.4) อาจเขียนได้ในรูป $H_2 = H_1(N_2/N_1)^2$ และสมการ(2.2) อาจเขียนได้ในรูป $Q_2 = Q_1(N_2/N_1)$ ดังนั้นจุดที่มีค่า H_2 และ Q_2 ที่ค่า ϕ เดียวกัน จะอยู่บนเส้นโค้งพาราโบลาที่ลากผ่านจุดกำเนิด (Origin) ดังนั้นถ้าหากต้องการใช้กฎความคล้ายคลึงกันระหว่างจุด 2 จุดแล้ว จุดทั้งสองจะต้องมีค่า ϕ เดียวกัน แต่ลักษณะของเส้น ϕ คงที่ในแผนภาพใด ๆ จะขึ้นอยู่กับชนิดของแผนภาพนั้น

2.5 ลักษณะการทำงานของเครื่องสูบน้ำที่ความเร็วคงที่

แม้ว่าเครื่องสูบน้ำแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์บางเครื่องจะได้รับการขับเคลื่อนโดยมอเตอร์ไฟฟ้าที่เปลี่ยนความเร็วรอบได้ก็ตาม แต่โดยปกติแล้วเครื่องสูบน้ำจะให้งานที่ความเร็วคงที่ ตัวอย่างคุณสมบัติของเครื่องสูบน้ำแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์ที่มีความเร็วคงที่นี้ มีลักษณะดังรูปที่ 2.4 เส้นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเฮดกับอัตราการไหลของรูปนี้ สามารถที่จะเปลี่ยนเป็นเส้นกราฟที่ความเร็วรอบอื่น ๆ ได้โดยใช้กฎความคล้ายคลึงกัน ($Q \alpha N$ และ $H \alpha N^2$) แต่ที่ความเร็วรอบ

อื่นนั้น เครื่องสูบน้ำจะมีประสิทธิภาพต่ำ เพราะความเร็วรอบเปลี่ยนไปจากตำแหน่งดีสุด (ประสิทธิภาพสูงสุด)

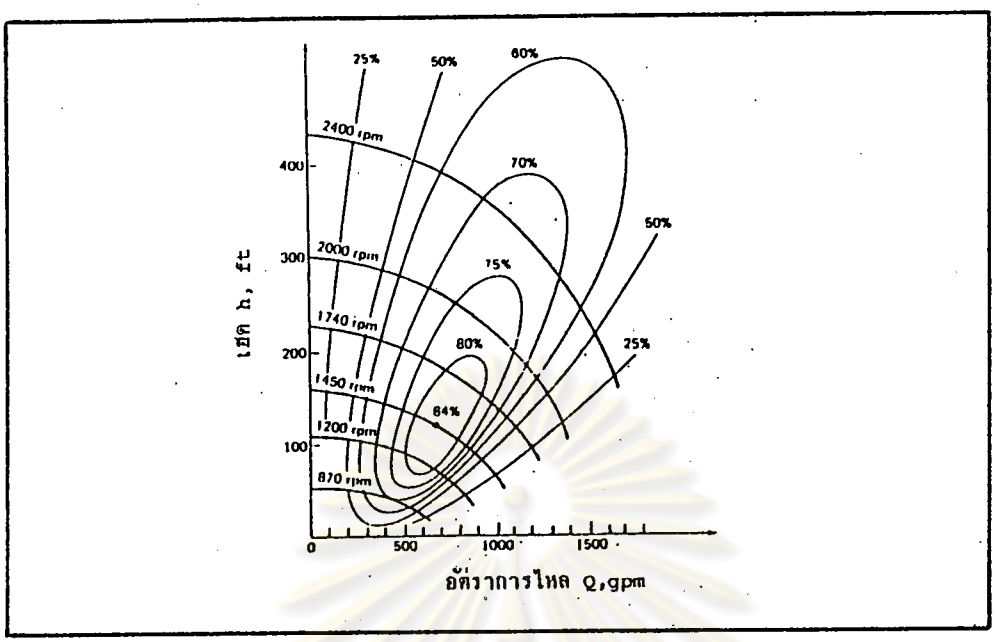


รูปที่ 2.4 คุณสมบัติพิเศษของเครื่องสูบน้ำแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์เมื่อความเร็วคงที่ (อ้างอิง 9)

เพื่อให้เห็นจุดดังกล่าวก็จะต้องเขียนกราฟที่พล็อตระหว่างเฮดกับอัตราการไหลที่ได้จากการทดสอบที่ความเร็วต่าง ๆ จากนั้นก็เขียนเส้น Contour ของประสิทธิภาพคงที่ซ้อนลงไปดังรูปที่ 2.5 จะเห็นได้จากกราฟว่า ตรงจุดที่ใช้งานได้ดีที่สุดนั้น เครื่องสูบน้ำจะให้อัตราการไหล 700 gpm โดยมีเฮด 120 ฟุต ที่ความเร็วรอบ 1450 rpm สาระสำคัญที่ได้จากรูปที่ 2.5 นี้ก็คือ ถ้าหากไม่ใช้งานเครื่องสูบน้ำตรงจุดที่มีประสิทธิภาพสูงสุดแล้ว เครื่องสูบน้ำก็จะมีประสิทธิภาพต่ำ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระยะห่างที่วัดจากจุดที่ที่มีประสิทธิภาพสูงสุดนั้น

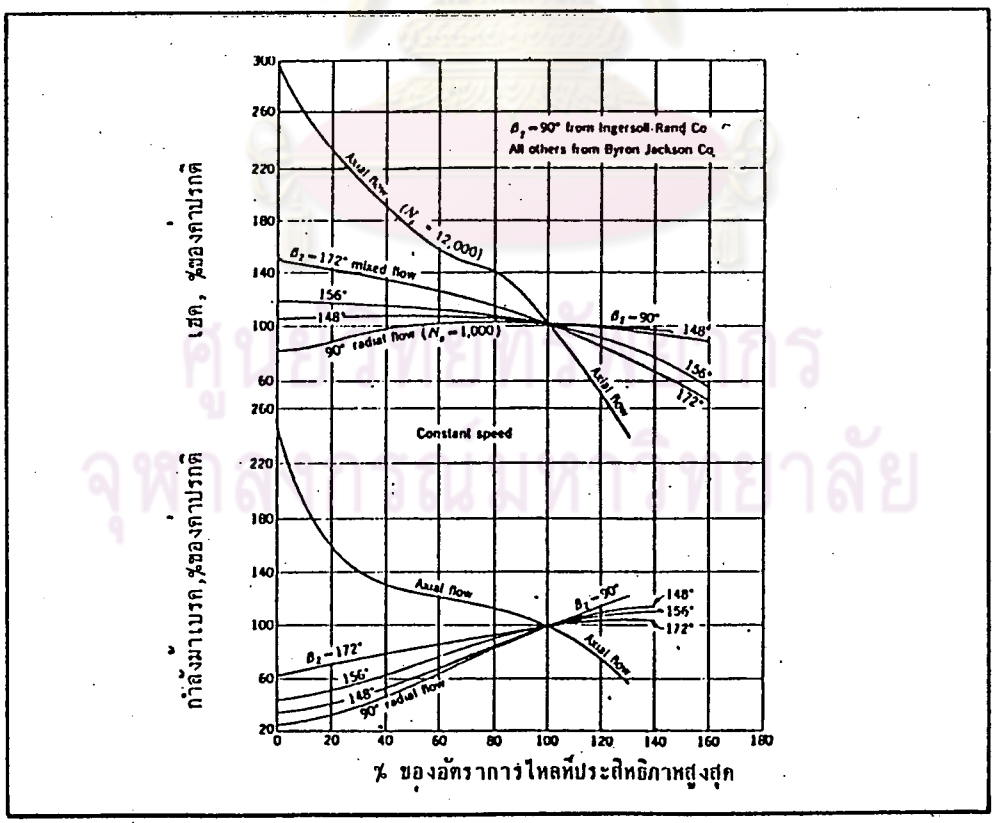
คุณสมบัติพิเศษเหล่านี้เปลี่ยนแปลงได้ตามแบบของใบพัดที่ได้ออกแบบไว้ (ดังรูปที่ 2.6) ซึ่งแต่ละแบบก็มีข้อดี สำหรับการใช้งานโดยเฉพาะของมันเอง เครื่องสูบน้ำที่มีเส้นกราฟของประสิทธิภาพที่แบนราบ จะสามารถเปลี่ยนอัตราการไหลได้มากค่า โดยที่เฮดจะเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ส่วนเครื่องสูบน้ำที่มีเส้นประสิทธิภาพสูงชัน เมื่อเปลี่ยนอัตราการไหลเพียงเล็กน้อย เฮดจะเปลี่ยนแปลงมาก

013442



รูปที่ 2.5 คุณสมบัติพิเศษของเครื่องสูบน้ำแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์ที่ความเร็วต่าง ๆ โดยมีเส้น contour ของประสิทธิภาพร่วมอยู่ด้วย

(อ้างอิง 9)



รูปที่ 2.6 คุณสมบัติพิเศษระหว่างเฮดกับอัตราการไหลของเครื่องสูบน้ำแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์ และแบบไหลตามแนวแกน

(อ้างอิง 9)

เครื่องสูบน้ำแบบไหลตามแนวแกน จะมีเส้นกราฟระหว่างเฮด-อัตราการไหลชันกว่าแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์ และแทนที่จะต้องใช้กำลังในการขับเคลื่อนตรงจุดที่ไม่มีการไหล (Shutoff) ต่ำสุดเหมือนของแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์ก็กลับจะต้องใช้กำลังมากสุด และมีค่ามากกว่ากำลังที่ต้องใช้ตรงจุดที่มีประสิทธิภาพสูงสุดอีกด้วย ซึ่งก็เป็นข้อเสียของเครื่องสูบน้ำแบบไหลตามแนวแกนเมื่อเริ่มเดินเครื่องและการใช้งานที่อัตราการไหลต่ำ

2.6 <u>พลังงานที่สูญเสียไปในเครื่องสูบน้ำ</u> (Energy losses in pump)

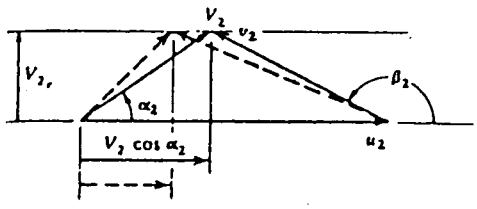
การสูญเสียของเครื่องสูบน้ำ แบ่งออกเป็นประเภทใหญ่ ๆ ได้ 2 ประเภท คือ การสูญเสียเชิงชลศาสตร์ (Hydraulic losses) และ การสูญเสียเชิงกล (Mechanical losses)

การสูญเสียเชิงชลศาสตร์ (Hydraulic losses) ได้แก่

1. การสูญเสียในขณะที่น้ำไหลเข้าสู่ครีบใบพัด จะมีการสูญเสียจากการไหลสะดุด (Shock loss) เนื่องจากความอลวนของการไหล (Turbulent) เพราะมุมที่ความเร็วสัมพัทธ์ของการไหล กระทบกับใบจักรมีขนาดไม่พอเหมาะ ถ้าเครื่องสูบทำงานตรงตามที่ออกแบบเอาไว้ การสูญเสียนี้จะต่ำที่สุด เพราะในการออกแบบจะพยายามให้การสูญเสียเนื่องจากการกระแทกซึ่งก่อให้เกิดความอลวน (Turbulent) ต่ำ หรือแทบไม่เกิดเลยอยู่แล้ว แต่เนื่องจากเครื่องสูบมักถูกใช้งานที่ความเร็วรอบอื่น ๆ ซึ่งมุมกระทบจะไม่เป็นไปตามที่ออกแบบ ความสูญเสียที่เกิดขึ้นจะเป็นสัดส่วนกำลังสองของมุมที่บ่ายเบนไปจากมุมที่ออกแบบไว้

2. การสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานของการไหล(Skin friction losses) ระหว่างของไหลกับใบจักร และระหว่างของไหลกับโครงรอบ ความสูญเสียนี้จะเป็นสัดส่วนกำลังสองกับอัตราการไหล

3. การสูญเสียเนื่องจากการไหลวน (Circulation loss) รอบ ๆ ใบจักร ซึ่งเกิดจากความแตกต่างของความดันที่ด้านทั้งสองของใบจักรแต่ละใบ การไหลวนนี้จะทำให้ความเร็วของน้ำทางด้านหน้าของใบจักรลดต่ำลง แต่จะทำให้ความเร็วของน้ำทางด้านหลังของใบจักรเพิ่มสูงขึ้น ผลจากการที่ความเร็วกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ คือ ทำให้มุมเฉลี่ย β_2 ของน้ำที่ไหลออกจากใบจักรมีขนาดโตกว่ามุม β_2' ของใบจักร (ดูรูปที่ 2.7) อันทำให้ค่า V_{u2} น้อยลงกว่าที่ควรจะได้ ความสูญเสียที่เกิดขึ้นนี้จะแปรค่ามากน้อยตามอัตราการไหล

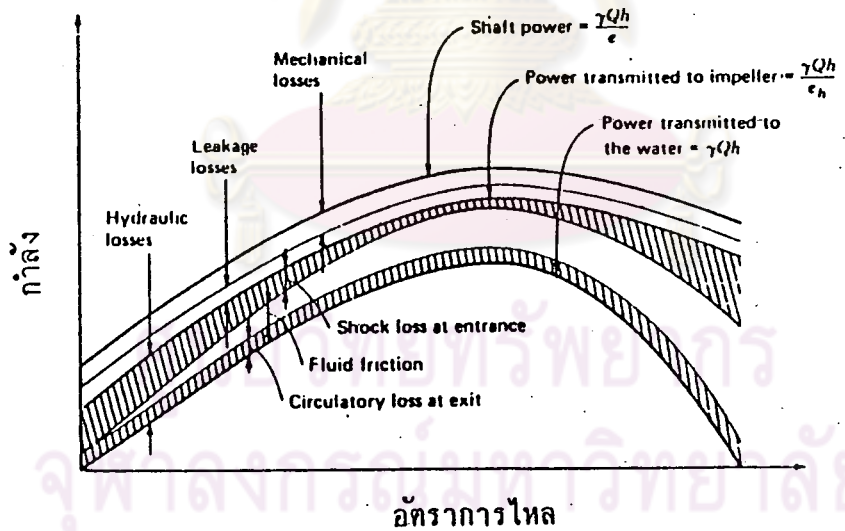


รูปที่ 2.7 ผลกระทบจากการไหลวนที่ทางออกของครีบ เส้นทึบเป็นความเร็วตามทฤษฎี เมื่อของไหลมีมุม $\beta_2 = \beta_2'$ ของครีบ

(อ้างอิง 9)

ความสูญเสียเชิงกล (Mechanical losses) ของเครื่องสูบมักเกิดจากความฝืดระหว่างชิ้นส่วนที่ต้องสัมผัสกัน เช่น Bearing นอกจากนี้ชิ้นส่วนต่าง ๆ ของเครื่องสูบไม่สามารถออกแบบมาให้มีขนาดพอดีกันตลอด จำต้องมีช่องว่างระหว่างส่วนประกอบต่าง ๆ อันทำให้เกิดการรั่วไหลได้

ตัวอย่างที่แสดงความสัมพันธ์ของการสูญเสียพลังงานเหล่านี้ แสดงอยู่ในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 กำลังที่ถูกใช้ไปกับเครื่องสูบน้ำที่เซตต่าง ๆ เมื่อมีความเร็วคงที่

(อ้างอิง 9)

2.7 <u>ทฤษฎีการเปลี่ยนโมเมนตัม</u> (Momentum)

ในการพิจารณาทฤษฎีของเครื่องสูบน้ำแบบไหลตามแนวแกนในที่นี้ มีข้อสมมุติฐานดังต่อไปนี้ คือ

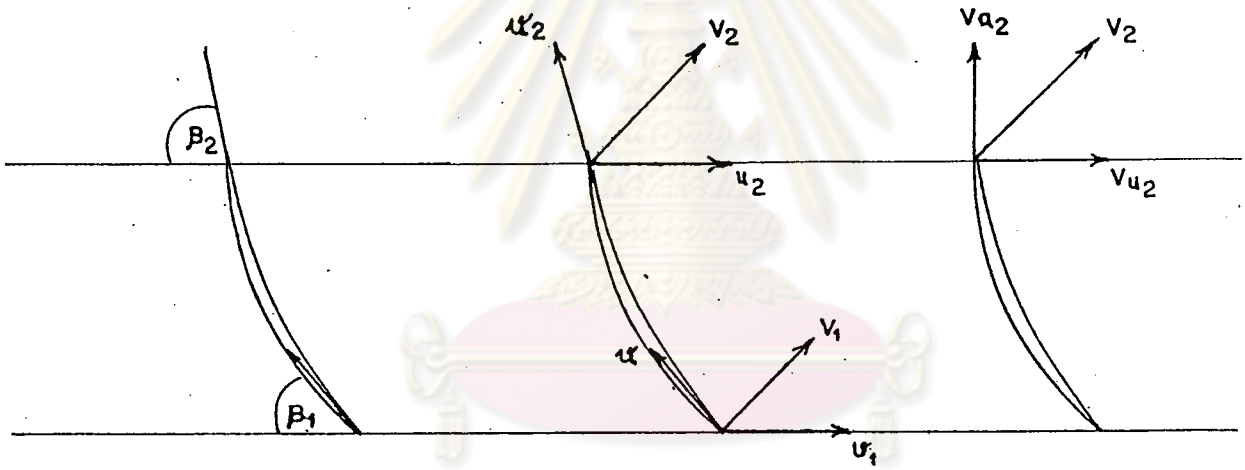
1. ของไหลเป็นของไหลซึ่งอัดตัวไม่ได้ (Incompressible fluid)

2. อัตราการไหลมีค่าคงที่ (Steady flow)

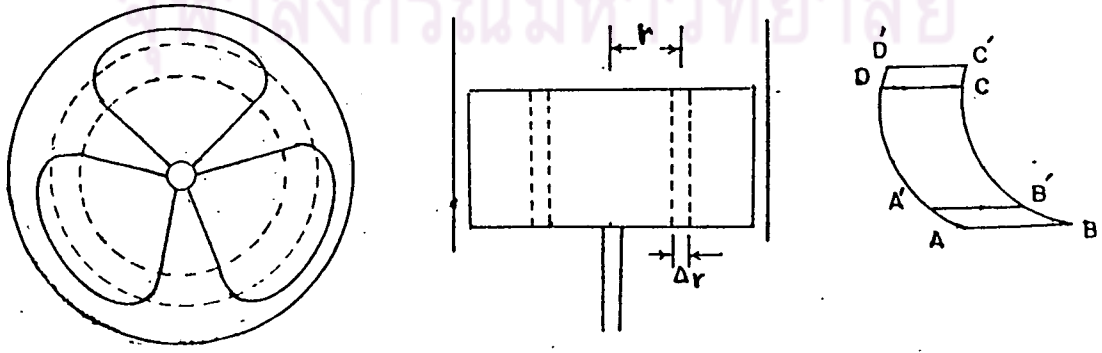
3. ไม่นำเอาความฝืดเข้ามาเกี่ยวข้อง

4. ไม่มีการไหลในแนวเส้นสัมผัสที่ทางเข้าของครีบใบพัด

จากรูปที่ 2.9 เมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่ของของไหลที่ไหลผ่านตัวใบพัด (Impeller) จะเห็นได้ว่า พื้นที่หน้าตัดของช่องทางที่ของไหลไหลผ่านนั้น ประกอบด้วยส่วนของวงแหวนที่มีรัศมีแตกต่างกัน ดังนั้นจึงนิยมคำนวณแรงบิด (Torque) ที่เกิดขึ้นกับตัวใบพัด (Impeller) มากกว่าแรงที่กระทำกับครีบใบพัด (Vane)



ก. รูปใบจักรต่อเนื่องและเวคเตอร์ความเร็ว



ข. รูปวงแหวนปริมาตรของการไหล

รูปที่ 2.9 แสดงเวคเตอร์ของความเร็วที่ใบพัด และแสดงวงแหวนของปริมาตรการไหล

การเปลี่ยนแปลงพลังพล (Momentum) ของของไหลที่ไหลผ่านปริมาตรควบคุม (Control volume) ในช่วงเวลา Δt คำนวณหาได้จากการพิจารณาการเคลื่อนที่ของมวลของไหลจากตำแหน่ง ABCD ไปยังตำแหน่ง $A'B'C'D'$ เนื่องจากมวลของไหลใน $A'B'CD$ ไม่มีการเปลี่ยนพลังพล (Momentum) ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงพลังพลของมวลของไหลในแนวเส้นสัมผัสจะเป็น

$$\Delta mV = mV_{u2} - mV_{u1}$$

$$\Delta mV = \rho\Delta Q\ \Delta t\ V_{u2} - \rho\Delta Q.\Delta t.V_{u1}$$

$$\frac{\Delta mV}{\Delta t} = \rho V_{u2}\ \Delta Q - \rho V_{u1}\ \Delta Q$$

จากกฎการเคลื่อนที่ข้อที่ 2 ของนิวตัน $F = \frac{d(mV)}{dt}$

$$F = \rho V_{u2} dQ - \rho V_{u1} dQ$$

$$Fr = r\rho V_{u2} dQ - r\rho V_{u1} dQ$$

$$T = Fr$$

$$\varepsilon T = \varepsilon\rho r V_{u2} dQ - \varepsilon\rho r V_{u1} dQ$$

ถ้า εT มีค่าเป็นศูนย์ อย่างการไหลในที่ซึ่งไม่มีใบพัด

$$rV_u = \text{ค่าคงที่}$$

อันเป็นการไหลคงที่ของกระแสวนแบบอิสระ ซึ่งความเร็วในทิศทางเส้นสัมผัสรัศมีเปลี่ยนแปรเป็นส่วนกลับกับรัศมี

ดังนั้น $rV_{u1} = C_1$

$$rV_{u2} = C_2$$

แต่ $V_{u1} = 0$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จะได้ $\varepsilon T = \rho r V_{u2} \varepsilon dQ$

$(\varepsilon T)\omega = \rho r V_{u2} Q\omega$

$P = \rho U_2 V_{u2} Q$

ถ้าไม่มีการสูญเสีย ควรได้กำลังงานจากเครื่องสูบ เท่ากับ $Q\gamma H_i$

$Q\gamma H_i = \rho Q U_2 V_{u2}$

$H_i = \frac{U_2 V_{u2}}{g}$

$H_i = e_h H$

H_i = หัวความดันสุทธิที่ได้จากทางทฤษฎี

H = หัวความดันสุทธิที่ได้จริง

e_h = ประสิทธิภาพทางชลศาสตร์

ดังนั้น $H = \frac{U_2 V_{u2}}{g e_h}$

2.8 ประสิทธิภาพของเครื่องสูบ (Pump efficiency)

ประสิทธิภาพรวม (Overall efficiency, e) ของเครื่องสูบคืออัตราส่วนของกำลังงานที่ได้ กับ กำลังงานที่ใช้

$e = \frac{\gamma Q H}{P}$

Q = อัตราการไหลจริงที่ได้จากเครื่องสูบ

H = หัวความดันสุทธิที่ได้จากเครื่องสูบ

P = กำลังงานที่ใช้ผ่านแกนส่งกำลัง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประสิทธิภาพเชิงชลศาสตร์ (Hydraulic efficiency) e_h ของเครื่องสูบ คือ อัตราส่วนของหัวความดันสุทธิ กับ หัวความดันที่ตัวไรเตอร์ถ่ายเทให้แก่น้ำ

$$e_h = \frac{H}{H'}$$

โดยที่ $H' = H+H_h$

H = หัวความดันสุทธิ

H_h = หัวความดันที่สูญเสียไปเมื่อไหลผ่านตัวไรเตอร์

ประสิทธิภาพเชิงปริมาตร (Volumetric efficiency) e_v ของเครื่องสูบ คือ อัตราส่วนของอัตราการไหลจริงที่ได้จากเครื่องสูบ ต่อ ผลบวกของอัตราการไหลจริงกับอัตราการไหลที่สูญเสียไป

$$e_v = \frac{Q}{Q+Q_L}$$

โดยที่ Q = อัตราการไหลจริงที่ได้จากเครื่องสูบ

Q_L = อัตราการรั่วไหล

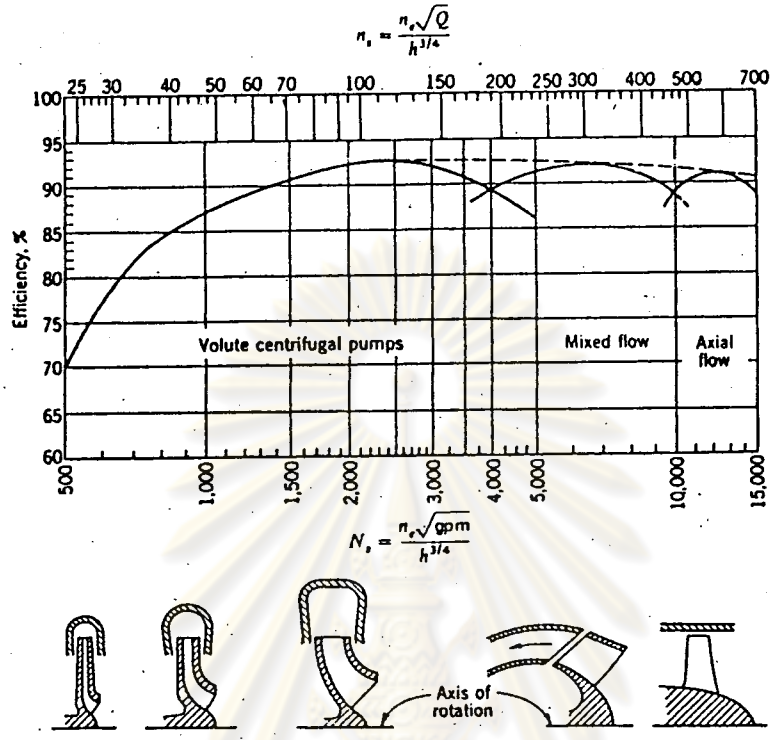
ประสิทธิภาพเชิงกล (Mechanical efficiency) e_m ของเครื่องสูบ คือ อัตราส่วนของกำลังที่ควรจะได้ ต่อ กำลังที่ใช้

$$e_m = \frac{\gamma(Q+Q_L)H}{P}$$

แต่ $$e_h \cdot e_v \cdot e_m = \frac{\gamma QH}{P}$$

ประสิทธิภาพรวม, $e = e_h \cdot e_v \cdot e_m$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.10 ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดของเครื่องสูบน้ำในฟังก์ชั่นของความเร็วจำเพาะ (อ้างอิง 9)

รูปที่ 2.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วจำเพาะ กับประสิทธิภาพที่พึงได้จากเครื่องสูบขนาดใหญ่ ตามรูปจะมีลักษณะของใบจักรของเครื่องสูบที่ใช้ในแต่ละพิสัย (range) ของความเร็วจำเพาะในแต่ละประเภทของเครื่องสูบจะมีจุดซึ่งให้ประสิทธิภาพสูงสุด ถ้าออกจากจุดนี้ประสิทธิภาพของเครื่องสูบเหล่านี้ที่พึงอาจเป็นไปได้ ค่าที่ให้มิใช่จะเป็นค่าสุดยอด ในกรณีพิเศษบางกรณี เครื่องสูบบางเครื่องอาจจะให้ประสิทธิภาพสูงกว่านี้เล็กน้อย และก็มิใช่ว่าเครื่องสูบทุกเครื่องจะมีประสิทธิภาพสูงสุดตามที่บ่งไว้เสมอไป เครื่องสูบขนาดใหญ่ที่ออกแบบมาอย่างดีมักจะได้เปรียบในเชิงนี้ ประสิทธิภาพจริงของเครื่องสูบใด มักจะได้มาจากการทดสอบที่ความเร็วรอบที่กำหนด

ในกรณีที่ต้องการขยายข้อมูลที่ได้จากการทดสอบของเครื่องสูบจำลองไปใช้กับเครื่องสูบต้นแบบ จะต้องทำการปรับข้อมูลที่ได้เพื่อไม่ให้มีผลจากขนาดเข้ามารบกวน ในกรณีนี้ ความสัมพันธ์ที่ใช้มาจากการศึกษาของ Moody ซึ่งอยู่ในรูป

$$\left[\frac{1-e_1}{1-e}\right] = \left[\frac{D}{D_1}\right]^{\frac{1}{5}}$$

จากการศึกษาของ Wislicenus อยู่ในรูปของ

$$\frac{0.95-e_1}{0.95-e} = \left[\frac{\log Q}{\log Q_1}\right]^2$$

โดยที่เลขกำกับ 1 หมายถึงตัวต้นแบบ

2.9 การเกิดโพรงไอ (Cavitation)

Cavitation เป็นปรากฏการณ์ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อความดันณ.จุดใดก็ตามในท่อดูด และที่ปากทางเข้าของใบจักร มีความดันลดลงจนเหลือเท่ากันหรือต่ำกว่าความดันไอของของไหล ก็จะทำให้ของไหลกลายเป็นฟองไอได้ เมื่อฟองไอนี้ผ่านเข้าไปยังบริเวณที่มีความดันสูงขึ้น เช่น บริเวณช่องหลืบของแผ่นโค้ง (Vane) ของใบจักร ของเหลวที่ล้อมรอบฟองไออยู่จะอัดกระแทกเข้าหากันเกิดเป็นแรงอัดสูง ถ้าฟองไอนี้ไปเกาะที่ส่วนหนึ่งส่วนใดของใบจักรหรือส่วนอื่นของเครื่องสูบ แล้วยุบตัวลง ณ.ที่นั้น ก็จะทำให้ผิวโลหะสึกกร่อน ผลของการเกิด Cavitation ที่มีต่อเครื่องสูบ ก็คือ

1. เกิดความสั่นสะเทือนอย่างรุนแรง
2. จะมีเสียงดังมากขึ้น
3. ค่าประสิทธิภาพลดลง

สำหรับตัวกำหนดการเกิด Cavitation หาได้จาก Cavitation parameter, σ

$$\sigma = \frac{\frac{P_s}{\gamma} + \frac{V_s^2}{2g} - \frac{P_v}{\gamma}}{H} \qquad \text{.....(2.5)}$$

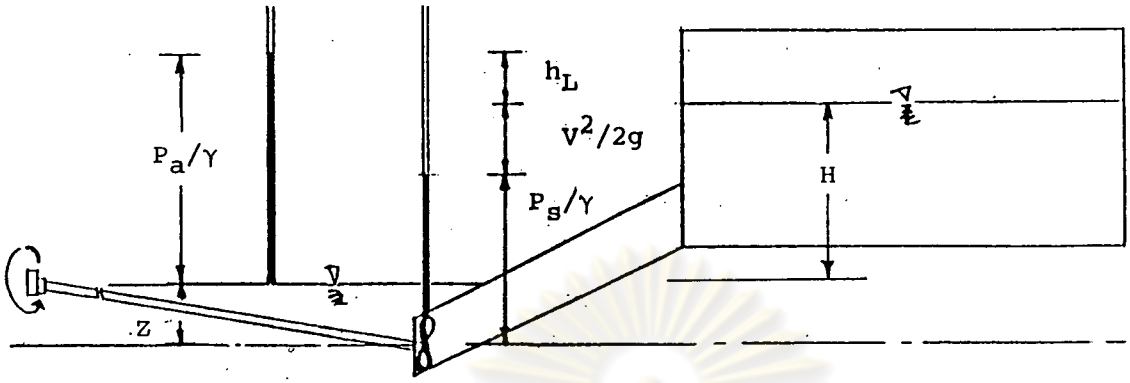
โดย P_s = ความดันสมบูรณ์ในท่อดูด

V_s = ความเร็วของการไหลในท่อดูด

P_v = ความดันสมบูรณ์ของความดันไอ

H = หัวความดันที่ได้จากเครื่องสูบ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.11 ค่าเฮดต่าง ๆ ที่เครื่องสูบน้ำ

จากรูปที่ 2.11 เราสามารถหาสมการพลังงานระหว่างทางเข้าของเครื่องสูบกับระดับผิวของไหลที่สูบ ซึ่งเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ในรูป

$$\frac{P_a}{\gamma} + Z_s = \frac{P_s}{\gamma} + \frac{V_s^2}{2g} + h_L \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (2.6)$$

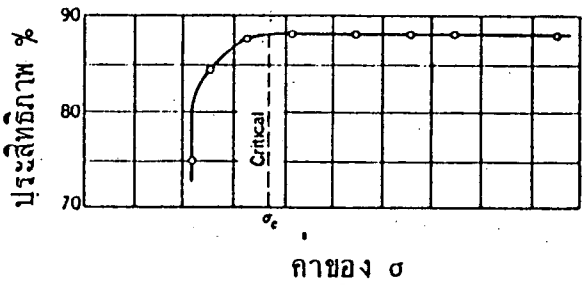
โดยที่ P_a = ความดันบรรยากาศ

Z_s = ความสูงของตัวใบจักรเหนือผิวของไหล

นำค่า P_s แทนลงในสมการ (5) จะได้

$$\sigma = \frac{\frac{P_a}{\gamma} - \frac{P_v}{\gamma} + Z_s - h_L}{H} \quad \ldots\ldots\ldots (2.7)$$

เราเรียก σ ตรงจุดที่เครื่องสูบมีการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพ หรือหัวความดันหรือคุณสมบัติอื่นที่มีความสัมพันธ์กับ Cavitation อย่างเห็นได้ชัดว่า Critical Cavitation parameter (σ_c) ค่า σ_c นี้ไม่ได้ขึ้นอยู่กับกฎเกณฑ์ที่ใช้แต่เพียงอย่างเดียว แต่ยังขึ้นอยู่กับสภาพของการใช้งานอีกด้วย รูปที่ 2.12 เป็นกราฟที่ได้จากการทดลองเพื่อให้หัวความดันและอัตราการไหลคงที่ ในขณะที่ค่อย ๆ ลดความดันทางด้านดูดให้ต่ำลง ซึ่งจะทำให้ค่า σ_c ลดลงด้วย



รูปที่ 2.12 ผลจากการเปลี่ยนค่าคาวิเตชั่นพารามิเตอร์

(อ้างอิง 9)

สำหรับค่า σ_c นั้นอยู่ตรงตำแหน่งที่เครื่องสูบน้ำเริ่มมีประสิทธิภาพต่ำลง ค่า σ_c ค่าอื่น ๆ นั้นหาได้โดยการเปลี่ยนอัตราการไหล ในการใช้เครื่องสูบน้ำให้ปลอดภัยจากการเกิด Cavitation จะต้องเดินเครื่องตรงจุดที่อยู่เหนือค่า σ_c

เนื่องจาก Cavitation หามาจากสภาพของน้ำที่ทางเข้าของใบจักร ไม่ได้หามาจากสภาพทางด้านจ่ายน้ำ ดังนั้นจึงได้กำหนดสมการของความเร็วจำเพาะทางด้านดูด (Suction specific speed,S) สมการนี้มีลักษณะคล้าย ๆ กับสมการของความเร็วจำเพาะ ต่างกันแต่เพียงแทนค่าหัวความดันสุทธิด้วยหัวความดันรวมทางด้านดูดซึ่งมีค่ามากกว่าความดันไอ (Net positive suction head,NPSH) ซึ่งหมายถึงตัวเศษของสมการที่ (2.5) หรือ (2.7) นั่นเอง ดังนั้นความเร็วจำเพาะทางด้านดูดก็จะมีค่าเป็น

$$S = \frac{N\sqrt{Q}}{(NPSH)^{3/4}}$$

$$\sigma_c = \frac{NPSH}{H}$$

$$\sigma_c = \left[\frac{N_s}{S}\right]^{4/3}$$

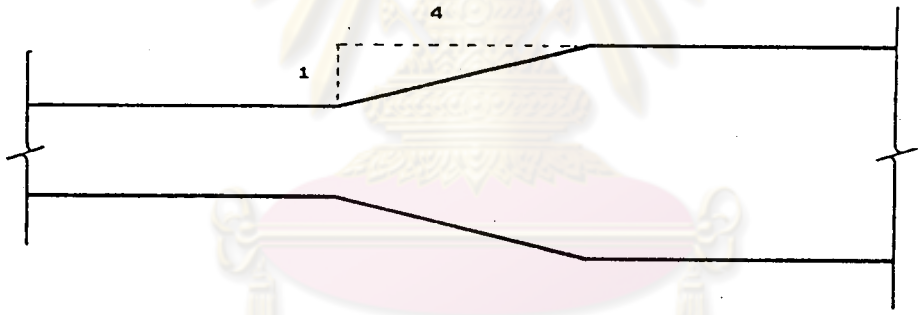
ค่า NPSH ที่ใช้ในการหาค่า σ_c ควรเป็นค่าวิกฤตของ NPSH ค่า σ_c ขึ้นอยู่กับการออกแบบ โดยทั่ว ๆ ไป ค่าประมาณของค่า σ_c คือ 0.05 ที่ N_S = 612, σ_c = 0.10 ที่ N_S = 1225, σ_c = 0.03 ที่ N_S = 2452

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.10 การไหลผ่านอาคารเปลี่ยนแปลง (Flow through channel transition)

การไหลของน้ำซึ่งไหลผ่านอาคารซึ่งเปลี่ยนแปลง (transition) จะมีการสูญเสียพลังงานการไหลเกิดขึ้น ในกรณีของการไหลสภาวะใต้วิกฤติ (Subcritical flow) G. Formica (14) ได้ทำการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์ของการสูญเสียพลังงานการไหลผ่านอาคารเปลี่ยนแปลงแบบต่าง ๆ ทั้งกรณีของการไหลในทางน้ำปิดและทางน้ำเปิด พบว่าการไหลผ่านอาคารขยายตัว (Expansion transition) ซึ่งมีอัตราส่วนของกำแพงทางด้านข้างที่ตรงและผายออก 1 ส่วนทางขวางต่อ 4 ส่วนทางยาว จะมีการสูญเสียพลังงานน้อย (ดูรูปที่ 2.13)

ในกรณีของการไหลสภาวะเหนือวิกฤติ (Supercriticat flow) ผ่านอาคารขยายจะต้องทำให้เหมาะสมเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดเขตแบ่งแยกการไหล (Separation zone) และการเกิดคลื่นซึ่งการวิเคราะห์การไหลในกรณีเช่นนี้ มักจะศึกษาจากการทดสอบแบบจำลอง



รูปที่ 2.13 อาคารขยายตัวอัตราส่วน 1:4

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย