บทที่ 2

ทฤษฎี

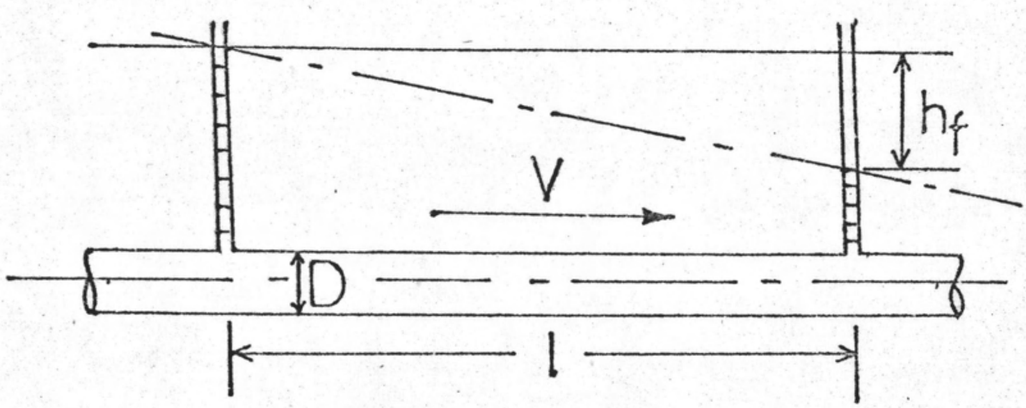
2.1 สมการของดาร์ซี่ไว้ส์บาคช์ (Darcy-Weisbach equation)

สมการของดาร์ซี่ไว้ส์บาคช์ แสดงว่าค่าความลดระดับความดันน้ำ (Head loss) เป็นปฏิภาคกับค่าความเร็วของการไหลของน้ำในเส้นท่อยกกำลังสอง ตามสูตร

$$hf = f \frac{l V^2}{D.2g} \quad \text{- - - - - - - - -} \quad (2\text{-}1)$$

เมื่อ (ดูรูป 2.1 ประกอบ)

hf	เป็นค่าความลดระดับความดันน้ำในเส้นท่อ
l	เป็นความยาวของเส้นท่อในช่วงที่คิดค่าความลดระดับความดันน้ำ
V	เป็นความเร็วของการไหลของน้ำในเส้นท่อ
D	เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของเส้นท่อ
g	เป็นความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางของโลก
f	เป็นสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของผิวเส้นท่อ (friction factor) เป็นตัวเลขซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดคุณลักษณะของเส้นท่อ, ชนิดและคุณลักษณะของน้ำในขณะนั้น



รูป 2.1 แสดงความสัมพันธ์ตามสมการ (2-1)

พิสูจน์สมการ

ในกรณีที่ท่อเป็นท่อผิวเรียบ

กำหนดให้

Δh เป็นค่าความลดระดับความดันน้ำในช่วงยาว l ของเส้นท่อ

l เป็นความยาวของเส้นท่อในช่วงที่กำหนดหาค่า

V เป็นความเร็วของน้ำที่ไหลในเส้นท่อ

D เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของเส้นท่อ

ρ เป็นความหนาแน่น (Density) ของน้ำ

μ เป็นค่าความหนืดสมบูรณ์ (Absolute Viscosity or Dynamic Viscosity)

ν เป็นค่าความหนืดคิเนมาติคส์ (Kinematic Viscosity)

g เป็นความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางของโลก

วิเคราะห์และสร้างสมการโดยใช้วิธีการวิเคราะห์มิติหน่วยวัด (Dimensional Analysis)
ให้ $F(\frac{\Delta h}{l}, V, D, \rho, \mu, g) = 0$ เป็นสมการกายภาพ(Physical equation) ของปรากฏการณ์การไหลของของไหลในเส้นท่อหน้าตัดวงกลม จะเห็นได้ว่าถ้าให้ตัวไพ–พารามิเตอร์ (π - parameter) เป็นกลุ่มตัวแปรไร้หน่วย และ V, D, ρ เป็นตัวแปรซ้ำ (Repeating Variables)

จะได้
$$= V^{x_1} D^{y_1} \rho^{z_1} \mu = (LT^{-1})^{x_1} L^{y_1} (ML^{-3})^{z_1} ML^{-1}T^{-1}$$

$$\therefore \quad x_1 + y_1 - 3z_1 = 0$$

$$-x_1 - 1 = 0$$

$$z_1 + 1 = 0$$

แก้สมการได้ $x_1 = -1$, $y_1 = -1$, $z_1 = -1$

ต่อไป $\pi_2 = V^{x_2} D^{y_2} \rho^{z_2} g = (LT^{-1})^{x_2} L^{y_2} (ML^{-3})^{z_2} LT^{-2}$

$$\therefore x_2 + y_2 - 3z_2 = 0$$
$$-x_2 - 2 = 0$$
$$z_2 = 0$$

แก้สมการได้ $x_2 = -2$, $y_2 = 1$, $z_2 = 0$

ต่อไป $\pi_3 = V^{x_3} D^{y_3} \rho^{z_3} \dfrac{\Delta h}{l}$

$$= (LT^{-1})^{x_3} L^{y_3} (ML^{-3}) L L^{-1}$$

$$\therefore -x_3 = 0$$
$$z_3 = 0$$
$$x_3 + y_3 - 3z_3 = 0$$

แก้สมการได้ $x_3 = 0$, $y_3 = 0$, $z_3 = 0$

ดังนั้น $\pi_1 = \dfrac{\mu}{VD\rho}$, $\pi_2 = \dfrac{gD}{V^2}$, $\pi_3 = \dfrac{\Delta h}{l}$

หรือ $f\left(\dfrac{VD\rho}{\mu}, \dfrac{V^2}{gD}, \dfrac{\Delta h}{l}\right) = 0$

กลุ่มตัวเลขไร้หน่วย ไพ–พารามิเตอร์ อาจจะกลับเศษเป็นส่วนได้ โดยไม่มีผลต่อความสัมพันธ์ของสมการแต่อย่างใด ตัวแปรตัวแรกคือค่า เรย์โนลด์ นัมเบอร์ (Reynolds' number) เป็นตัวแปรไร้หน่วย (Dimensionless parameters) ที่สำคัญที่สุดตัวหนึ่ง

ในวิชาชลศาสตร์ ค่าของเรยโนลด์ นัมเบอร์ จะเป็นค่าบอกให้ทราบชนิด สภาพการไหลของของไหลว่าเป็นการไหลช้าเป็นเส้น (Laminar flow) หรือไหลเร็วปะปน (Turbulent flow)

ถ้าต้องการทราบค่า $\frac{\Delta h}{l}$ ก็สามารถหาได้ โดยแก้สมการดังกล่าว

จะได้ $\frac{\Delta h}{l} = f_1(R, \frac{V^2}{gD})$

เขียนเป็นรูปสมการของดาร์ซี ไว้สบาคช์ ที่ใช้กันทั่วไปคือ

$$\frac{\Delta h}{l} = f(R)\frac{1}{D}\frac{V^2}{2g}$$

จากสมการดังกล่าวจะเห็นได้ว่า ตัว f(R) คือค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของเส้นท่อนั่นเอง ซึ่งในกรณีนี้จะเป็นกลุ่มตัวแปรไร้หน่วย และขึ้นอยู่กับค่าของเรยโนลดนัมเบอร์เท่านั้น

ในกรณีที่เป็นท่อผิวขรุขระ (Rough pipe) ตัวค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของเส้นท่อ ยังจะต้องขึ้นอยู่กับค่าความหยาบของผิวอีก คือ ϵ , ϵ' และ m ซึ่ง ϵ คือขนาดของส่วนที่ยื่นออกมาของความหยาบมีหน่วยเป็นหน่วยของความยาว, ϵ' คือระยะระหว่างส่วนที่ยื่นออกมาของความหยาบ มีหน่วยเป็นหน่วยของความยาว และ m เป็นค่าคงที่รูปแบบ (form factor) ขึ้นอยู่กับรูปร่างของความหยาบแต่ละหน่วย และเป็นตัวแปรไร้หน่วย

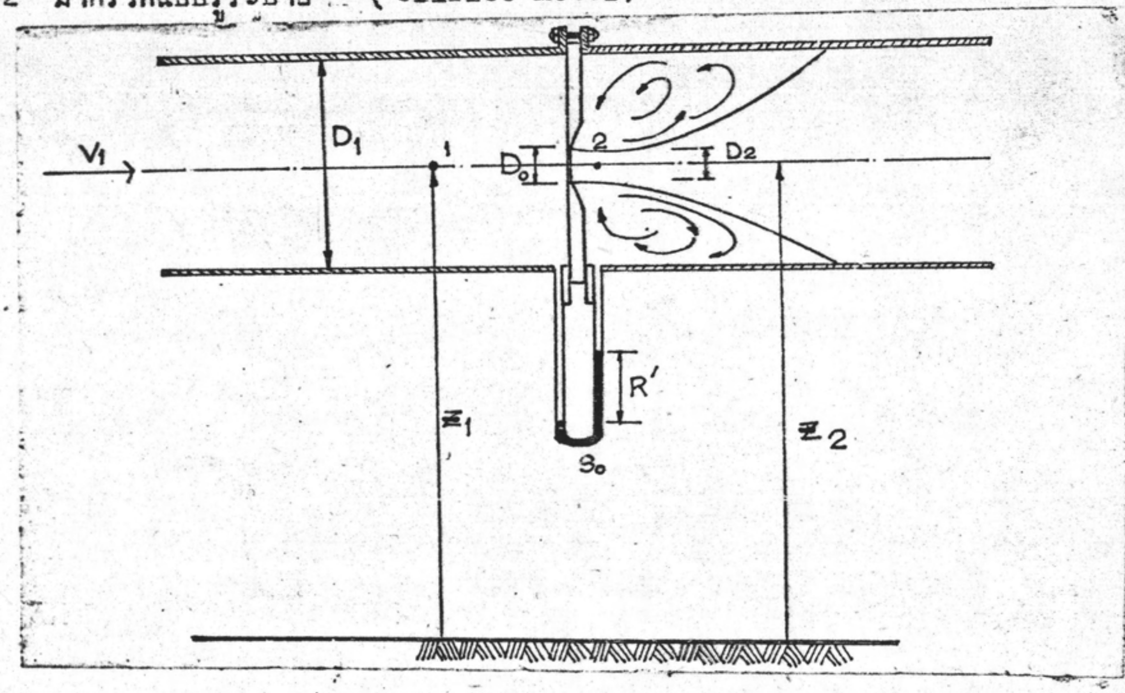
นั่นคือ ในกรณีเส้นท่อโดยทั่วไป

$$f = f(V, D, \rho, \epsilon, \epsilon', m)$$

$$f = f(\frac{VD\rho}{\mu}, \frac{\epsilon}{D}, \frac{\epsilon'}{D}, m)$$

ในกรณีที่เป็นท่อผิวเรียบ (Smooth pipe) ค่า $\epsilon = \epsilon' = m = 0$

2.2 มาตรวัดแบบรูระบาย (Orifice Meter)



รูป 2.2 แสดงมาตรวัดแบบรูระบาย

มาตรวัดแบบรูระบายเป็นมาตรที่ใช้วัดค่าอัตราการไหลของน้ำในเส้นท่อ ซึ่งเป็นการไหลเต็มท่อ (Flow under pressure) มีลักษณะโดยทั่วไปเป็นแผ่นวงกลมเจาะรูตรงกลางซึ่งรูนี้จะมีขนาดเล็กกว่าเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของเส้นท่อเสมอ

สำหรับการไหลของของไหลแน่น (Incompressible flow) ใช้สมการเบอร์นุยยี่ (Bernoulli's equation)ที่หน้าตัด 1 กับที่คอคอดเวน่า คอนแทรกต้า (Vena contracta) ของลำน้ำ, หน้าตัด 2, ของรูป 2.2 จะได้

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + Z_1 = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 \text{ - - - - - -} (2-2)$$

แต่ $Z_1 = Z_2$ เพราะท่อวางอยู่แนวราบ

จากสมการความต่อเนื่อง (Continuity equation) และ ส.ป.ส. ของการลดพื้นที่หน้าตัด (Coefficient of contraction) $C_c = \frac{A_2}{A_o}$ จะได้

$$V_1 \frac{\pi D_1^2}{4} = V_2 C_c \frac{\pi D_o^2}{4} \text{ - - - - -} (2-3)$$

นำค่าจาก (2-3) แทนใน (2-2) และทำค่า V_1 ให้หมดไปจะได้

$$\frac{V^2}{2g}[1-C_C^2(\frac{D_O}{D_1})] = \frac{P_1-P_2}{\gamma}$$

คูณค่าสัมประสิทธิ์ของความเร็ว (Coefficient of velocity) $C_V = \dfrac{V_{2a}}{V_2}$

ได้ความเร็วจริง (actual velocity) ที่เวน่า คอนแทรคต้า เป็น V_{2a}

จะได้ $$V_{2a} = C_V\sqrt{\frac{2g(P_1-P_2)/\gamma}{1-C_c^2(D_O/D_1)^4}}$$

คูณความเร็วจริงที่เวน่า คอนแทรคต้า ด้วยพื้นที่หน้าตัดจะได้อัตราการไหลในเส้นท่อเป็น

$$Q = C_dA_O\sqrt{\frac{2g(P_1-P_2)/\gamma}{1-C_c^2(D_O/D_1)^4}} \text{ - - - - -(2-4)}$$

ซึ่ง $C_d = C_V \cdot C_C$ ในเทอมของค่าความแตกต่างของดิฟเฟอเรนเชี่ยลมิเตอร์ R' สมการ (2-4) เขียนได้เป็น

$$Q = C_dA_O\sqrt{\frac{2gR'[(S_O/S_1)-1]}{1-C_c^2(D_O/D_1)^4}} \text{ - - - - -(2-5)}$$

เนื่องจากมาตรวัดแบบรูระบายในท่อน้ำนี้ ผนังของท่อด้านในอยู่ใกล้กับขอบของรูระบายมาก ดังนั้นพื้นที่หน้าตัดของคอคอดเวน่า คอนแทรคต้าจึงลดลงจากพื้นที่หน้าตัดของรูระบายน้อยมาก ค่า C_C จึงมีค่าสูง และสำหรับในการวิจัยครั้งนี้ของเหลวในดิฟเฟอเรนเชียลมิเตอร์จะเป็นน้ำตลอด และมีอากาศเป็นตัวกั้น ดังนั้นจากสมการ (2-4) เพื่อความสะดวก จะเขียนได้เป็น

$$Q = C_dA_O\sqrt{\frac{2g\Delta H}{1-(D_O/D_1)^4}} \text{ - - - - -(2-6)}$$

เมื่อ Q เป็นอัตราการไหลของน้ำในเส้นท่อ

Ao เป็นพื้นที่หน้าตัดของรูระบาย

g เป็นค่าความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางของโลก

ΔH เป็นค่าความแตกต่างของระดับน้ำที่อ่านได้จากดิฟเฟอเรนเชียลมิเตอร์

D_0 เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางของรูระบาย

D_1 เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของเส้นท่อ

ค่าการสูญเสียระดับความดันน้ำเนื่องจากการไหลผ่านมาตรวัดแบบรูระบายในช่วงการไหลแบบปะปน (Turbulent flow) คำนวณได้โดยสูตร

$$h_m = \beta \frac{V^2}{2g} \text{ - - - - - } (2-7)$$

เมื่อ

hm เป็นค่าการสูญเสียความดันเนื่องจากการไหลของน้ำผ่านมาตรวัดน้ำแบบรูระบาย

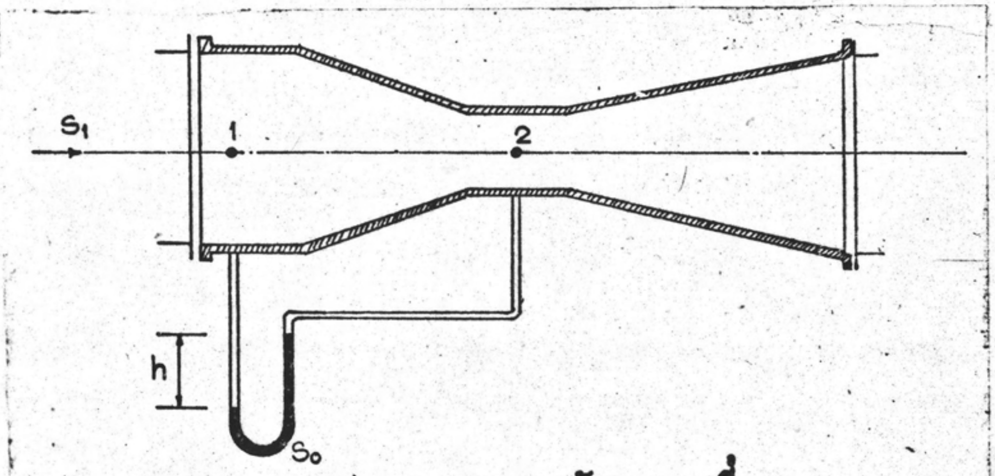
β เป็นค่าคงที่สำหรับการสูญเสียความดัน

v เป็นความเร็วของการไหลของน้ำในเส้นท่อ

g เป็นค่าความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางของโลก

2.3 มาตรวัดน้ำแบบเวนชูรี่ (Venturi meter)

มาตรวัดน้ำแบบเวนชูรี่ เป็นมาตรวัดน้ำที่อาศัยหลักการเดียวกับมาตรวัดแบบรูระบาย แต่ดัดแปลงให้มีการสูญเสียความดันน้อยลง เมื่อน้ำไหลผ่าน โดยใช้เป็นทรานซิชั่นของเส้นท่อ ค่อย ๆ ลดขนาดของเส้นท่อลงมาเรื่อย ๆ จนถึงขนาดที่ต้องการแล้วจึงค่อย ๆ ขยายขนาดของเส้นท่อไปจนเท่าเดิม ดังแสดงในรูป 2.3



รูป 2.3 แสดงมาตรวัดแบบเวนชูรี่

ให้ V_1t เป็นความเร็วทางทฤษฎีของน้ำที่จุด 1

P_1 เป็นความดันของของไหลที่จุด 1

V_2t เป็นความเร็วทางทฤษฎีที่จุด 2

P_2 เป็นความดันของของไหลที่จุด 2

γ เป็นค่าน้ำหนักจำเพาะของของไหล

D_1 เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นท่อที่จุด 1

A_1 เป็นพื้นที่หน้าตัดของเส้นท่อที่จุด 1

A_2 เป็นพื้นที่หน้าตัดของเส้นท่อที่จุด 2

Q เป็นอัตราการไหลผ่านเส้นท่อ

D_2 เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นท่อที่จุด 2

S_1 เป็นค่าความถ่วงจำเพาะของของไหล

S_o เป็นค่าความถ่วงจำเพาะของของไหลในมาโนมิเตอร์

จากสมการเบอร์นุยยี่ (Bernoulli's equation)

$$\frac{V_{1t}^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} = \frac{V_{2t}^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} \quad -----(2-8)$$

จากสมการความต่อเนื่อง $V_1D_1^2 = V_2D_2^2$

$$\therefore \quad \frac{V_1^2}{2g} = \frac{V_2^2}{2g}\left(\frac{D_2}{D_1}\right)^4 \quad -----(2-9)$$

ซึ่งสมการ (2-9) เป็นจริงทั้งกับความเร็วจริง ๆ (Actual velocity) และความเร็วทางทฤษฎี (Theoretical velocity)

สมการ (2-8) สามารถเขียนในรูปของ V_2t ได้ดังนี้

$$\frac{V_{2t}^2}{2g}\left[1-(D_2/D_1)^4\right] = \frac{P_1-P_2}{\gamma}$$

$$V_{2t} = \sqrt{\frac{2g(P_1-P_2)/\gamma}{1-(D_2/D_1)^4}} \text{-----}(2-10)$$

โดยการใส่ค่าสัมประสิทธิ์ความเร็วลงไป $V_{2a} = C_v V_{2t}$

$$\therefore V_{2a} = C_v\sqrt{\frac{2g(P_1-P_2)/\gamma}{1-(D_2/D_1)^4}} \text{------}(2-11)$$

สำหรับในการทดลองตามการวิจัยนี้ ของไหลในเส้นท่อและในดิฟเฟอเรนเชียลแมนอมิเตอร์ เป็นน้ำโดยตลอด โดยมีอากาศเป็นตัวกั้น

สมการ 2-11 เขียนได้เป็น

$$V_{2a} = \frac{C_v}{\sqrt{1-(D_2/D_1)^4}}\sqrt{2gh} \text{-----}(2-12)$$

คูณด้วยค่า A_2 จะได้ค่าอัตราการไหลเป็น

$$Q = \frac{C_v A_2\sqrt{2gh}}{\sqrt{1-(D_2/D_1)^4}} \text{-----}(2-13)$$

ให้ $C_v = C$

$$\therefore Q = \frac{CA_2}{\sqrt{1-(A_2/A_1)^2}}\sqrt{2gh} \text{-----}(2-14)$$

2.4 วิธีการของครอฟอร์ด – เชโนเวท ในการวิเคราะห์ระบบข่ายงานท่อน้ำ

(Pipe network Analysis by Crawford – Chenoweth method)

ครอฟอร์ดและเชโนเวท ได้ร่วมกันเสนอวิธีการวิเคราะห์ระบบข่ายงานท่อน้ำที่เขาค้นพบในปี ค.ศ. 1974 เขาทั้งสองได้ค้นพบวิธีการนี้ในระหว่างที่ร่วมกันทำงานโปรแกรม

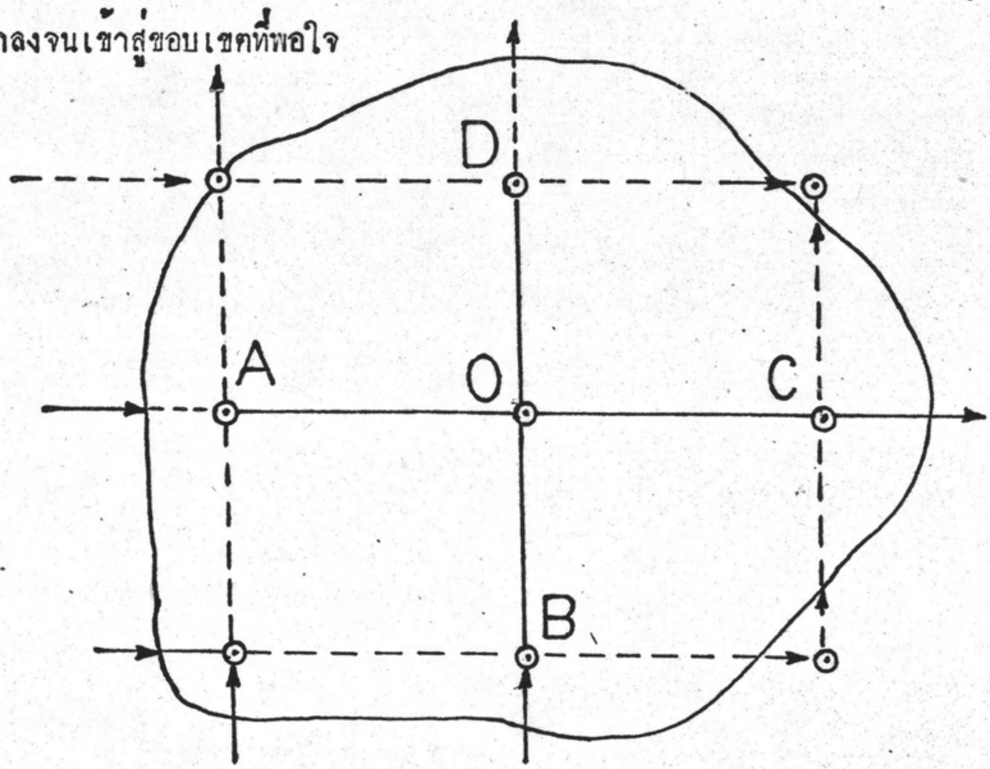
คอมพิวเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์ไฮดรอลิคซ์ทรานเชี่ยน (Hydraulic transient) ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการปิดประตูน้ำ (Valve) ในระบบข่ายงานท่อน้ำ หลังจากที่โรงสูบน้ำหยุดทำงานทั้งสอง เชื่อว่าวิธีการใหม่ของเขานี้ สามารถนำมาใช้งานได้ในวงกว้างกว่า สะดวกกว่าและง่ายต่อการเข้าใจมากกว่าวิธีอื่นใดที่เคยนิยมใช้กันมาก่อน รวมทั้งวิธีการของฮาร์ดี้ ครอสด้วย

วิธีการของครอฟอร์ด–เซโนเวท เป็นวิธีการแบบไอทีเรทีฟ เทคนิค (Iterative technique) เช่นเดียวกันกับวิธีการของฮาร์ดี้ครอส แต่กลับกันกับวิธีการของฮาร์ดี้ครอส กล่าวคือวิธีการของฮาร์ดี้ครอสนั้นโดยทั่วไป ใช้เดาค่าอัตราการไหลของน้ำในเส้นท่อของระบบข่ายงานท่อน้ำให้สอดคล้องกับสมการความต่อเนื่องก่อน แล้วจากนั้นจึงแก้ค่าที่สมมติไว้ทีละวงจนครบทุกวง แล้วเริ่มต้นแก้ใหม่จนกว่าจะได้ความถูกต้องอยู่ในขอบเขตที่ต้องการ แต่วิธีการของครอฟอร์ด–เซโนเวท ใช้การเดาค่าระดับความดันน้ำที่จุดตัดต่าง ๆ ในระบบข่ายงานท่อน้ำแทน จากนั้นจึงแก้ความดันที่เดาเอาไว้ในตอนแรก ทุก ๆ จุด ไปทีละรอบจนกว่าค่าแก้ของระดับความดันน้ำที่จุดตัดทุกจุดลดค่าลงจนเข้าสู่ขอบเขตที่พอใจ

ในระบบข่ายงานท่อน้ำ เราจะสามารถเดาค่าระดับความดันน้ำของจุดตัดทุกจุดได้ และถ้าเราคำนวณค่าอัตราการไหลเข้าออกที่จุดตัดใด ๆ โดยอาศัยจากค่าความแตกต่างของระดับความดันน้ำระหว่างจุดนี้และจุดที่มาเชื่อมด้วยทุก ๆ จุด โดยทั่วไปเรามักจะพบว่าสมการความต่อเนื่องใช้ไม่ได้ที่จุดนั้น กล่าวคืออัตราการไหลเข้าสู่จุดตัดจะไม่เท่ากับอัตราการไหลออกจากจุดตัด จากค่าความแตกต่างที่ไม่เท่ากันนี้ จะทำให้เราสามารถคำนวณได้ว่าค่าระดับความดันน้ำที่จุดนั้นควรจะลดลงหรือเพิ่มมากขึ้นเท่าใดจึงจะทำให้อัตราการไหลเข้าสู่จุดตัดเท่ากับอัตราการไหลออกจากจุดตัด การเพิ่มระดับความดันน้ำที่จุดตัดจะทำให้อัตราการไหลเข้าลดลงในขณะที่อัตราการไหลออกมากขึ้น การลดค่าระดับความดันน้ำที่จุดตัดจะให้ผลตรงกันข้าม

วิธีการนี้เริ่มต้นด้วยการเดาครั้งแรก ค่าระดับความดันน้ำของทุกจุดตัดในระบบข่ายงานท่อจากนั้นการคำนวณจะดำเนินไปผ่านจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งจนทั่วทั้งระบบข่ายงานท่อ ค่าระดับความดันน้ำที่แต่ละจุดตัดจะได้รับการปรับให้สูงขึ้นหรือต่ำลง เพื่อให้ได้ตามสมการความ

ต่อเนื่องที่จุดตัดนั้น ในระหว่างการปรับแต่ละครั้งระดับความดันน้ำของจุดตัดรอบจุดที่กำลังพิจารณาจะถือเอาว่าถูกอยู่ ถึงแก้อย่างไรก็ตามโดยปกติจะยังไม่เป็นค่าที่ถูกต้องเสมอในแต่ละครั้งของการคำนวณ จะทำสำหรับจุดตัดจุดหนึ่งของระบบข่ายงานท่อ ระดับ ความดันน้ำที่จุดตัดที่กำลังพิจารณาจะได้รับการปรับเพื่อให้ได้ตามสมการความต่อเนื่องที่จุดนั้น และด้วยเหตุนี้ ระดับความดันน้ำของจุดตัดทุก ๆ จุด จะค่อย ๆ เข้าสู่ค่าที่ถูกต้อง กระบวนการคำนวณที่ทำซ้ำกันเช่นนี้ จะทำซ้ำไปทีละรอบ ๆ จนกว่าค่าแก้ระดับความดันน้ำที่จุดตัดทุกจุดลดค่าลงจนเข้าสู่ขอบเขตที่พอใจ



รูป 2.4 แสดงส่วนหนึ่งของระบบข่ายงานท่อน้ำ
(ขณะพิจารณาปรับระดับความดันน้ำที่จุด O ระดับความดันน้ำที่จุด A, B, C และ D จะถือเป็นค่าคงที่)

จากสมการของ คาร์ซี่ไว้ส์บาคซ์

$$h_f = \frac{fLV^2}{D2g}$$

จะได้ $$V = \sqrt{h_f}\sqrt{\frac{2gD}{fL}} \quad -----(2-15)$$

อัตราไหลของน้ำในเส้นท่อ $Q = VA$

พื้นที่หน้าตัดของเส้นท่อ $A = \frac{\pi D^2}{4}$

แทนค่าจากสมการ (2–15) และ A ลงใน Q = VA

จะได้

$$Q = \frac{\pi D^2}{4}\sqrt{\frac{2gD}{fL}}\sqrt{h_f} \text{ -----(2–16)}$$

เขียนเป็นรูปสั้น ๆ ได้ว่า

$$Q = K\sqrt{h_f} \text{ -----(2–17)}$$

เมื่อ

$$K = \frac{\pi D^2}{4}\sqrt{\frac{2gD}{fL}} \text{ -----(2–18)}$$

กำหนดให้อัตราการไหลเข้าสู่จุดตัดที่กำลังพิจารณามีค่าเป็นบวก, อัตราการไหลออกจากจุดตัดมีค่าเป็นลบ และอัตราการไหลออกจากระบบข่ายงานท่อน้ำที่จุดตัดมีค่าเป็น บวก

พิจารณาที่จุดตัด o รูป 2.3 จะได้

$$Q_{AO} + Q_{BO} - Q_{OC} - Q_{OD} - Q_{ext} = \Delta Q \text{ -----(2–19)}$$

จากสมการความต่อเนื่อง ΔQ จะต้องมีค่าเป็นศูนย์ แต่เนื่องจากอัตราการไหลในเส้นท่อ คำนวณจากค่าระดับความดันน้ำที่เดาขึ้น ดังนั้น ΔQ จึงเป็นค่าที่อัตราการไหลเข้ามากกว่าอัตราการไหลออกที่จุดตัด o

กำหนดให้ระดับความดันน้ำที่เดาขึ้น ตามจุดตัดต่าง ๆ ใช้สัญลักษณ์เป็น Z

$$\therefore \Delta Q = K_{AO}\sqrt{Z_A - Z_O} + K_{BO}\sqrt{Z_B - Z_O} - K_{OC}\sqrt{Z_O - Z_C} - K_{OD}\sqrt{Z_O - Z_D} - Q_{ext} \text{-----} (2\text{-}20)$$

ถ้าหากเพิ่มค่าระดับความดันน้ำที่จุด O ขึ้นอีก ΔH, Q_{AO} และ Q_{BO} จะมีค่าลดลง ในขณะที่ Q_{OC} และ Q_{OD} มีค่าเพิ่มขึ้น ถ้าหากสมมติว่า ค่า ΔH ที่เพิ่มให้ระดับความดันน้ำที่จุด O ถูกต้องพอดี ทำให้ค่า ΔQ ที่คำนวณออกมาเป็นศูนย์ กำหนดให้ค่า ΔH ที่เพิ่มระดับความดันน้ำมีค่าเป็นบวก และที่ลดระดับความดันน้ำมีค่าเป็นลบ และเรียกค่าการลดระดับความดันน้ำในเส้นท่อ (Head loss in each pipe) เป็น Hx ตัวอย่างเช่น $Z_A - Z_O = HA$ ดังนั้น

$$0 = K_{AO}\sqrt{H_A - \Delta H} + K_{BO}\sqrt{H_B - \Delta H} - K_{OC}\sqrt{H_C + \Delta H} - K_{OD}\sqrt{H_D + \Delta H} - Q_{ext} \text{-----} (2\text{-}21)$$

จากสมการไบโนเมี่ยล เอ็กซแพนชั่น (Binomial expansion) ของ

$(H \pm \Delta H)^{1/2}$ ได้

$$(H \pm \Delta H)^{1/2} = H^{1/2} \pm \frac{\Delta H}{2H^{1/2}} \pm \text{---------} \text{--}(2\text{-}22)$$

แทนค่าในทำนองเดียวกับ (2-22) ลงใน (2-21) จะได้

$$0 = K_{AO}\sqrt{H_A} - \frac{K_{AO}\Delta H}{2\sqrt{H_A}} + K_{BO}\sqrt{H_B} - \frac{K_{BO}\Delta H}{2\sqrt{H_B}} - K_{OC}\sqrt{H_C} - \frac{K_{OC}\Delta H}{2\sqrt{H_C}} - K_{OD}\sqrt{H_D} - \frac{K_{OD}\Delta H}{2\sqrt{H_D}} - Q_{ext} \text{-----} (2\text{-}23)$$

เทอมของ $\sqrt{H_x}$ ตัวบนจะมีเครื่องหมายตามที่ได้จากการเอาค่าระดับความดันน้ำที่จุด 0 ไปลบจากระดับความดันน้ำที่จุดอีกปลายหนึ่งของเส้นท่อ ส่วนค่ารากที่สองของส่วนที่เป็นเศษนั้น จะมีค่าเป็นบวกเสมอ เนื่องจากค่าต่าง ๆ ดังกล่าวนี้คือค่าอัตราการไหลในเส้นท่อ ดังนั้นจากหลักเกณฑ์ดังกล่าว จะให้ผลออกมาเองโดยอัตราการไหลเข้าจะมีค่าเป็นบวก และอัตราการไหลออกจะมีค่าเป็นลบ

แก้สมการ (2-23) จะได้

$$\Delta H = \frac{\sum(\text{Signed}\,K\sqrt{H_f}) - Q_{ext}}{\frac{1}{2}\sum(K/\sqrt{H_f})} \text{-----(2-24)}$$

ขณะที่การคำนวณดำเนินไปเรื่อย ๆ ทั่วทั้งระบบข่ายงานท่อ ค่า ΔH ที่คำนวณได้สำหรับแต่ละจุด ควรจะนำไปแก้ค่าระดับความดันน้ำที่จุดนั้นเลยทันที ถ้าค่า ΔH เป็นบวกระดับความดันน้ำที่จุดนั้นจะสูงขึ้นและลดลง ถ้าค่า ΔH เป็นลบ ถ้าหากไม่มีการนำน้ำออกจากระบบข่ายงานท่อที่จุดนั้นเลย ค่า Qext จะเป็นศูนย์ ตรงกันข้ามถ้ามีการนำน้ำเข้าสู่ระบบท่อที่จุดนั้นโดยไม่มีการควบคุมความดัน ค่า Qext จะเป็นลบ ซึ่งเมื่อแทนในสมการ (2-24) ก็จะทำให้กลับมีค่าเป็นบวก

จะเห็นได้ว่าวิธีการของครอฟอร์ด – เชโนเวท ต้องการการคำนวณอย่างง่าย ๆ ทีละจุด ๆ ไปเป็นรอบ ๆ แต่กินเวลานานมาก และเป็นงานหนักอย่างยิ่ง ถ้าจะทำการคำนวณด้วยเครื่องคิดเลขอย่างธรรมดา และสำหรับกับระบบข่ายงานท่อน้ำขนาดใหญ่ที่มีเส้นท่อเป็นจำนวนร้อย ๆ เส้นท่อ ด้วยแล้ว อาจกล่าวได้เลยว่าเป็นไปไม่ได้ที่จะทำการคำนวณด้วย เครื่องคิดเลขไฟฟ้าธรรมดา เพราะอาจจะกินเวลานับเป็นปี ๆ ก็ได้ กว่าจะคำนวณเสร็จ และถึงแม้คำนวณเสร็จก็มีโอกาสที่จะผิดได้มากมาย ในขณะเดียวกันวิธีการนี้เป็นวิธีคำนวณอย่างง่าย ๆ ที่ทำซ้ำ ๆ กันเป็นร้อยเป็นพันครั้ง ซึ่งเราสามารถจะเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ให้ทำงานตามวิธีนี้ได้อย่างง่ายดาย และสะดวกรวดเร็วมาก และจะสามารถย่นเวลาที่ต้องใช้ในการคำนวณจากเวลาเป็น

ปี ๆ ลงมาเหลือเพียงไม่เกิน 20 นาที เท่านั้น ต่อระบบข่ายงานท่อน้ำขนาดใหญ่ระบบหนึ่ง ๆ ซึ่งจะทำให้การทำงานเกี่ยวข้องกับระบบข่ายงานท่อน้ำโดยทั่วไป เป็นไปอย่างสะดวกรวดเร็ว ถูกต้อง ประหยัด และทันกับความต้องการในการใช้งาน