

โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อวิเคราะห์ความดันชั่วครู่ของการไหลในท่อ A Computer Program for Analysing Transient Pressure of Flow in Pipe

นิรมิต เดชสุภา

กองโรงงาน เหมืองแม่เมาะ (กฟผ.) อ. แม่เมาะ จ. ลำปาง 52220

โทร. 66(54)-254452, โทรสาร 66(54)-254436

อภิวัฒน์ พลชัย สมคิด สลัดยะนันท์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

จ. เชียงใหม่ 50200

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการเสนอผลการวิจัยขั้นแรกเกี่ยวกับการคำนวณหาความดันชั่วครู่ สำหรับการไหลของน้ำในระบบท่อเดี่ยว พิจารณาให้การไหลเป็นแบบมิติเดียวตามแนวเส้นท่อ สมมุติว่าน้ำเป็นของไหลชนิดนิวโตเนียน ท่อ และ น้ำมีความยืดหยุ่นในตัวเอง สมการควบคุมพฤติกรรมของการไหลคือสมการความต่อเนื่องกับสมการของการเคลื่อนที่ เมื่อรวมกันแล้วเป็นสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยแบบไม่เชิงเส้นชนิดไฮเพอร์โบลิก แล้วหาผลเฉลยโดยใช้ระเบียบวิธีผลต่างอันดับ ซึ่งมีการละเอียดตามวิธีลักษณะเฉพาะแบบตารางสี่เหลี่ยมมุมฉาก จึงพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ขึ้นเพื่อการนี้ โดยแสดงแผนภูมิการคำนวณไว้อย่างชัดเจน และได้แสดงผลการทดสอบความถูกต้องของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้น โดย (1) เปรียบเทียบกับผลการคำนวณของนักวิจัยอื่น และ (2) เปรียบเทียบกับผลซึ่งได้จากการวัดจริงของนักวิจัยอื่น จากการทดสอบพบว่าผลที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์นี้มีความถูกต้องดีมาก จึงน่าจะมีศักยภาพเพียงพอที่จะนำไปพัฒนาใช้กับระบบการสูบและการไหลของน้ำในท่อซึ่งเป็นระบบใหญ่ขึ้นได้

Abstract

This paper presents primary results from the research on calculation for pressure transient of water flow in single pipe systems. The flow is assumed one dimensional along the pipe, and the fluid being Newtonian. Flow behavior is governed by continuity

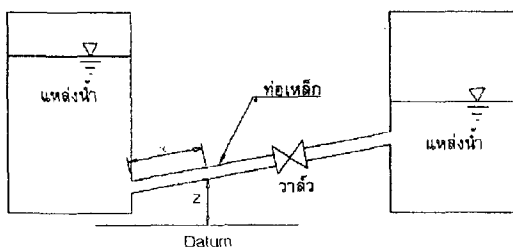
equation and equation of motion, which are combined to be hyperbolic non-linear partial differential equations. Then they are solved by using finite difference method with details being rectangular-grid characteristics method. So, a computer program is developed for this; the flow chart is clearly exhibited herein. The program are tested by comparing the results (1) with existing calculated ones and (2) with known measured ones of other researchers. The finding is that the pressure transients obtained from this program are in good agreement with both type of those results. Thus, this computer program may have great potential, after being developed, for using in pipe flows of larger pumping systems.

1. บทนำ

ปรากฏการณ์พื้นฐานอย่างหนึ่งที่เกิดขึ้นเสมอ ในระบบการไหลในท่อคือการเกิดความดันชั่วครู่ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสถานะของการไหล ในอดีตเรียกปรากฏการณ์นี้ว่าฆ็อนน้ำ (Waterhammer) เมื่อมีความดันชั่วครู่เกิดขึ้นในระบบท่อ อาจมีความดันเพิ่มสูงขึ้นมากพอที่จะทำให้เกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์ที่อยู่ในระบบท่อได้ ซึ่งปรากฏการณ์นี้ได้ทำความเสียหายแก่ระบบระบายน้ำของเหมืองแม่เมาะ (กฟผ.) ด้วยเช่นกัน ความดันชั่วครู่เป็นการแกว่งของความดันอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วของน้ำภายในระบบ พลังงานจลน์ของน้ำบางส่วนจะถูกเปลี่ยนไปเป็น

พลังงานความยืดหยุ่น ทำให้ความดันภายในท่อเพิ่มสูงขึ้น สมการควบคุมพฤติกรรมการณ์การไหลเป็นสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยแบบไม่เชิงเส้นชนิดไฮเพอร์โบลิกซึ่งไม่สามารถหาผลเฉลยรูปแบบปิดได้ จึงมีการพัฒนาวิธีหาผลเฉลยโดยวิธีต่างๆขึ้น อย่างไรก็ตามวิธีที่เป็นที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายคือ วิธีลักษณะเฉพาะซึ่งมีข้อดีคือสามารถหาผลเฉลยของระบบการไหลที่ยู่ยากและมีเงื่อนไขขอบที่ซับซ้อนได้ ในบทความนี้ใช้วิธีลักษณะเฉพาะเชิงตารางสี่เหลี่ยมมุมฉากซึ่งเป็นวิธีหนึ่งของวิธีลักษณะเฉพาะ จุดประสงค์ของบทความนี้เพื่อสร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์เบื้องต้นสำหรับวิเคราะห์ความดันชั่วคราวภายในท่อ เพื่อใช้เป็นโปรแกรมพื้นฐานสำหรับพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ให้สามารถวิเคราะห์ระบบการไหลในท่อของเหมืองแม่เมาะซึ่งเป็นระบบการไหลในท่อขนาดใหญ่ และซับซ้อน ภายในบทความนี้จะพบกับสมการควบคุมการไหลแบบไม่คงที่ภายในท่อ 2 สมการ คือ สมการความต่อเนื่อง และสมการการเคลื่อนที่ สมการทั้งสองนี้เป็นสมการที่สำคัญในการวิเคราะห์ปัญหาความดันชั่วคราว นอกจากนี้ยังมีสมการควบคุมการไหลผ่านอุปกรณ์ในระบบท่อซึ่งใช้แนวการวิเคราะห์การไหลแบบคงตัวเข้าช่วย

ระบบท่อเบื้องต้นที่พิจารณาใช้สร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์เป็นระบบท่อเดี่ยว เนื่องจากระบบนี้เป็นระบบการไหลในท่อพื้นฐานที่พบมากที่สุด สามารถสร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อวิเคราะห์และทดสอบความถูกต้องได้ง่าย นอกจากนี้ยังสามารถหาผลของกรณีศึกษาที่ทำโดยนักวิจัยอื่นมาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณของโปรแกรมที่สร้างขึ้นได้สะดวก รูปที่ 1 แสดงระบบท่อเดี่ยวซึ่งประกอบด้วยแหล่งน้ำที่มีระดับคงที่ ท่อเหล็กผบาง ข้อต่อต่างๆ และวาล์วที่สามารถควบคุมการปิดของลิ้นวาล์วได้ โดยมีเงื่อนไขเริ่ม



รูปที่ 1 แสดงระบบท่อเดี่ยว

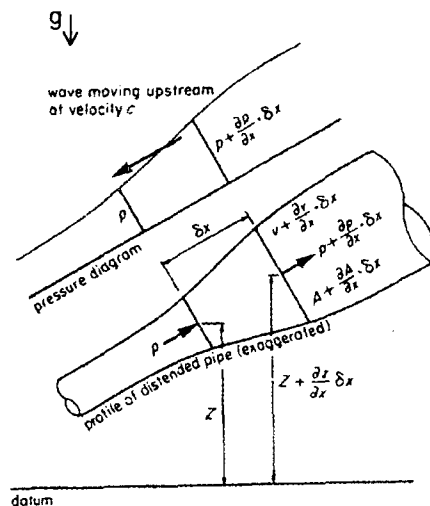
ต้นเป็นการไหลแบบสภาวะคงตัวก่อนเกิดความดันชั่วคราว และสภาวะการไหลในท่อที่ต้นทาง ($x=0$) และ ปลายทาง (ปลายท่อ) เป็นเงื่อนไขขอบของระบบ

2. สมการควบคุมพฤติกรรมการณ์การไหล

สำหรับการไหลในระบบท่อเดี่ยวเบื้องต้นนี้จะพิจารณาสมการควบคุมพฤติกรรมการณ์การไหลเป็นสองส่วน คือ สำหรับการไหลผ่านท่อกับการไหลผ่านอุปกรณ์ท่อ และกำหนดเงื่อนไขขอบที่ต้นทาง และที่ปลายทาง

2.1 การไหลผ่านท่อ

ใช้สมมุติฐานว่าการไหลเป็นแบบมิติเดียว น้ำเป็นของไหลชนิดนิวโตเนียน ท่อและน้ำมีความยืดหยุ่นเมื่อใช้สมมุติฐานดังกล่าวร่วมกับกฎการอนุรักษ์มวลและกฎการเคลื่อนที่สำหรับชั้นอนันต์ใดๆหนึ่ง ดังรูปที่ 2 กำหนดให้แกนพิกัด x



รูปที่ 2 แสดงชั้นอนันต์ที่ใช้วิเคราะห์การไหลในท่อ
ที่มา Fox [3]

อยู่ในแนวเดียวกับแนวเส้นท่อ สามารถเขียนสมการความต่อเนื่องและสมการของการเคลื่อนที่ ตามลำดับได้ดังนี้

$$\frac{\partial h}{\partial t} + v \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{c^2}{g} \frac{\partial v}{\partial x} - v \frac{\partial z}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{fv|v|}{2gd} = 0 \quad (2)$$

โดยที่ $h = \frac{P}{\gamma} + z$ คือค่าความดันศักย์ (Potential head)

v คือ ความเร็วของของไหล g คือ ค่าความโน้มถ่วงของโลก c คือ ความเร็วคลื่นของความดัน f คือ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของท่อ d คือ เส้นผ่าศูนย์กลางท่อ t คือ เวลา

ในการพิจารณาความดันชั่วคราวจะมุ่งสนใจค่า p หรือ h

และ v ที่เวลาต่างๆ ณ ตำแหน่งที่สนใจหรือตลอดความยาวท่อ
ความเร็วคลื่นของความดันชั่วคราวที่ได้จากการใช้สมการ
ความต่อเนื่อง และสมการการเคลื่อนที่สำหรับชิ้นอิสระ คำนวณได้
จาก $c = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$ แต่ในทางปฏิบัติความยืดหยุ่นของน้ำ และ
การถูกบังคับ (Constraint) ของท่อมีอิทธิพลต่อความเร็ว
คลื่นของความดันชั่วคราว Streeter [5] จึงเสนอให้ใช้สมการ
คำนวณความเร็วคลื่นของความดันดังนี้

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho \left[1 + \left(\frac{K}{E} \right) \psi \right]}}$$

ค่า ψ เป็นตัวแปรไร้มิติแปรตามคุณสมบัติยืดหยุ่นของ
ท่อและการบังคับท่อ (n) ท่อผนังบางยึดแน่นไม่เคลื่อนที่
ตามแนวยาว $\psi = \frac{d}{e}(1 - \nu^2)$ (ข) ท่อผนังบางยึดแน่นเฉพาะ
ต้นทาง $\psi = \frac{d}{e}(1.25 - \nu)$ (ค) ท่อผนังบางที่มี Expansion
joint $\psi = \frac{d}{e}$ โดยที่ K คือ มัลล์มอดุลัสความยืดหยุ่น (Bulk
modulus of elasticity) E คือ มอดุลัสของยัง (Young's
modulus) ของวัสดุที่ใช้ทำท่อ e คือ ความหนาของผนังท่อ
 ρ คือ ความหนาแน่นของของเหลว ν คือ อัตราส่วนปัวซอง
(Poisson's ratio) ของวัสดุที่ใช้ทำท่อ

2.2 การไหลผ่านวาล์วและอุปกรณ์ท่อ

การไหลผ่านวาล์วและอุปกรณ์จะใช้สมมุติฐานดังนี้

2.2.1 ใช้สมการการไหลผ่านรูเจาะที่สภาวะคงตัว

(Steady state orifice equation)

2.2.2 วาล์วและอุปกรณ์ท่อถือว่าเป็นจุด (ไม่มีความยาว) บนเส้นท่อ

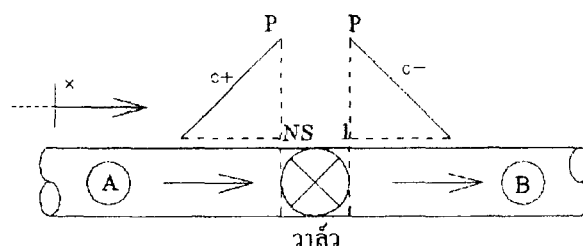
2.2.3 ไม่มีการเก็บกักของไหลภายในวาล์วและอุปกรณ์

2.2.4 การไหลสามารถกลับทิศทางได้

ในรูปที่ 3 ถ้าเป็นการไหลจากซ้ายไปขวาหรือไหลเชิงบวก (Positive flow) และท่อ A และ B มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากัน สมการการไหลผ่านรูเจาะมีรูปแบบดังนี้, Streeter [5]

$$v_{P_1} = v_{P_{NS}} = \frac{v_0}{\sqrt{h_0}} \tau \sqrt{h_{P_1} - h_{P_{NS}}} \quad (3)$$

ถ้าเป็นการไหลเชิงลบ (Negative flow) ซึ่งในรูปที่ 3 เป็นการไหลจากขวาไปซ้าย สมการการไหลผ่านรูเจาะคือ



รูปที่ 3 แสดงการไหลผ่านวาล์ว

$$v_{P_1} = v_{P_{NS}} = \frac{v_0}{\sqrt{h_0}} \tau \sqrt{h_{P_1} - h_{P_{NS}}} \quad (4)$$

เมื่อ v_{P_1} และ $v_{P_{NS}}$ คือ ความเร็วของของไหลในท่อที่ B และ A ตามลำดับ v_0 คือ ความเร็วของของไหล ณ เวลาเริ่มต้น h_0 คือ ล้ำความดันของของไหล ณ เวลาเริ่มต้น τ คือ Dimensionless valve opening coefficient $h_{P_1} - h_{P_{NS}}$ คือ ผลต่างของล้ำความดันศักย์ระหว่างท่อ B และ A ณ จุดตำแหน่งวาล์วหรืออุปกรณ์

2.3 เงื่อนไขขอบที่เป็นแหล่งน้ำ

สภาวะการไหลตรงบริเวณแหล่งน้ำที่มีระดับน้ำคงที่ จะมีล้ำความดันศักย์คงที่ตลอดเวลา ซึ่งมีสมการดังนี้

$$h(t) = \text{ค่าคงที่} = \frac{P_{res}}{\gamma} + z \quad (5)$$

เมื่อ $\frac{P_{res}}{\gamma}$ คือ ล้ำความดันของแหล่งน้ำ, $\gamma = \rho g$ z

คือ ระดับความสูงของแหล่งน้ำ

3. สมการผลต่างอันดับของการไหลในระบบท่อเดี่ยวเบื้องต้น

จากสมการควบคุมต่างๆที่ประกอบเป็นระบบการไหลในท่อจะนำมาแปลงเป็นสมการผลต่างอันดับเพื่อสร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้ดังนี้

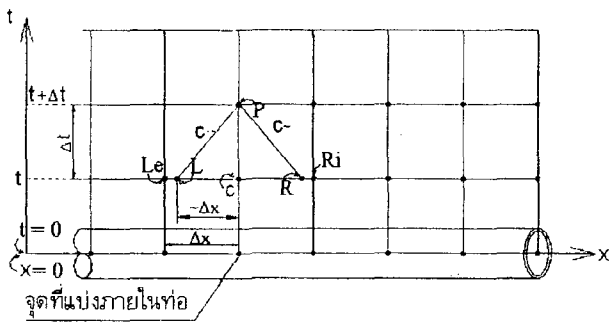
3.1 การไหลผ่านท่อ

การหาสมการผลต่างอันดับมีหลายวิธี ในที่นี้ใช้วิธีลักษณะสมบัติ (Method of characteristics) ตามที่ Fox [3] เสนอไว้ซึ่งสามารถแปลงสมการ (1) และ (2) ดังนี้

$$\frac{dv}{dt} + \frac{g}{c} \frac{dh}{dt} + \frac{fv|v|}{2d} - \frac{gv}{c} \frac{dz}{dx} = 0, \text{ เมื่อ } \frac{dx}{dt} = c \quad (6)$$

$$\frac{dv}{dt} - \frac{g}{c} \frac{dh}{dt} + \frac{fv|v|}{2d} + \frac{gv}{c} \frac{dz}{dx} = 0, \text{ เมื่อ } \frac{dx}{dt} = -c \quad (7)$$

เนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่าง x และ t ในสมการ (6) ต้องสอดคล้องกับ $\frac{dx}{dt} = c$ จึงเรียกสมการ $\frac{dx}{dt} = c$ ว่า สมการลักษณะเฉพาะของสมการ (6) ทำนองเดียวกัน $\frac{dx}{dt} = -c$ เป็นสมการลักษณะเฉพาะของสมการ (7) เมื่อพิจารณาแผนภาพ $x-t$ แบบตารางสี่เหลี่ยมมุมฉากจะได้ดังรูปที่ 4 และเมื่อต้องการคำนวณหา h และ v ที่เวลา $t + \Delta t$ ณ x ค่าหนึ่ง เช่นที่จุด P ก็จะประยุกต์สมการ (6) และ (7) ลง



รูปที่ 4 แสดงส่วนของท่อในระนาบ $x-t$

บนสมการลักษณะเฉพาะ จะได้สมการผลต่างอันตะตามลำดับ ดังนี้

$$v_P - v_L + \frac{g}{a}(h_P - h_L) + \frac{fv_L|v_L|\Delta t}{2d} - \frac{gv_L}{c} \left(\frac{dz}{dx} \right)_L \Delta t = 0 \quad (8)$$

$$v_P - v_R + \frac{g}{a}(h_P - h_R) + \frac{fv_R|v_R|\Delta t}{2d} + \frac{gv_R}{c} \left(\frac{dz}{dx} \right)_R \Delta t = 0 \quad (9)$$

จากการวางท่อจะทราบหอยอม $\frac{dz}{dx}$ สมการ (8) และ (9)

ใช้คำนวณหา h และ v ที่เวลา $t + \Delta t$ ณ จุด P ได้

3.2 สมการผลต่างอันตะสำหรับการไหลผ่านวาล์วและอุปกรณ์ท่อ

จากรูปที่ 3 ถ้าการไหลเป็นเชิงบวก และท่อ A และ B มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากัน ในสมการ (3) ซึ่งเป็นสมการการไหลผ่านรูเจาะ กำหนดให้ Valve flow coefficient เป็นดังนี้, Chaudhry [1]

$$C_v = \frac{(Q_0 \tau)^2}{2H_0} = \frac{A^2 (v_0 \tau)^2}{2H_0} \quad (10)$$

จึงสามารถหา h_{PNS} ได้ดังนี้

$$h_{PNS} = C_P - Bv_P \quad (11)$$

$$\text{โดยให้ } C_P = h_L + \frac{c}{g} v_L - \frac{c}{g} \frac{f \Delta t v_L |v_L|}{2d} \text{ และ } B = \frac{c}{g}$$

จากสมการ (4) สำหรับการไหลเชิงลบได้

$$h_{P_i} = C_M + Bv_P \quad (12)$$

$$\text{โดยให้ } C_M = h_R - \frac{c}{g} v_R + \frac{c}{g} \frac{f \Delta t v_R |v_R|}{2d}$$

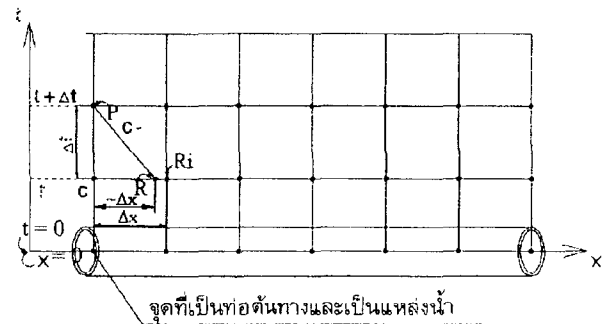
ใช้สมการ (10) (11) และ (12) สามารถหา v_{P_i} ในสมการ (3) ดังนี้

$$v_{P_i} = v_{PNS} = -\frac{2C_v B}{g} + \sqrt{\left(\frac{2C_v B}{g} \right)^2 + \frac{2C_v}{A^2} (C_P - C_M)} \quad (13)$$

เนื่องจากเป็นสมการที่ได้มาจากการไหลเชิงบวกซึ่งต้องสอดคล้องกับเงื่อนไข $C_P - C_M > 0$ ถ้า $C_P - C_M \leq 0$ การไหลจะเป็นการไหลเชิงลบ และสามารถหา v_{P_i} ได้ดังนี้

$$v_{P_i} = v_{PNS} = \frac{2C_v B}{g} - \sqrt{\left(\frac{2C_v B}{g} \right)^2 - \frac{2C_v}{A^2} (C_P - C_M)} \quad (14)$$

3.3 เงื่อนไขขอบของท่อตันทางซึ่งเป็นแหล่งน้ำ



รูปที่ 5 แสดงท่อตันทางเป็นแหล่งน้ำ

การหาสมการผลต่างอันตะ ใช้สมการ (9) เพียงสมการเดียว ดังนี้

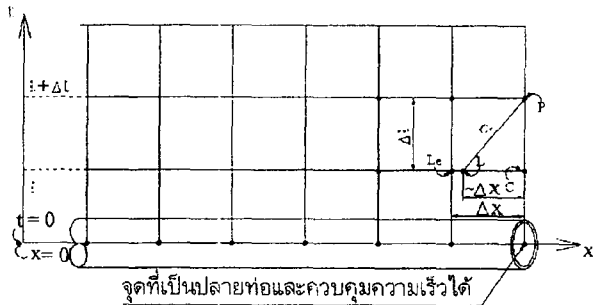
$$v_P = v_R + \frac{g}{c}(h_P - h_R) - \Delta t \frac{g}{c} v_R \left(\frac{dz}{dx} \right)_R - \frac{f}{2d} v_R |v_R| \Delta t \quad (15)$$

เมื่อ h_P เป็นไปตามสมการ (5)

3.4 เงื่อนไขขอบของท่อปลายทางซึ่งทราบความเร็ว

ถ้ารู้ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วที่ปลายท่อกับเวลา $v(L,t) = f(t)$ จะหาสมการความดันชั่วคราวได้โดยใช้สมการ (8) ดังนี้

$$h_P = h_L + \frac{c}{g}(v_L - v_P) + \Delta t v_L \left(\frac{dv_L}{dt} \right) - \frac{c}{g} \frac{f}{2d} v_L |v_L| \Delta t \quad (6)$$



รูปที่ 6 แสดงการวิเคราะห์การไหลบริเวณปลายท่อ

4. โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับคำนวณและการทดสอบ

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ถูกเขียนขึ้นตามตามแผนภูมิการคำนวณดังแสดงในรูปที่ 18 ในการเขียนโปรแกรมต้องกำหนด Δx , Δt เพื่อให้ผลลัพธ์ลู่เข้าหาคำตอบที่ต้องการ โดยใช้เกณฑ์เสถียรภาพของ Courant, Fox [3] จากนั้นทดสอบโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยใช้ วิธีเปรียบเทียบผลการคำนวณที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สร้างขึ้นกับผลลัพธ์จาก (ก) การไหลผ่านท่อเอียงที่เชื่อมระหว่างแหล่งน้ำที่มีระดับคงที่ต่างกัน, Watter [4] และ (ข) การไหลในท่อที่ผ่านวาล์วซึ่งควบคุมการเปิด-ปิดด้วยมอเตอร์ซึ่ง Elansary[2] ทำการทดลองจริงในห้องปฏิบัติการ โดยมีรายละเอียดขั้นตอนการจัดเตรียมข้อมูลสำหรับคำนวณมีดังนี้

4.1 การไหลผ่านท่อเอียงที่เชื่อมระหว่างแหล่งน้ำที่มีระดับคงที่ต่างกัน

ในตัวอย่างนี้การคำนวณของ Watter [4] ใช้หน่วยอังกฤษดังนั้นเพื่อให้การเปรียบเทียบชัดเจนขึ้นจึงใช้หน่วยตาม Watter ระบบการไหลในท่อแสดงในรูปที่ 7 ประกอบด้วยท่อเหล็กขนาด 30 นิ้วมีความเร็วคลื่นของความดัน 4060 ฟุตต่อวินาที ความเร็วของน้ำเริ่มต้น 5 ฟุตต่อวินาที การปิดตัวของวาล์วทำให้ความเร็วของน้ำไหลออกจากวาล์วลดลงอย่างคงที่และแปรผันตรงกับเวลาจนเหลือศูนย์ ภายใน 1 วินาที ขั้นตอนการจัดเตรียมข้อมูลสำหรับการคำนวณมีดังนี้

4.1.1 แบ่งท่อเป็น 5 ท่อนยาวท่อนละ 1000 ฟุต

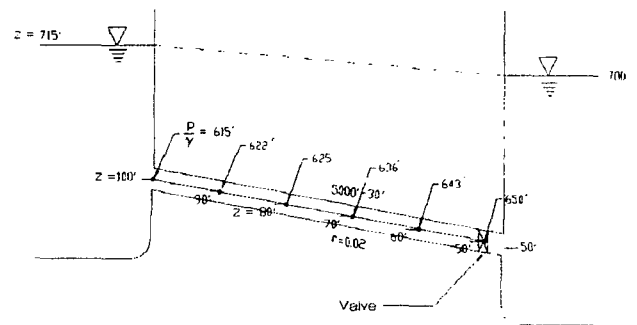
4.1.2 คำนวณระยะห่างของเวลาที่ใช้ในการคำนวณแต่ละขั้น

4.1.3 คำนวณหาความเร็วและความดัน เมื่อเวลาเริ่มต้นซึ่งนำไปใช้เป็นเงื่อนไขเริ่มต้นของโปรแกรม

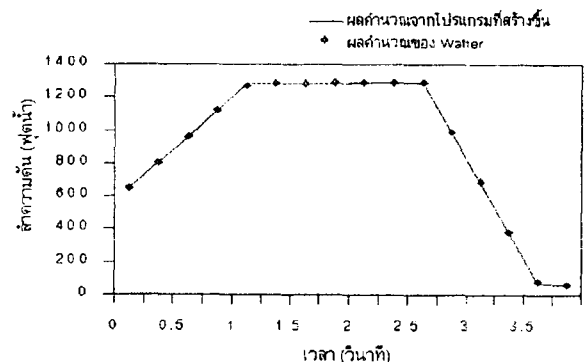
4.1.4 คำนวณความเร็วที่เปลี่ยนแปลงที่วาล์ว ทุกๆระยะห่างของเวลาตั้งแต่ 0 ถึง 4 วินาที

4.1.5 ป้อนข้อมูลคุณสมบัติอื่นของระบบ เช่น ความเร็วคลื่นของความดัน ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของท่อ เป็นต้น

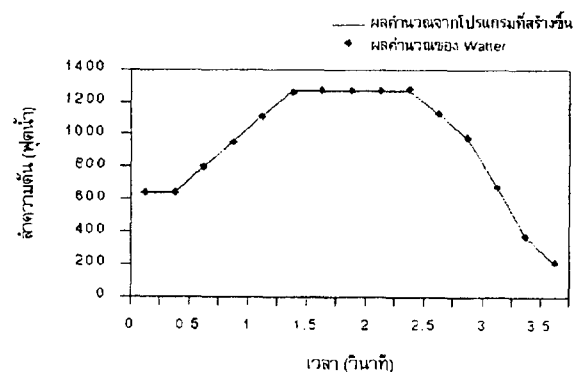
ผลการคำนวณที่แต่ละตำแหน่งของท่อเปรียบเทียบกับผลการคำนวณของ Watter [4] แสดงในรูปที่ 8 ถึง 11



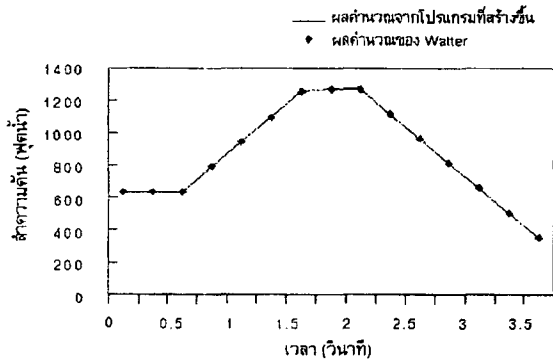
รูปที่ 7 แสดงระบบท่อที่ใช้ทดสอบโปรแกรมครั้งที่ 1



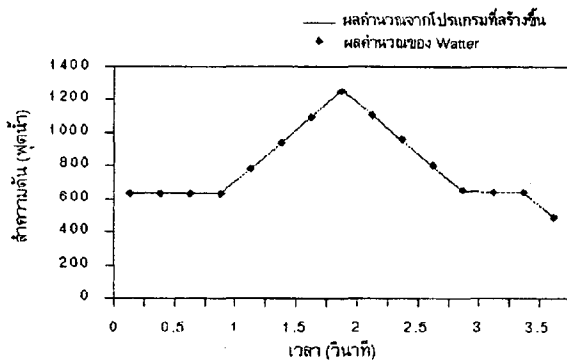
รูปที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบที่ระดับความสูง (z) 50 ฟุต



รูปที่ 9 แสดงการเปรียบเทียบที่ระดับความสูง (z) 60 ฟุต



รูปที่ 10 แสดงการเปรียบเทียบที่ระดับความสูง (z) 70 ฟุต



รูปที่ 11 แสดงการเปรียบเทียบที่ระดับความสูง (z) 80 ฟุต

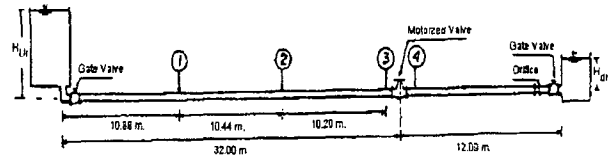
4.2 การไหลในท่อที่ผ่านวาล์วที่ควบคุมการเปิด-ปิดด้วยมอเตอร์

Elansary [2] ใช้ท่อเหล็กขนาด 101 มม. หนา 6.35 มม. ซึ่งคำนวณค่าความเร็วคลื่นของความดันได้ 900 เมตรต่อวินาที ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของท่อ $f = 0.0225$ ระดับความสูงของน้ำต้นทาง $H_u = 2.5$ เมตร อัตราการไหลที่สภาวะคงตัว ณ เวลาเริ่มต้น 0.0125 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที

มีการสูญเสียความดันที่ Motorized Valve ที่เวลาเริ่มต้น $\Delta H_0 = 0.05$ เมตร มีค่า Dimensionless Valve Opening ของ Motorized Valve ดังรูปที่ 13 ทำการวัดค่าความดันที่จุดที่ ① ($x=10.88$ m.) ② ($x=21.32$ m.) ③ ($x=31.52$ m.) และ ④ (หลังวาล์ว) ตามรูปที่ 12 ความดันที่จุดที่ ④ นำมาใช้เป็นข้อมูลในการคำนวณ และแสดงในรูปที่ 14 ค่าความดันที่วัดที่จุดที่ ① ② และ ③ นำมาใช้เปรียบเทียบกับผลการคำนวณการเตรียมข้อมูลสำหรับคำนวณประกอบด้วย

4.2.1 แบ่งท่อออกเป็น 47 ท่อนยาวท่อนละ 0.68 เมตร

4.2.2 คำนวณระยะห่างของเวลาที่ใช้นั้นแต่ละชั้น



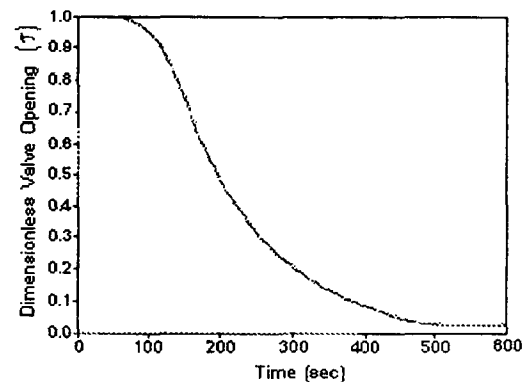
รูปที่ 12 แสดงระบบท่อที่ Elansary ใช้ทดลอง

4.2.3 คำนวณหาความเร็วและความดันเมื่อเวลาเริ่มต้นนำไปใช้เป็นเงื่อนไขเริ่มต้นของโปรแกรม

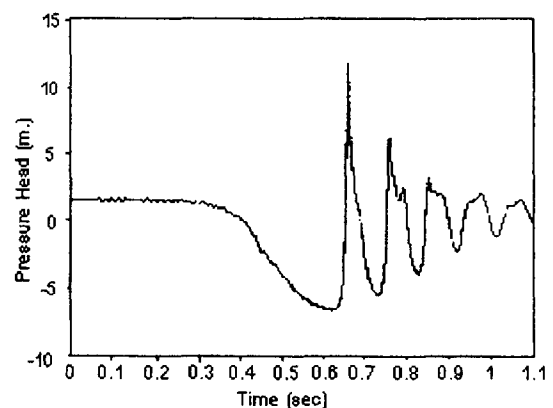
4.2.4 แปลงค่าความดันที่จุดที่ ④ (รูปที่ 14) เป็นข้อมูลตัวเลข 1500 ข้อมูลนำไปใช้เป็นเงื่อนไขขอบที่ปลายทาง

4.2.5 นำเงื่อนไขบริเวณต้นทาง ซึ่งกำหนดว่าค่าความดันศักย์มีค่าคงที่ แปลงเป็นชุดข้อมูลตัวเลขให้ได้ 1500 ข้อมูล นำไปใช้เป็นเงื่อนไขขอบที่ต้นทาง

4.2.6 นำข้อมูล Valve opening coefficient แปลงเป็นข้อมูลตัวเลข 1500 ข้อมูลเพื่อใช้คำนวณในโปรแกรม

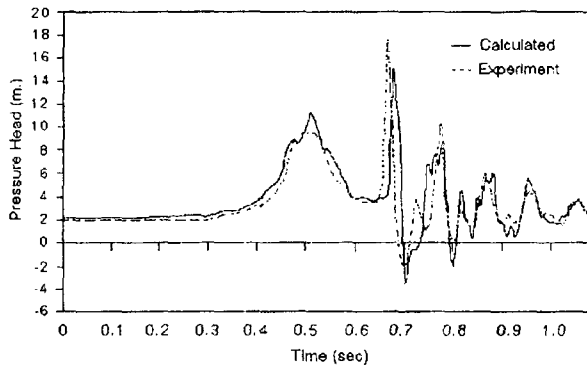


รูปที่ 13 แสดงค่า Dimensionless Valve Opening ที่มา Elansary [2]

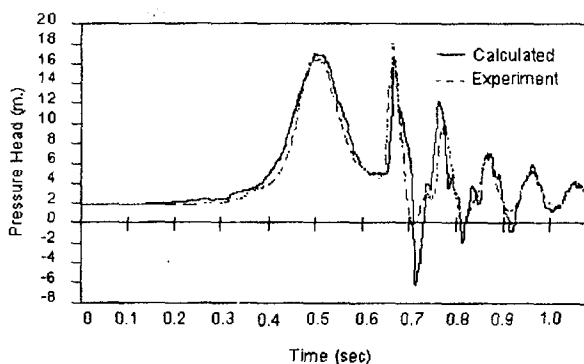


รูปที่ 14 แสดงค่าความดันที่จุดที่ ④ ที่มา Elansary [2]

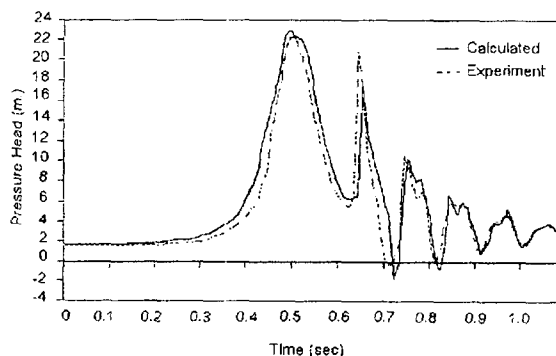
หลังจากใช้โปรแกรมคำนวณได้ผลลัพธ์เป็นลำดับความดันและความเร็วที่ทุกจุดตลอดความยาวท่อเป็นเวลา 1.095 วินาที เลือกข้อมูลที่ตรงกับจุดที่ ① ② และ ③ นำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ซึ่งแสดงในรูปที่ 15 16 และ 17 ตามลำดับ



รูปที่ 15 แสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณและทดลองที่จุดที่ ①



รูปที่ 16 แสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณและทดลองที่จุดที่ ②



รูปที่ 17 แสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณและทดลองที่จุดที่ ③

5. วิเคราะห์และสรุป

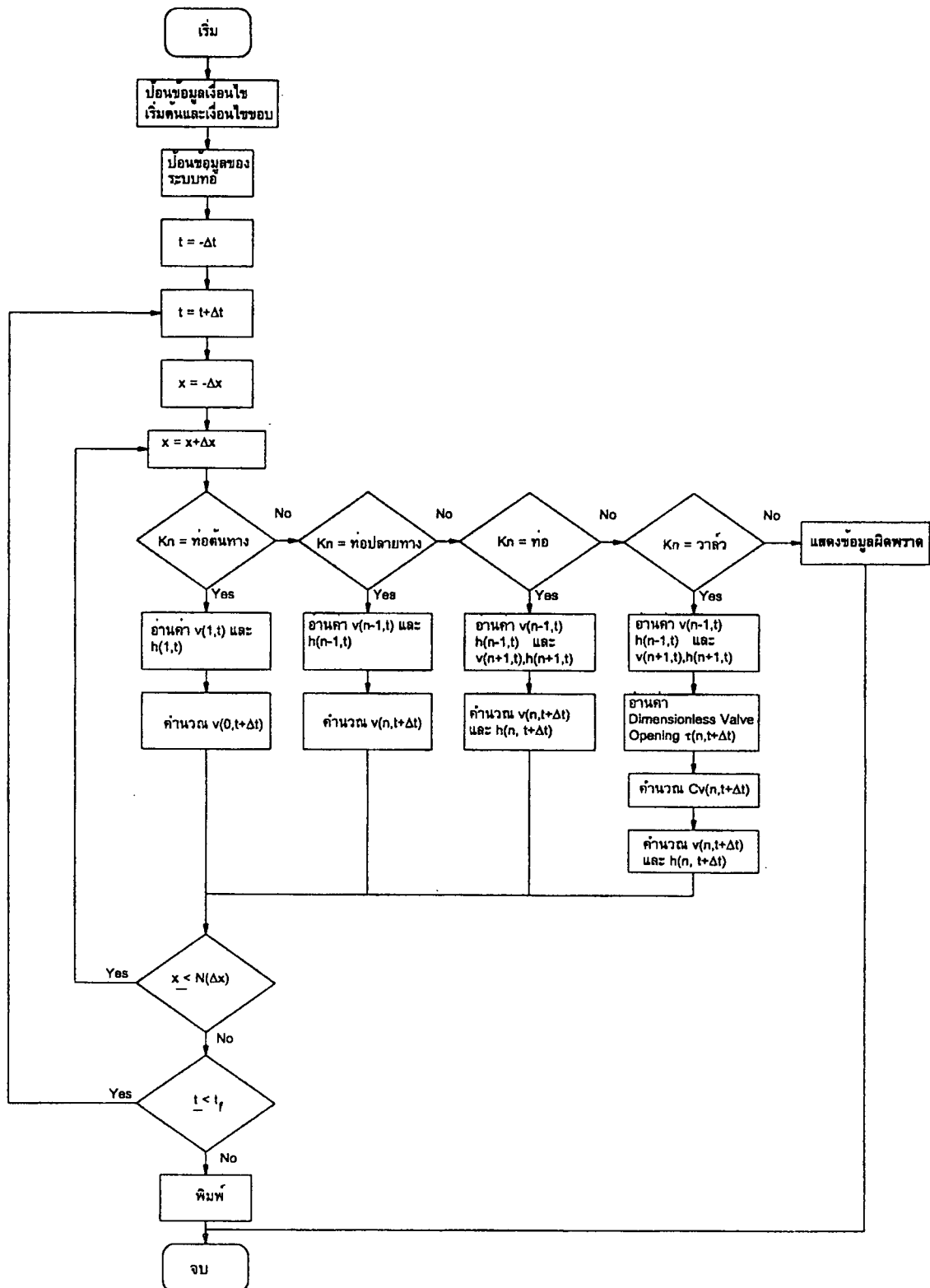
ในที่นี้ได้พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับวิเคราะห์ความดันชั่วคราวเชิงตัวเลขของการไหลในระบบท่อเดี่ยวเบื้องต้นได้สำเร็จโดยใช้สมการควบคุมจากกฎการอนุรักษ์มวลและกฎการเคลื่อนที่ตามแบบ (Model) ของ Fox [3] ซึ่งสมการไม่ยุ่งยากมากนัก เหตุผลที่ต้องเขียนโปรแกรมขึ้นเองเพราะว่าการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของนักวิจัยอื่นไม่ให้รายละเอียดส่วนนี้ไว้ และอีกส่วนหนึ่งเพราะต้องการพัฒนาขีดความสามารถในการสร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับงานวิเคราะห์ด้านนี้ขึ้นเองภายในประเทศ เมื่อใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สร้างขึ้นคำนวณแล้วนำผลไปเปรียบเทียบกับกรณีที่มีผลเป็นที่ยอมรับแล้วดังรูปที่ 8 9 10 11 15 16 และ 17 จะเห็นว่ามีความถูกต้องดีมาก จึงคาดว่ามีความน่าเชื่อถือที่จะนำไปพัฒนาใช้กับระบบการสูบน้ำที่ซับซ้อนมากขึ้น ดังเช่นระบบสูบน้ำแบบอนุกรมของเหมืองแม่เมาะได้

6. กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยนี้มาจากโครงการความร่วมมือ กฟผ.-มช. ซึ่งให้ทุนสนับสนุนผ่านการศึกษาในระดับมหาบัณฑิตของผู้เขียนคนแรกโดยมีผู้เขียนที่เหลือสองคนเป็นคณาจารย์ที่ปรึกษา จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Chaudhry, M.H. "Apply Hydraulic Transient" New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1987
- [2] Elansary, S. A., Numerical and Experimental Investigation of Transient Pipe Flow. "Journal of Hydraulic Research" 1994; 32 : 689-704.
- [3] Fox, J. A. "Hydraulic Analysis of Unsteady Flow in Pipe Network" London: The Macmillan Press, 1977.
- [4] Watter, Z. G. "Modern Analysis and Control of Unsteady Flow in Pipeline" Michigan: Ann Arbor Press, 1979
- [5] Wylie, E. B., Streeter, V. L. "Fluid Transients" McGraw-Hill, 1978.



รูปที่ 18 แสดงแผนภูมิการคำนวณของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สร้างขึ้น