

ไฮดรอลิกแรม(Hydraulic Ram) ¹

1. คำนำ

เครื่องสูบน้ำเป็นเครื่องมือสำหรับการสูบน้ำจากที่ต่ำขึ้นสู่ที่สูง เพื่อให้สามารถส่งน้ำเพื่อการอุปโภค บริโภค การเกษตร อุตสาหกรรมและอื่นๆ เครื่องสูบน้ำในปัจจุบันส่วนใหญ่ใช้กระแสไฟฟ้า หรือ เครื่องยนต์เป็นต้นกำลังซึ่งมีค่าใช้จ่ายในการสูบน้ำ นับวันค่าใช้จ่ายในการสูบน้ำจะสูงขึ้นเรื่อยๆ ไฮดรอลิกแรมหรือตะบันน้ำเป็นเครื่องสูบน้ำที่ไม่ต้องใช้พลังงานอื่นนอกจากพลังงานจากการไหลของน้ำโดยอาศัยหลักการของ Water Hammer มีการพัฒนาและใช้งานในบริเวณพื้นที่น้ำตกหรือฝานตดน้ำเป็นเวลานานกว่าสองร้อยปี ถึงแม้จะมีข้อจำกัดหลายประการ อาทิเช่น ต้องมีศักย์น้ำเหมาะสม อัตราการสูบน้ำจำกัด มีการสูญเสียน้ำโดยเปล่าประโยชน์สูง จึงทำให้ใช้ได้กับบางพื้นที่เท่านั้น ดังนั้นในภาวะที่พลังงานมีราคาแพง จึงควรได้มีการพัฒนาและส่งเสริมให้มีการใช้ประโยชน์จากไฮดรอลิกแรมกันอย่างแพร่หลายต่อไป

ไฮดรอลิกแรม มีข้อดี ข้อเสีย ดังต่อไปนี้

ข้อดี

- (1) เสียค่าบำรุงรักษาต่ำ
- (2) ไม่ต้องการน้ำมันหล่อลื่น
- (3) ไม่ต้องการน้ำมันเชื้อเพลิงนอกจากน้ำ

ข้อเสีย

- (1) เสียน้ำเป็นจำนวนมาก แต่ได้น้ำใช้ประโยชน์น้อยหรือประสิทธิภาพการใช้น้ำต่ำ
- (2) เกิดเสียงดังขณะทำงาน

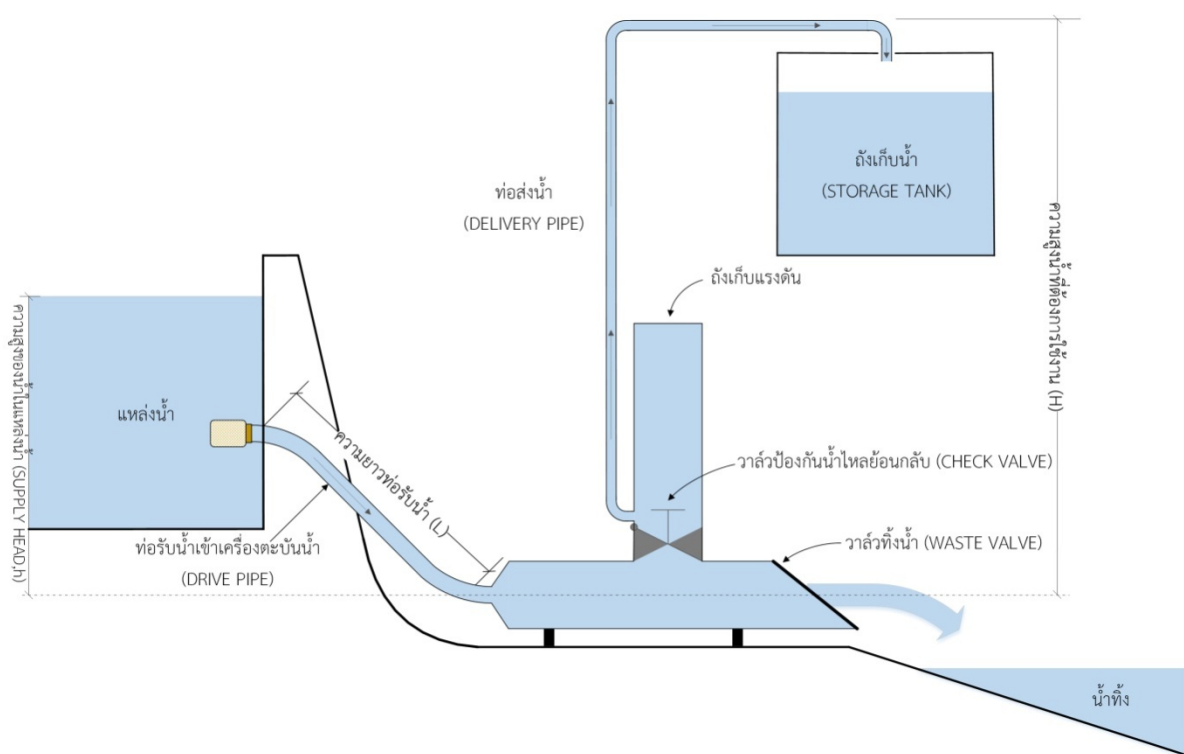
2. ส่วนประกอบของไฮดรอลิกแรม

ไฮดรอลิกแรมมีส่วนประกอบสำคัญดังแสดงในรูปที่ 1 คือ (1) ท่อส่งน้ำเข้าไฮดรอลิกแรม(Drive Pipe) (2) ถังรับน้ำ(Valve Box)(3) วาล์วทิ้งน้ำ (Waste Valve) ซึ่งสามารถปิดเปิดโดยอัตโนมัติเพื่อเพิ่ม

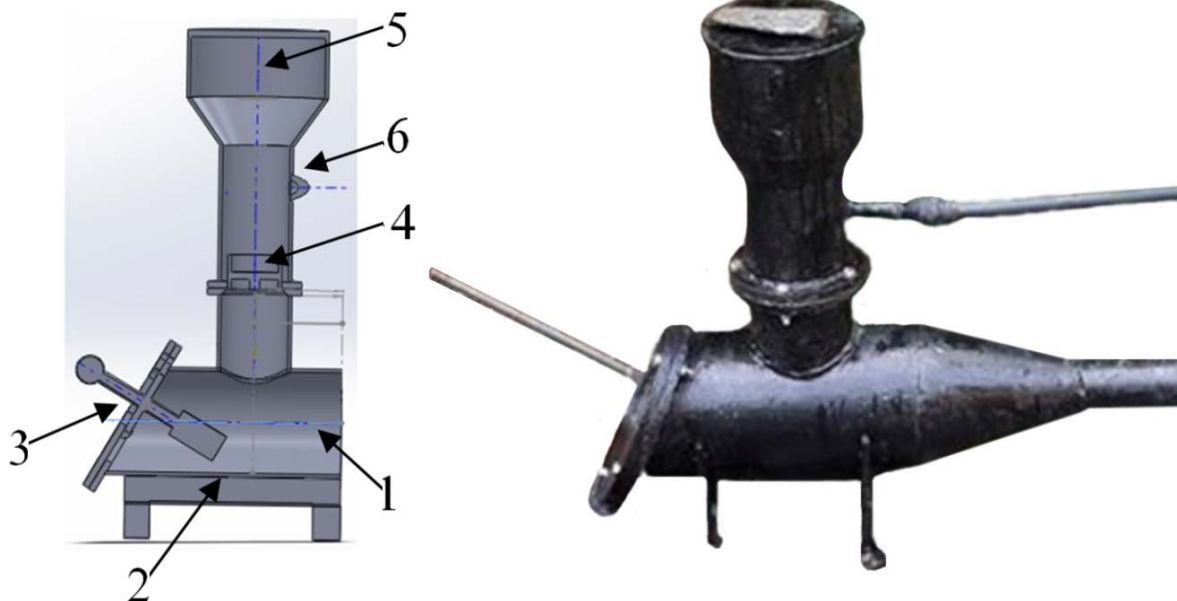
¹ รศ.ดร.วรารุณ วุฒินิธิชัย ห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีเพื่อการชลประทาน ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์
กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ตูลาคม 2557

แรงดันในถังรับน้ำตามหลัก Water Hammer (4) วาล์วป้องกันน้ำไหลย้อนกลับ (Check Valve) หรือวาล์วส่งน้ำ (Delivery Valve) ซึ่งเชื่อมต่อกับถังแรงดัน (5) ถังแรงดัน (Pressure Chamber) รับน้ำจากถังรับน้ำเมื่อความดันน้ำในถังรับน้ำสูงขึ้นเนื่องจากปรากฏการณ์ Water Hammer (6) ท่อจ่ายน้ำ (Delivery Pipe) เพื่อนำน้ำไปใช้ประโยชน์

ส่วนประกอบสำคัญของไฮดรอลิกแรมคือวาล์วทิ้งน้ำ ซึ่งต้องมีกลไกให้ปิด-เปิดได้อย่างอัตโนมัติตามแรงดันน้ำ เมื่อเมื่อแรงดันน้ำในถังรับน้ำสูงพอ วาล์วจะเปิด ทำให้น้ำไหลผ่านวาล์วถือเป็นน้ำทิ้ง (Waste Water) เมื่อวาล์วทิ้งน้ำเปิด ความดันในถังรับน้ำจะลดลง เมื่อแรงดันลดลงถึงระดับหนึ่งวาล์วจะปิดอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดปรากฏการณ์ Water Hammer ความดันน้ำในถังรับน้ำจะเพิ่มขึ้น ทำให้น้ำไหลผ่าน Check Valve เข้าสู่ถังแรงดัน วาล์วทิ้งน้ำจะทำงานปิด-เปิดหมุนเวียนต่อเนื่องเป็นจังหวะอย่างต่อเนื่องเพื่อทำการสูบน้ำ รายละเอียดวาล์วทิ้งน้ำแสดงอยู่ในรูปที่ 2 (กมเดชและคณะ, 2557)



รูปที่ 1 รายละเอียดเข้าไฮดรอลิกแรม



รูปที่ 2 รายละเอียดควาล์วทิ้งน้ำ

3. หลักการทำงานของไฮดรอลิกแรม

ไฮดรอลิกแรมทำงานตามหลักของ Water Hammer ขณะที่น้ำไหลในท่อด้วยความเร็ว $V=V_0$ ถ้าปิดวาล์วกระทันหัน น้ำจะหยุดไหล ความเร็วน้ำด้านหน้าวาล์วจะลดลงเป็นศูนย์ ($V=0$) ขณะเดียวกันความดันน้ำด้านหน้าวาล์วจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ยิ่งวาล์วปิดเร็วมากขึ้นเท่าใด ความดันน้ำจะเพิ่มสูงขึ้นเป็นเงาตามตัวจนสูงกว่าศักย์น้ำในแหล่งน้ำซึ่งส่งเข้าสู่ท่อส่งน้ำเข้าไฮดรอลิกแรมถึง V_0 มีค่ามาก และยิ่งปิดวาล์วเร็วมากขึ้น ความดันน้ำด้านหน้าวาล์วจะมีความมากขึ้น

ไฮดรอลิกแรมทำงานในวัฏหะปิดและเปิดวาล์วสลับไปมา ช่วงวาล์วทิ้งน้ำปิดแรงดันน้ำจะทำให้วาล์วก้นน้ำไหลกลับเปิดให้น้ำไหลผ่านด้วยอัตรา Q ในทางกลับกันช่วงวาล์วทิ้งน้ำเปิดแรงดันน้ำจะลดลงวาล์วก้นน้ำไหลกลับจะปิด น้ำจะถูกระบายทิ้งผ่านวาล์วน้ำทิ้งด้วยอัตรา Q หนึ่งรอบการทำงานของไฮดรอลิกแรมใช้เวลา (t_1+t_2) วินาที แบ่งเป็นช่วงส่งน้ำ(วาล์วทิ้งน้ำปิด, Close) เท่ากับ t_2 วินาที และช่วงระบายน้ำทิ้ง(วาล์วทิ้งน้ำเปิด, Open) เท่ากับ t_1 วินาทีดังรูปที่ 3

จากรูปจะสามารถคำนวณหาอัตราการส่งน้ำ (Q_D) อัตราการสูญเสียน้ำ (Q_w) และประสิทธิภาพการสูบน้ำของไฮดรอลิกแรม ในแต่ละช่วงจึงจะการทำงานได้ดังสมการ

$$Q_w = Q_0 \frac{t_1}{t_1+t_2} \quad (1)$$

$$Q_D = Q_0 \frac{t_2}{t_1 + t_2} \quad (2)$$

เมื่อ Q_w = อัตราการสูญเสียน้ำผ่านวาล์วที่น้ำเฉลี่ยในหนึ่งช่วงการทำงาน(m^3/s)

Q_D = อัตราการสูบน้ำเฉลี่ยในหนึ่งช่วงการทำงาน(m^3/s)

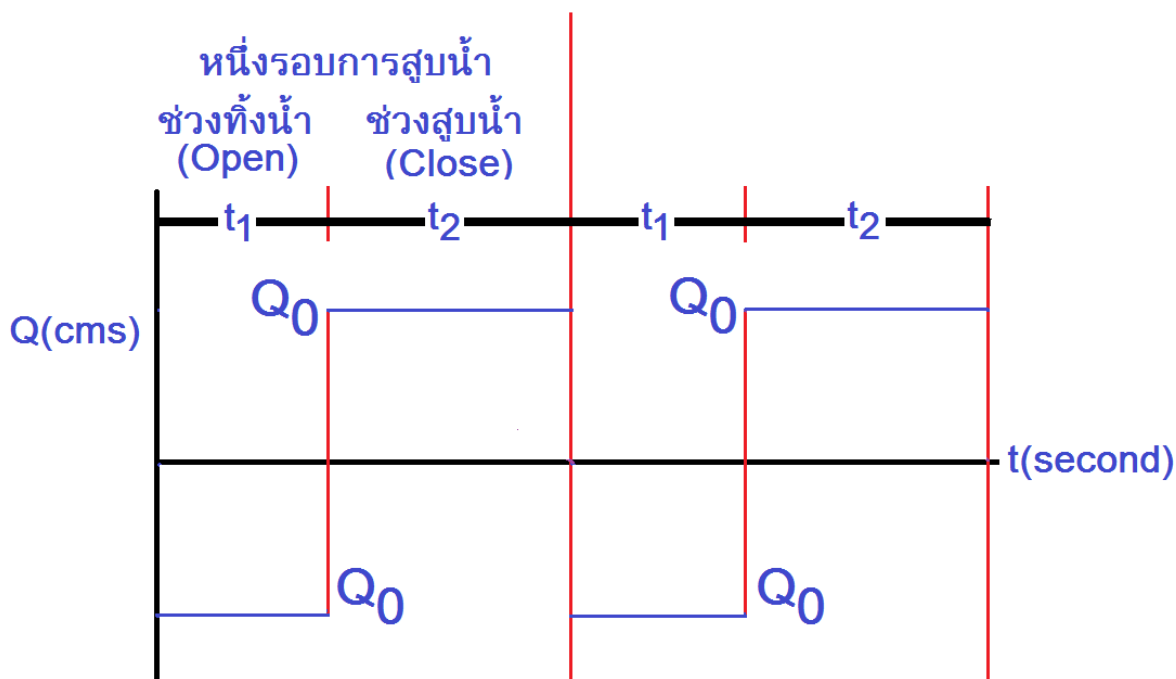
Q_0 = อัตราการไหลของน้ำในท่อเฉลี่ยในช่วงเวลา t_1, t_2 ตามลำดับ (m^3/s)

t_1 = ระยะเวลาที่วาล์วที่น้ำเปิด(s)

t_2 = ระยะเวลาที่วาล์วที่น้ำปิด (s)

$$E_1(\%) = 100 \frac{Q_D}{(Q_D + Q_w)} \quad (3)$$

เมื่อ $E_1(\%)$ = ประสิทธิภาพการสูบน้ำ

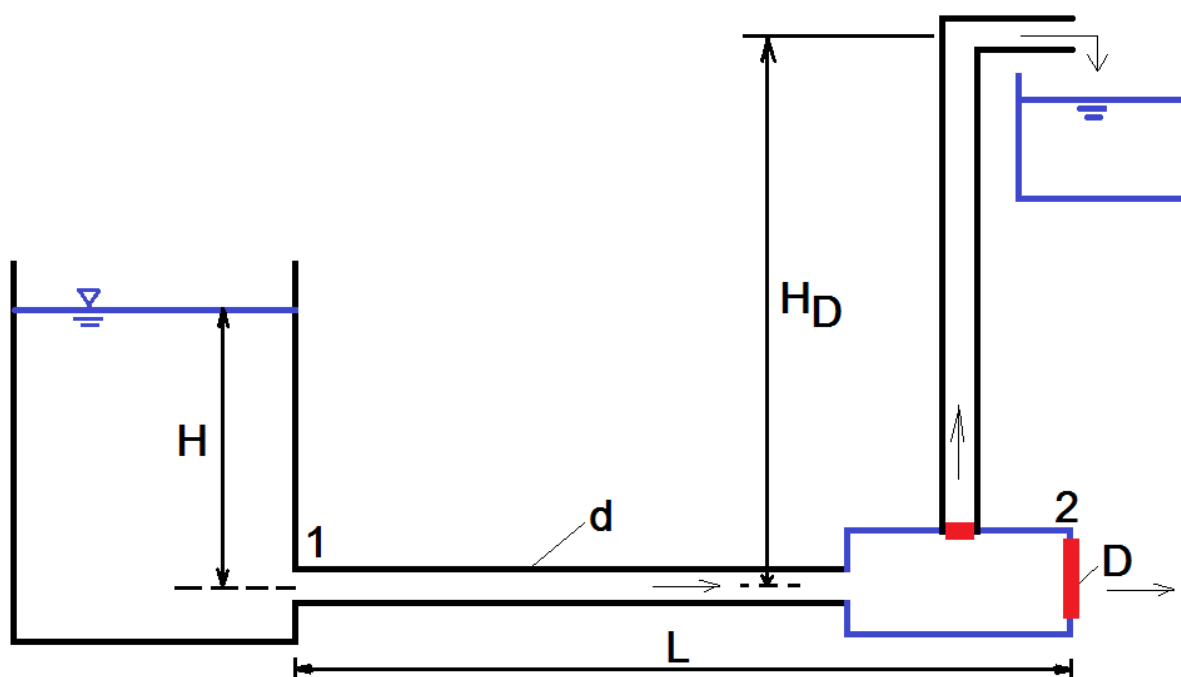


Q_0 คือ อัตราการไหลของน้ำผ่านวาล์วที่น้ำ ณ เวลาที่วาล์วที่น้ำปิด

รูปที่ 3 จังหวะการทำงานของไฮดรอลิกแรม

4. ทฤษฎีการคำนวณ

ทฤษฎีการคำนวณที่เกี่ยวข้องกับไฮดรอลิกแรมที่สำคัญคือ การคำนวณความเร็วน้ำที่ไหลผ่านท่อและ วาล์ว และระยะเวลาที่เกิด Steady Flow หลังจากเปิดวาล์วทิ้งน้ำ หรือเรียกว่า Flow Established Time



รูปที่ 4 ไดอะแกรมไฮดรอลิกแรมประกอบการคำนวณ

4.1 การคำนวณความเร็วน้ำที่วาล์วทิ้งน้ำและความเร็วน้ำในท่อ

หลังจากเปิดวาล์วทิ้งน้ำ น้ำจะไหลด้วยอัตราเร่งเป็นระยะเวลาช่วงหนึ่งก่อนที่การไหลในท่อจะทรงตัว (Steady State หรือ Establishment of Flow) ความเร็วน้ำที่ไหลผ่านวาล์วทิ้งน้ำที่ Steady State จะคำนวณได้จากสมการ

$$V_0 = \sqrt{\frac{2gH}{C_1}} \quad (4)$$

เมื่อ

V_0 = Steady State Velocity ที่วาล์วทิ้งน้ำ (m/s)

H = ความสูงของน้ำในแหล่งน้ำ (Supply Head) วัดจากการระดับผิวน้ำถึงระดับศูนย์กลางของ วาล์วทึ่งน้ำ (m)

C_1 =สัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงานในระบบท่อ ซึ่งประกอบด้วย Friction Loss และ Minor Losses ในระบบท่อ Minor Losses ที่สำคัญได้แก่ Losses ที่ Entrance, Valve, Bend, Exit

$$C_1 = 1 + K_E + K_V + K_B + f \frac{L}{d} \quad (5)$$

$$\text{ถ้าให้ } C_V = \sqrt{\frac{1}{C_1}} \quad (6)$$

C_v =สัมประสิทธิ์ความเร็วของน้ำ(Water Velocity Coefficient) มีค่าระหว่าง 0.7 ($C_1=2.04$) ถึง 0.8 ($C_1=1.56$)

กรณีไม่คิด Losses $C_1=1$

g = อัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกเท่ากับ 9.81 m/s^2

H = ความสูงของน้ำในแหล่งน้ำ(Supply Head)วัดจากการระดับผิวน้ำถึงระดับศูนย์กลางของ ช่องระบายของลึ่นทึ่งน้ำของตะบันน้ำ(m)

ให้ V_m คือ ความเร็วน้ำในท่อ (Drive Pipe) ที่ Supply Head (H) สามารถคำนวณหาได้จากสมการ

$$V_m = \frac{A_D}{A_d} V_0 \quad (7)$$

เมื่อ

V_m = ความเร็วน้ำในท่อที่ Steady State (m/s)

V_0 = ความเร็วน้ำที่วาล์วทึ่งน้ำที่ Steady State (m/s)

A_D = พื้นที่หน้าตัดของวาล์วทึ่งน้ำขณะเปิด (cm^2) = $\pi \frac{D^2}{4}$

A_d = พื้นที่หน้าตัดของท่อส่งน้ำ (Drive Pipe) (cm^2) = $\pi \frac{d^2}{4}$

$$Q_0 = Q_m = A_D \cdot V_0 = A_d \cdot V_m \quad (8)$$

เมื่อ Q_0 = อัตราการไหลของน้ำผ่านวาล์วตั้งน้ำ ณ เวลาที่วาล์วตั้งน้ำปิด (m^3/s)

Q_m = อัตราการไหลของน้ำในท่อ ณ เวลาที่วาล์วตั้งน้ำปิด (m^3/s)

4.2 การคำนวณระยะเวลาที่น้ำไหลแบบคงตัว (Time of Establishment of Flow)

Euler Equation

$$\frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial(H + \frac{V^2}{2g})}{\partial s} + \frac{fV[V]}{2gD} = 0 \quad (9)$$

Integrate the above Equation with respect to distance (s) from point 1 to point 2 (หรือ ระยะ L ในรูปที่ 4)

$$\int_1^2 \left(\frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial(H + \frac{V^2}{2g})}{\partial s} + \frac{fV[V]}{2gD} \right) ds = 0$$

$$\int_1^2 \left(\frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} \right) ds = - \int_1^2 \left(\frac{\partial(H + \frac{V^2}{2g})}{\partial s} + \frac{fV[V]}{2gD} \right) ds$$

$$\frac{L}{g} \frac{\partial V}{\partial t} = - \left(H + \frac{V^2}{2g} \right)_2 + \left(H + \frac{V^2}{2g} \right)_1 - f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}$$

At point 2

$$H_2 = 0$$

$$\text{at time } t=0^+, V_2=0$$

$$\text{at time } t=t, V_2=V_0$$

At point 1

$$H_1 = H$$

at time $t=0^+$, $V_1=0$

$$\frac{L}{g} \frac{\partial V}{\partial t} = H - \frac{V^2}{2g} - f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}$$

$$\frac{L}{g} \frac{\partial V}{\partial t} = H - \left(1 + f \frac{L}{D}\right) \frac{V^2}{2g}$$

After integrating V with respect to s , then the remaining derivative is a function of time only, an ordinary derivative.

$$\frac{L}{g} \frac{dV}{dt} = H - \left(1 + f \frac{L}{D}\right) \frac{V^2}{2g} \quad (10)$$

$$dt = \frac{L}{g} \frac{dV}{\left\{H - \left(1 + f \frac{L}{D}\right) \frac{V^2}{2g}\right\}}$$

$$\text{ให้ } C_1 = \left(1 + f \frac{L}{D}\right)$$

$$dt = \frac{L}{g} \frac{dV}{\left(H - C_1 \frac{V^2}{2g}\right)} \quad (11)$$

จากสมการที่ (3), $H = C_1 \frac{V_0^2}{2g}$

$$dt = \frac{L}{g} \frac{dV}{\left(C_1 \frac{V_0^2}{2g} - C_1 \frac{V^2}{2g}\right)}$$

$$dt = \frac{2L}{C_1} \frac{dV}{(V_0^2 - V^2)}$$

$$\int_0^t dt = \frac{2L}{C_1} \int_0^V \frac{dV}{(V_0^2 - V^2)}$$

$$t = \frac{2L}{C_1} \left\{ \frac{1}{2V_0} \ln \left(\frac{V_0 + V}{V_0 - V} \right) \right\}$$

$$t = \frac{L}{C_1 V_0} \ln \left(\frac{V_0 + V}{V_0 - V} \right) \quad (12)$$

เมื่อ t = Flow Establishment Time (s)

Flow establishment time is infinite and the logarithm does not remain bounded as V approaches V_0 .

For the practical purposes, let $V=0.99V_0$

$$t = \frac{L}{C_1 V_0} \ln \left(\frac{1.99V_0}{0.01V_0} \right)$$

$$t = \frac{L}{C_1 V_0} \ln(1.99)$$

$$t = \frac{5.293L}{C_1 V_0} \quad (13)$$

หมายเหตุ ในการออกแบบไฮดรอลิกแรม ควรออกแบบให้ t_1 (Waste Valve Opening Time) เท่ากับ t ในสมการที่ (13)

ตัวอย่างที่ 1 ท่อขนาด 0.60 เมตร ยาว 3,000 เมตร รับน้ำจากอ่างเก็บน้ำซึ่งระดับน้ำในอ่างสูงกว่าศูนย์กลางของวาล์วที่ปลายท่อ 25 เมตร ถ้าท่อที่ค่า Steady State Friction Factor (f) เท่ากับ 0.018 และสมมติว่ามีค่าคงที่ จงคำนวณหา

- (1) หลังจากเปิดวาล์วจะใช้เวลาที่วินาที น้ำจึงไหลด้วยความเร็ว 99% ของ Steady State Velocity ถ้าไม่คิดการสูญเสียพลังงาน
- (2) คำนวนข้อ (1) ใหม่ ถ้ากำหนดให้คิด Friction Loss แต่ไม่คิด Minor Losses
- (3) คำนวนข้อ (2) ใหม่ ถ้าคิด Minor Losses ด้วย กำหนดว่า Entrance Loss Coefficient (K_e)=0.5 และ Valve Loss Coefficient (K_v)=5.0

วิธีทำ $H=25$ m, $L=300$ m, $D=0.6$ m

(1) $C_1=1$

$$V_0 = \sqrt{\frac{2gH}{C_1}} = \sqrt{\frac{2 \times 9.81 \times 25}{1}} = 22.145 \text{ m/s}$$

$$t = \frac{5.293L}{C_1 V_0} = \frac{5.293 \times 3,000}{1 \times 22.145} = 717 \text{ s}$$

(2) $C_1=1+f(L/D)=1+0.018 \times 3,000/0.6 = 90$ (No minor losses)

$$V_0 = \sqrt{\frac{2gH}{C_1}} = \sqrt{\frac{2 \times 9.81 \times 25}{90}} = 2.335 \text{ m/s}$$

$$t = \frac{5.293L}{C_1 V_0} = \frac{5.293 \times 3,000}{90 \times 2.335} = 75.56 \text{ s}$$

(3) $C_1=1+K_E+K_V+f(L/D)=1+0.5+5+0.018 \times 3,000/0.6 = 95.5$ (No minor losses)

$$V_0 = \sqrt{\frac{2gH}{C_1}} = \sqrt{\frac{2 \times 9.81 \times 25}{95.5}} = 2.266 \text{ m/s}$$

$$t = \frac{5.293L}{C_1 V_0} = \frac{5.293 \times 3,000}{95.5 \times 2.266} = 73.377 \text{ s}$$

5. สูตรการคำนวณไฮดรอลิคแรม อันเนื่องมาจากพระราชดำริ

ไฮดรอลิคแรม อันเนื่องมาจากพระราชดำรินี้มีลักษณะดังรูปที่ 5 และมีวิธีเรียกชื่อตามขนาดของท่อส่งน้ำ (Drive Pipe) และท่อจ่ายน้ำ (Delivery Pipe) ดังนี้

RIM-D₁ x D₂ HD

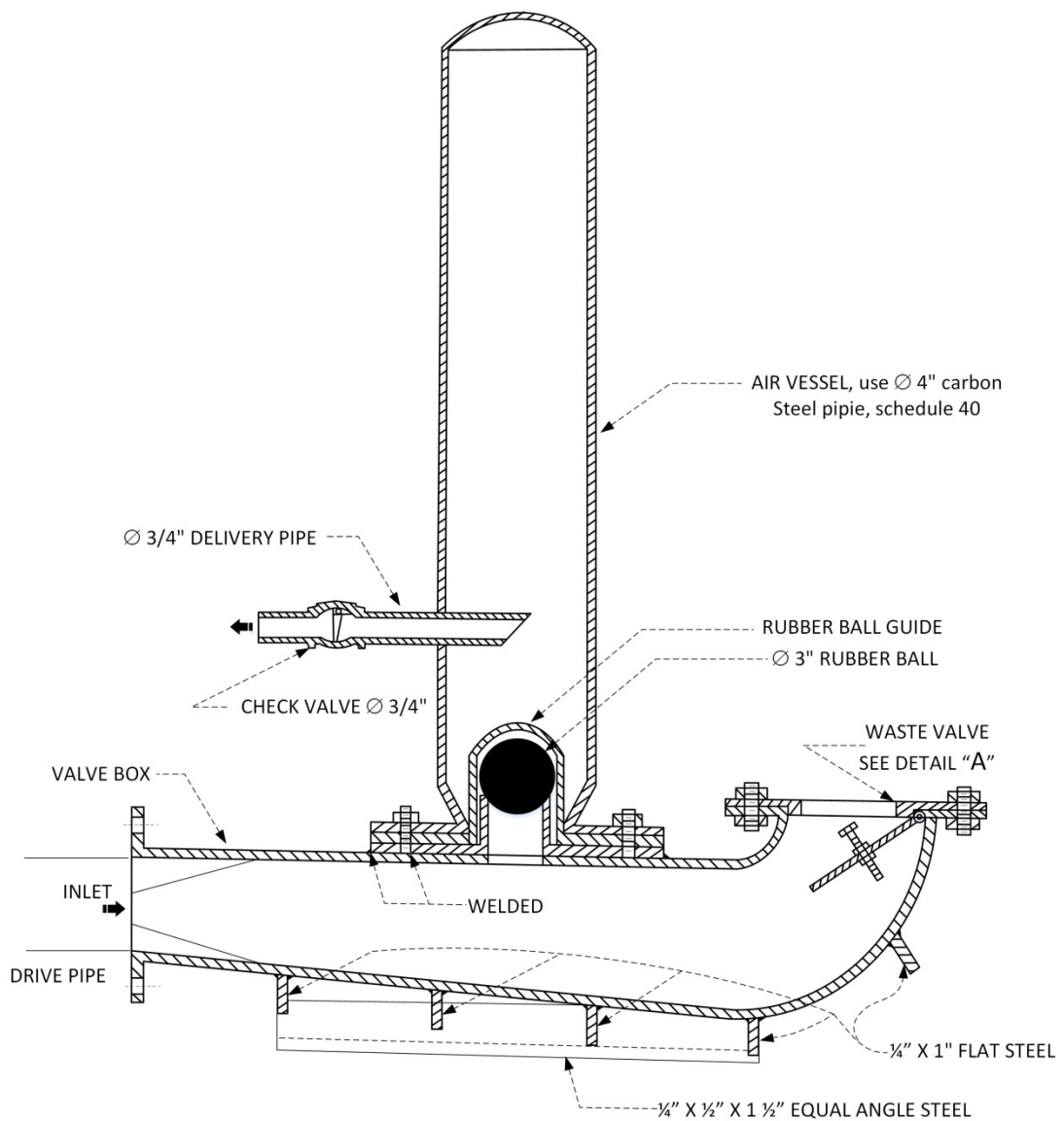
เมื่อ

D₁ คือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อส่งน้ำ (Drive Pipe)(in.)

D₂ คือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อจ่ายน้ำ (Delivery Pipe) (in.)

RIM = Royal Initiated Machine

HD=Hydraulic Ram



Cross sectional view

รูปที่ 5 ไฮดรอลิคแรม อันเนื่องมาจากพระราชดำริ แบบ RIM-2x³/₄ HD

ความเร็วน้ำคงตัวที่วาล์วทิ้งน้ำ (V_0)

$$V_0 = \sqrt{\frac{2gH}{1+f\frac{L}{d}}} = \sqrt{\frac{2gH}{1+0.024\frac{L}{d}}} \quad (14)$$

เมื่อ

H=ความสูงของน้ำ (Supply Head) (m)

L=ความยาวท่อ (m)

d=เส้นผ่าศูนย์กลางท่อ (m)

ความเร็วน้ำสูงสุดในท่อ (V_m)

$$V_m = \left(\frac{A_D}{A_d}\right) V_0 \quad (15)$$

A_D =พื้นที่หน้าตัดวาล์วทิ้งน้ำ

A_d =พื้นที่หน้าตัดท่อ

ระยะเวลาที่น้ำไหลด้วยความเร็ว V_m หลังจากเปิดวาล์วทิ้งน้ำมีหน่วยเป็นวินาที (t_1) หรือ Waste

Valve Opening Phase

$$t_1 = \frac{LV_m}{gH} \quad (16)$$

เมื่อ

H=ความสูงของน้ำที่แหล่งน้ำ (Supply Head) (m)

ระยะเวลาที่เปิดวาล์วจ่ายน้ำเป็นวินาที (t_2) หรือ Waste Valve Closing Phase

$$t_2 = \frac{LV_m}{gH_D} \quad (17)$$

เมื่อ

H_D =ความสูงของน้ำที่ต้องการสูบไปใช้งาน (Delivery Head) (m)

ดังนั้น $t_1 + t_2$ คือระยะเวลาไฮดรอลิกเริ่มทำงานครบ 1 จังหวะ(Cycle) คือ วาล์วทิ้งน้ำเปิด(Waste Valve Open) เพื่อน้ำไหลด้วยอัตราเร่งแล้วจึงปิดวาล์วทิ้งน้ำ (Waste Valve Close) พร้อมกับเปิดวาล์วจ่ายน้ำเพื่อส่งน้ำไปใช้งาน

จำนวนครั้งที่ไฮดรอลิกแรมทำงานในหนึ่งนาที หาได้จากสมการ

$$\text{No. of Operating Cycles per minutes} = \frac{60}{t_1 + t_2} \quad (18)$$

$$Q_w = \pi \left(\frac{d^2}{4} \right) \left(\frac{V_m}{2} \right) t_1 \left(\frac{60}{t_1 + t_2} \right) \quad (19)$$

$$Q_D = \pi \left(\frac{d^2}{4} \right) \left(\frac{V_m}{2} \right) t_2 \left(\frac{60}{t_1 + t_2} \right) \quad (18)$$

เมื่อ

Q_w = ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านวาล์วถึงน้ำล้นทิ้ง (m^3/min)

Q_D = ปริมาณน้ำที่ไหลสูบล่งไปใช้งาน (m^3/min)

d = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อส่งน้ำ (m)

ประสิทธิภาพการใช้พลังงานในการสูบน้ำของไฮดรอลิกแรม จะสามารถคำนวณได้จากสูตร

$$E_2(\%) = 100 \frac{Q_D(H_D + H)}{(Q_w + Q_D)H} \quad (20)$$

เมื่อ E_2 = ประสิทธิภาพการใช้พลังงานในการสูบน้ำของไฮดรอลิกแรม(%)

6. ตัวอย่างการคำนวณไฮดรอลิกแรม อันเนื่องมาจากพระราชดำริ

ตัวอย่างที่ 2 ต้องการติดตั้งไฮดรอลิกแรมแบบ RIM-5 x 1.5 HD จำนวนหนึ่งเครื่องที่บริเวณฝายทดน้ำแห่งหนึ่ง ซึ่งมีข้อมูลดังต่อไปนี้

$H=2$ m.

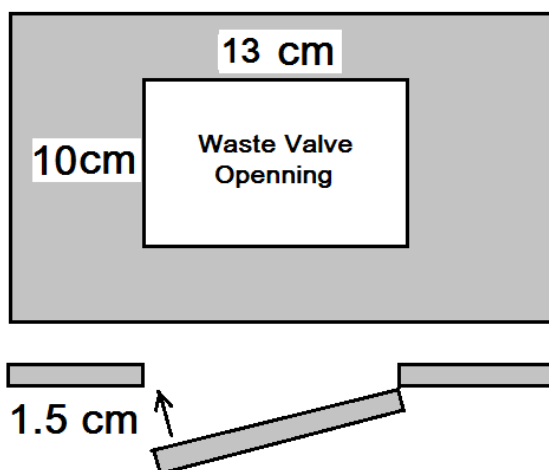
$D_1= 5$ in. = $5 \times 0.0254 = 0.127$ m. = d

$L=10$ m.

$$H_D = 30 \text{ m.}$$

ระยะปิด-เปิดวาล์วที่น้ำ = 1.5 cm. ซึ่งสามารถคำนวณหา A_w ได้ดังรูปที่ 6

$$A_w = (10 \times 1.5) + 2(0.5 \times 13 \times 1.5) = 34.5 \text{ cm}^2$$



รูปที่ 6 การคำนวณ A_w ของไฮดรอลิกแรม RIM-5 x 1.5 HD

$$A_d = \pi \frac{d^2}{4} = 3.14 \left(\frac{12.7^2}{4} \right) = 126.6 \text{ cm}^2$$

$$V_0 = \sqrt{\frac{2gH}{1 + 0.024 \frac{L}{d}}} = \sqrt{\frac{2 \times 9.81 \times 2}{1 + 0.024 \times \frac{10}{12.7}}} = 3.68 \text{ m/s}$$

$$V_m = \frac{A_w}{A_d} V_0 = \frac{34.5}{126.6} \times 3.68 = 1.003 \text{ m/s}$$

$$t_1 = \frac{LV_m}{gH} = \frac{10 \times 1.003}{9.81 \times 2} = 0.51 \text{ s}$$

$$t_2 = \frac{LV_m}{gH_D} = \frac{10 \times 1.003}{9.81 \times 30} = 0.034 \text{ s}$$

$$t_1 + t_2 = 0.51 + 0.034 = 0.544 \text{ s}$$

$$Q_w = \pi \left(\frac{d^2}{4} \right) \left(\frac{V_m}{2} \right) t_1 \left(\frac{60}{t_1 + t_2} \right)$$

$$= 3.14 \left(\frac{0.127^2}{4} \right) \left(\frac{1.003}{2} \right) 0.51 \left(\frac{60}{0.544} \right) = 0.3572 \text{ m}^3/\text{min}$$

$$Q_D = \pi \left(\frac{d^2}{4} \right) \left(\frac{V_m}{2} \right) t_2 \left(\frac{60}{t_1 + t_2} \right)$$

$$= 3.14 \left(\frac{0.127^2}{4} \right) \left(\frac{1.003}{2} \right) 0.034 \left(\frac{60}{0.544} \right) = 0.0238 \text{ m}^3/\text{min}$$

$$E_1 = 100 \frac{Q_D}{(Q_D + Q_W)} = 100 \frac{0.0238}{(0.0238 + 0.3572)} = 6.3\%$$

$$E_2 = 100 \frac{Q_D(H_D + H)}{(Q_W + Q_D)H} = 100 \frac{0.0238 \times (30 + 2)}{(0.3572 + 0.0238) \times 2}$$

$$= 99.9\%$$

7. ความสามารถในการสูบน้ำของไฮดรอลิกแรม อันเนื่องมาจากพระราชดำริ

ไฮดรอลิกแรม อันเนื่องมาจากพระราชดำรินี้มี 5 ขนาด ตามขนาดของท่อส่งน้ำ (Drive Pipe) และท่อจ่ายน้ำ (Delivery Pipe) คือ

RIM-2 x ¾ HD

RIM-3 x 1 HD

RIM-4 x 1¼ HD

RIM-5 x 1½ HD

RIM-6 x 2 HD

ไฮดรอลิกแรมแต่ละขนาดมีความสามารถในการสูบน้ำแตกต่างกัน เมื่อทราบขนาดของไฮดรอลิกแรม และค่า H, H_D จะสามารถหาความสามารถในการสูบน้ำ Q_D(l/min) ได้ดังตารางที่ 1-5 ตามลำดับ

ตารางที่ 6 แสดงปริมาณการสูญเสียน้ำในการขับเคลื่อนไฮดรอลิกแรม Q_w (l/min) แต่ละขนาด

ตารางที่ 1 ความสามารถในการสูบน้ำของไฮดรอลิกแรม RIM-6 x 2 HD

ความสูงของระดับน้ำที่ แหล่งน้ำ H(m)	ยกน้ำสูง H_D (m)										
	3	5	10	15	20	30	40	50	60	80	100
	ปริมาณน้ำที่สูบได้ Q_D (l/min)										
1	61	40	21	15							
2		100	58	41	34	22					
3			98	71	56	38	30	24			
4				105	82	58	45	36	30		
5				138	110	77	62	50	42	32	
6				174	140	102	80	67	55	42	34
7					170	124	93	80	68	52	42
8					200	148	117	96	82	63	51
9						172	136	113	97	75	61
10						196	157	130	112	87	71

ตารางที่ 2 ความสามารถในการสูบน้ำของไฮดรอลิกแรม RIM-5 x 1½ HD

ความสูงของระดับน้ำที่ แหล่งน้ำ H(m)	ยกน้ำสูง H_D (m)										
	3	5	10	15	20	30	40	50	60	80	100
	ปริมาณน้ำที่สูบได้ Q_D (l/min)										
1	52	35	19	13							
2		85	50	35	27	18					
3		137	84	61	48	33	26	20			
4			122	89	71	50	39	32	27		
5				114	95	68	53	43	37	28	
6				148	119	86	67	55	47	36	29
7					148	108	85	70	59	46	38
8					172	126	100	83	71	55	45
9						147	117	97	83	65	53
10						168	134	112	95	75	61

ตารางที่ 3 ความสามารถในการสูบน้ำของไฮดรอลิกแรม RIM-4 x 1¼ HD

ความสูงของระดับน้ำที่แหล่งน้ำ H(m)	ยกน้ำสูง H _D (m)										
	3	5	10	15	20	30	40	50	60	80	100
	ปริมาณน้ำที่สูบได้ Q _D (l/min)										
1	40	27	15	10							
2		66	38	27	20	13					
3		105	64	42	36	25	19				
4			93	68	54	38	29	24	20		
5				92	73	52	41	33	28	22	
6				113	91	66	52	42	36	27	22
7					112	81	64	53	45	35	28
8					131	96	76	64	54	42	34
9						113	90	74	64	49	41
10						128	103	85	73	57	47

ตารางที่ 4 ความสามารถในการสูบน้ำของไฮดรอลิกแรม RIM-3 x 1 HD

ความสูงของระดับน้ำที่แหล่ง น้ำ H(m)	ยกน้ำสูง H _D (m)										
	3	5	10	15	20	30	40	50	60	80	100
	ปริมาณน้ำที่สูบได้ Q _D (l/min)										
1	20	14	7	5							
2		34	19	14	11	7					
3		54	33	24	18	13	10				
4			47	35	27	19	15	12	10		
5				46	37	26	21	17	14	10	
6				57	47	34	26	22	18	14	12
7					57	42	33	27	23	17	14
8					67	50	39	32	28	22	17
9						57	46	38	32	25	20
10						65	52	54	37	29	23

ตารางที่ 5 ความสามารถในการสูบน้ำของไฮดรอลิคแรม RIM-2 x ¾ HD

ความสูงของระดับน้ำที่แหล่ง น้ำ H(m)	ยกน้ำสูง H _D (m)										
	3	5	10	15	20	30	40	50	60	80	100
	ปริมาณน้ำที่สูบได้ Q _D (l/min)										
1	12	8	4	3							
2		20	11	8	6	4					
3		32	19	14	11	7	5				
4			28	21	16	12	9	7			
5				27	22	16	12	10	8		
6				35	28	20	15	13	11	8	
7					35	25	19	17	14	10	8
8					40	30	24	19	16	13	10
9						35	27	23	19	15	12
10						39	31	27	22	17	14

ตารางที่ 6 อัตราการใช้น้ำในการขับไฮดรอลิคแรมแบบต่างๆ

ไฮดรอลิคแรม	ความสูงของระดับน้ำที่แหล่งน้ำ H(m)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านวาล์วถึงน้ำ Q _w (l/min)									
RIM-6 x 2 HD	230	330	404	467	522	575	614	652	686	714
RIM-5 x 1½ HD	196	281	346	400	446	488	533	557	586	610
RIM-4 x 4 x 1¼ HD	150	215	260	305	344	370	402	425	448	466
RIM-3 x 1 HD	77	110	133	155	175	190	206	218	228	238
RIM-2 x ¾ HD	56	66	79	94	104	112	125	130	137	132

8. เอกสารอ้างอิง

คมเดช พัวพงษ์ไพโรจน์ ธนกฤต หิรัญวิบูลย์ วราวุธ วุฒินิชย์ และจิระกานต์ ศิริวิชญ์ไมตรี (2557). การพัฒนาาล้วทิ้งน้ำของเครื่องตะบันน้ำ. โครงการวิศวกรรมชลประทาน ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน. 14 น.

นิรนาม (มปป). ไฮดรอลิคแรม อันเนื่องมาจากพระราชดำริ. 88 น.

Streeter, V.L. and E.B.Wylie (1975). Fluid Mechanics, 6th Edition. McGraw-Hill Kogakusha, Ltd., Tokyo.752 p.

Larock, B.E., Jeppson, R.W. and G.Z Watters (2000).Hydraulic of Pipe Systems. CRC Press LLC, USA. 537p.