



ปริญญานิพนธ์ ปีการศึกษา 2533

เรื่อง

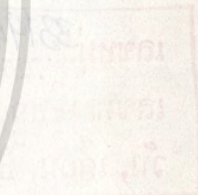
การวิเคราะห์การไหลไม่คงที่ด้วย MOC

- 1. นาย วิวัฒน์ ภักดิ์เมธาวาทกุล 301255
- 2. นาย สมพร คณะวิภากร 301298
- 3. นาย อุกฤษณ์ อุษณาชาติ 301365

[Handwritten signature]

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร. กัมปนาท สุวรรณ)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

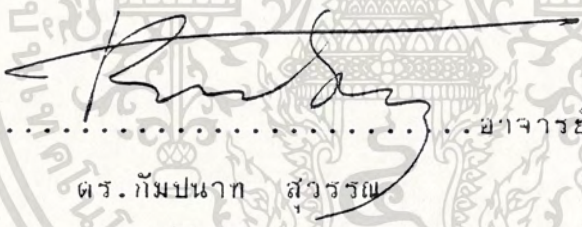
028758

การวิเคราะห์การไหลไม่คงที่ด้วย MOC

วิวิธน์ ภัทรเมธาวรกุล 301255
(WIWAT PHATARAMETRAVORAKUL)

สมพร คณะวิภากร 301298
(SOMPORN KUNAVIPAKORN)

อุกฤษฏ์ อุษณาโชติ 301365
(UKRIT USANACHOT)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา (ADVISOR)
ดร. กัมปนาท สุวรรณ
(DR. KUMPANAT SUWAN)

วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาตรี
สาขาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2533

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

M 028758

บทย่อ

ปัญหาการวิเคราะห์ Stability เมื่อมี Hydraulic Equation เข้ามาเกี่ยวข้อง การเขียนสมการในรูป Ordinary Differential Equation ค่อนข้างยาก แต่ยังมี Numerical เรียกว่า Method of Line อาจเขียน Hydraulic Equation ให้อยู่ในรูปที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ Stability ได้ แต่วิธีนี้ไม่แพร่หลาย ดังนั้น จึงจำเป็นต้องรวบรวมข้อมูลพื้นฐานในการแก้ปัญหา โดยวิธี MOC การศึกษาในขั้นแสดง การทดสอบ โดยใช้ข้อมูลป้อนเข้าไปหลายลักษณะ และใช้เป็นข้อมูลในการอ้างอิงที่จะ ประยุกต์ใช้ MOL ให้ถูกต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ABSTRACT

The problems encountered in the design of hydraulic systems can be broadly categorised into three main types , namely transient problems , resonance problems and stability problems. For this reason , the selection of various solution techniques for analysis depends on the requirements of the problem to be solved.

There are many numerical methods , in particular the Method of Characteristics where the solution proceeds numerically along the paths followed by disturbance propagation waves in the physical plane. However , there is another numerical method , the Method of Lines , which has rarely been applied to waterhammer , i.e. stability problem. In this dissertation the Method of Characteristics is studied to provide the solution that the other numerical methods can be compared.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทคัดย่อ		0
สัญลักษณ์		ง
บทที่ 1.	บทนำ	1
บทที่ 2.	สมการการไหลไม่คงที่	4
	2.1. ปรากฏการณ์พื้นฐานของ Waterhammer	4
	2.2. สมมติฐานเบื้องต้น	6
	2.3. Derivation of equation for waterhammer	8
	2.3.1 The momentum equation	8
	2.3.2 The continuity equation	10
บทที่ 3.	การหาค่าตอบด้วยวิธี Method of characteristic	18
	3.1. Numerical procedure in the MOC	18
	3.2. Internal point mesh	21
	3.3. Finite-difference equation	22
	3.4. Non-linear term in unsteady flow	24
	3.4.1 ปัญหาในการหาค่าตอบสมการ Finite-difference โดย MOC	25
	3.4.2 Approximation for friction term	25
	3.5. Direct solution ของ MOC สำหรับเทอม Non-linear model A	27
	3.5.1 Interior node	28
	3.5.2 Initial steady state condition	29
	3.5.3 Basic boundary condition	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4.	ผลการวิเคราะห์ สรุปผลและผลการวิจารณ์	35
4.1	โปรแกรมการวิเคราะห์ค่าตบของสมการ Characteristic	35
4.2	Introduction to method of line	35
4.3	บทสรุปและสิ่งที่จะทำต่อไป	36
ภาคผนวก		37
-	โปรแกรมการแสดงผลการคำนวณเชิงตัวเลข	38
-	ผลการคำนวณเชิงตัวเลข	43
-	โปรแกรมแสดงผลด้วยกราฟ	57
-	ผลการคำนวณแสดงผลด้วยกราฟ	63
หนังสืออ้างอิง		81



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์

A	$\sum_{i=1}^n$ พื้นที่หน้าตัดของท่อที่ตำแหน่ง x ใดๆ
A_c	$\sum_{i=1}^n$ พื้นที่ของการเปิดวาล์ว
a	ความเร็วของคลื่นความดันในท่อ
a_f	ความเร็วของคลื่นความดันที่เดินทางในของไหล (Unconstrained fluid)
a_p	ความเร็วของคลื่นความดันที่เดินทางในของไหลในท่อ (Elastic pipe)
C	ตัวประกอบของท่อ (Factor of pipe restriction)
C_D	สัมประสิทธิ์ของการไหลที่วาล์ว (Valve discharge coefficient)
C_M, C_P, C_V	ค่าคงที่เพื่อความสะดวกทางพีชคณิต
C^+, C^-	ข้อสมการ Characteristic
D	เส้นผ่าศูนย์กลางกลางมาสถ์ในท่อ
E	Young's modulus
e	ความหนาของผนังท่อ
f	Darcy-Weisbach friction factor
g	ความเร็วเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก
K	Bulk modulus
K_i	สัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากการไหลเข้าท่อ (Pipe inlet loss coefficient)
L	ความยาวท่อ
p	ความดันของของไหล (Dependent variable)
p_A, p_B, \dots	ความดันที่ A, B
p_i	ความดันที่ node i: (i=1, 2,, n)
p_R	ค่าความดันอ้างอิงที่ Reservoir

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

s	เส้นโทรปีจำเพาะ
t	เวลา (Independent variable)
t_{cr}	เวลาที่ใช้ในการปิดวาล์ว
u	พลังงานภายในจำเพาะ (Dependent variable)
v	ความเร็วเฉลี่ยที่หน้าตัดใดๆของของไหลในท่อ (Dependent variable)
v_A, v_B, \dots	ความเร็วที่ A, B, ...
v_i	ความเร็วที่ node i; (i=1, 2, ..., n)
v_o	ความเร็วที่สมการระกาวไหล (หนึ่งที่
x	ระยะทางขนาน (Independent variable)
x_i	ระยะทางขนานที่ node i
z	ระดับของ Central Line ของที่วัดจาก Datum
z_i	ระดับของ Central line ของที่ Node i
z_R	ระดับของของไหลใน Reservoir
$\Delta t, \Delta x$	Finite element grid dimensions
ψ	มุมเอียงของที่วัดจากแนวระดับ
	Combination factor
ρ	ความหนาแน่น
ρ_i	ความหนาแน่นที่ตำแหน่ง i
τ	สัมประสิทธิ์การไหลคูณกับพื้นที่ของการเปิดวาล์ว
τ_o	ความเค้นเฉือนที่ผนังท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1 บทนำ

ปรากฏการณ์ในเรื่องการไหลไม่คงที่เนื่องจากความดันเปลี่ยนแปลงในระบบท่อได้เป็นที่เข้าใจกันมาหลายปีแล้ว ความหนาของ High speed digital computer ประกอบกับการปรับปรุง Numerical Method ในการวิเคราะห์ให้สอดคล้องกับการประยุกต์ทาง Computer ดังนั้นการทํานายปรากฏการณ์เนื่องจากการแปรเปลี่ยนความดันเป็นที่พอใจในระบบวิศวกรรมเชิงปฏิบัติอย่างมาก แต่อย่างไรก็ตามยังมีหลายอย่างในสาขาวิชาที่ต้อการทําการค้นคว้าต่อไป ส่วนหนึ่งที่น่าสนใจซึ่งจะนำมาวิเคราะห์และอธิบายในที่นี้

การไหลไม่คงที่ปกติเกิดจากการเปิดหรือปิดวาล์วในเวลารวดเร็ว หรือ การสตาร์ทหรือหยุดใบพัดปั้มน้ำและ Turbine ในทันที ซึ่งจะเกิดความดันเปลี่ยนแปลงและอาจทำให้ระบบท่อทางบางตอนแตกหรือยุบตัว ความหมายของ Unsteady Flow คือ คุณสมบัติ ณ จุด ๆ หนึ่งที่เปลี่ยนไปกับเวลาโดยกรณีการไหลคงที่จะเป็นกรณีพิเศษของการไหลไม่คงที่

ปัญหาส่วนใหญ่ทางด้าน Waterhammer ที่เกิดขึ้นพอสรุปได้ว่า

- 1). การไหลจากสภาวะคงที่จุดหนึ่งเปลี่ยนไปยังสภาวะคงที่อีกจุดหนึ่ง เป็นปัญหาเกี่ยวกับ Transient
- 2). ปัญหาทางด้าน Resonance คือการไหลจากสภาวะคงที่ไปสู่สภาวะไม่คงที่เมื่อเปรียบเทียบกับ Vibration Theory กรณีแรกเปรียบได้กับ Free Vibration ในขณะที่กรณีหลังเปรียบได้กับ Force Vibration ในปัญหาบางกรณีไม่อาจเปรียบเทียบกับ Free หรือ Force Vibration แต่ก็ยังวิเคราะห์ได้โดย Vibration Theory หรือ Control Theory ซึ่งวิธีการเหล่านี้สามารถนำมาใช้กับการวิเคราะห์ Stability ของ Surge Shaft ในระบบโรงกำเนิดไฟฟ้าพลังน้ำ

มีหลายเหตุการณ์ของไหล Oscillation ซึ่งกลไกของแรงไม่แสดงปรากฏการณ์โดยชัดเจนโดยแรงกระตุ้นที่ทำให้เกิดการสั่นนี้เป็นตัวแปรของระยะทาง ความเร็ว และความเร่ง แรงกระตุ้นนี้เรียกว่า Self-excited หรือ Auto-oscillation

การวิเคราะห์การไหลไม่คงที่แบ่งออกเป็น 2 กรณี ขึ้นอยู่กับวิธีการ
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำมาเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์สำหรับ Rigid Column Incompressible Flow Model มีการใช้ในเรื่องการวิเคราะห์ Stability มากโดยเฉพาะ Surge Shaft Stability และปัญหาเรื่อง Pump Surging ในทางกลับกันถ้าพิจารณา Compressibility ของ Fluid และ Elasticity ของท่อมีผลกระทบต่อระบบมากดังนั้นจะใช้ Elastic Column Model ในการวิเคราะห์ ในการแก้ปัญหาเมื่อคำนึงถึง Elastic สมการของ Hydraulic จะใช้ Method Of Characteristic ในการแก้ปัญหา และ Turbomachine จะถูกแสดงโดยตรงโดยอะแกรมแสดงประสิทธิภาพ

โดยทั่วไปการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของ Waterhammer นั้น Method Of Characteristic จะใช้ได้ผลดีที่สุด ในขณะที่ อย่างไรก็ตามวิธีอื่น ๆ เช่น Implicit และ Explicit Finite-difference Method ไม่เหมาะที่จะใช้แก้ปัญหาของ Transient Equation เมื่อเขียนสมการนี้ร่วมกับระบบอื่น ในการวิเคราะห์ Stability ในทางกลับกัน ส่วนปัญหาเรื่อง Resonance จะแสดงในเรื่อง Frequency Domain ในขณะที่ปัญหาเรื่อง Stability ต้องการคำตอบในรูป Time-Domain

ด้วยเหตุนี้ Method Of Line น่าจะเหมาะในการแสดง Hydraulic Equation ในการวิเคราะห์ Stability ซึ่ง Partial Differential Equation สามารถเขียนในรูปของ Ordinary Differential Equation ได้ แต่อย่างไรก็ตามก่อนที่จะประยุกต์ Method Of Line ในการแก้ปัญหานี้จึงจำเป็นต้องใช้ข้อมูลพื้นฐานใน Method Of Characteristic เป็นข้ออ้างอิง ดังนั้นสำหรับ Project นี้จะศึกษาและรวบรวมโดยใช้ Method Of Characteristic เป็นแนวทางในการวิเคราะห์ความเหมาะสมของ Method Of Line ที่ใช้กับการวิเคราะห์ Stability ในปีต่อไป

การวิเคราะห์เกี่ยวกับ Waterhammer จำเป็นต้องทราบปรากฏการณ์พื้นฐานการศึกษาในส่วนนี้จะเกิดขึ้นได้โดยการนำกฎทรงพลังงานและ Continuity Equation มาพิจารณาควบคู่กันไป บทที่ 2 จะกล่าวถึงส่วนนี้โดยผลสุดท้ายจะได้สมการ Partial Differential Equation (สมการของของไหล)

ในกรณีการทำนายคุณสมบัติของของไหล ณ จุดต่าง ๆ ในระบบท่อเมื่อเอกสารนี้เป็นเอกสารลับหรือมีลิขสิทธิ์ของผู้อื่น กรุณาแจ้งให้ทราบโดยเร็วที่สุด มิฉะนั้นจะไม่รับผิดชอบต่อความเสียหายใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทราบค่าเริ่มต้น ค่าขอบจะใช้วิธี Method Of Characteristic หาค่าตอบ
ด้วยความก้าวหน้าทางด้าน High Speed Computer การหา Solution ตามจุดต่างๆ
ในระบบที่จะเป็นดังบทที่ 3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 สมการการไหลไม่คงที่

2.1 ปรากฏการณ์พื้นฐานของ waterhammer

สิ่งสำคัญก่อนที่จะพิจารณาถึงรายละเอียดในการวิเคราะห์การไหลไม่คงที่คือ ความเข้าใจในพฤติกรรมพื้นฐานในการเกิด Waterhammer สิ่งเหล่านี้จะช่วยในการพิจารณาเพื่อประยุกต์ Elastic Theory มาใช้และยังเข้าใจลำดับเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นก่อนที่จะไปวิเคราะห์ปัญหาที่ย่างยากขึ้น

เพื่ออธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นของของไหลในระบบท่อภายใต้การกระทำของคลื่นเนื่องจาก Waterhammer นั้น ระบบที่ใช้ในการศึกษาเบื้องต้นควรง่ายที่สุดดังแสดงในรูป 2.1 การวางท่อในแนวระดับที่ต่อกับ Reservoir ซึ่งท่อมีเส้นผ่าศูนย์กลางคงที่ ในระยะห่างระหว่าง Reservoir กับวาล์วเท่ากับ L กำหนดให้แรงเสียดทานในท่อน้อยมากและ Velocity เพื่อเปรียบเทียบกับค่า Waterhammer Pressure มีค่าน้อยมาก ความแตกต่างระหว่าง EL กับ HGL น้อยมากจนไม่ต้องนำมาคิด ลักษณะของท่อและค่าต่าง ๆ ที่กำหนดขึ้นนั้นเพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ เมื่อความเร็วของของไหลในท่อเปลี่ยนแปลงจากการไหลแบบคงที่ จะเกิดความดันเปลี่ยนแปลง (Hydraulic Transient) ขึ้น ความดันดังกล่าวจะเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังจุดหนึ่งในระบบท่อของไหลด้วยความเร็วเสียง (a) เมื่อพิจารณาตามจุดต่าง ๆ ในระบบท่อความดันจะเคลื่อนที่กลับไปกลับมาระหว่างท่อในลักษณะคลื่นความดัน ซึ่งจะลดลงเนื่องจากความเสียดทาน สำหรับระบบท่อที่ไม่คิดความเสียดทาน ความดันเปลี่ยนแปลงนี้จะเกิดขึ้นไปตามความเร็วของของไหลดังสมการ $\Delta P = \rho a \Delta v$ เมื่อ ρ คือความหนาแน่นจะให้สมการนี้ตลอดความยาวท่อซึ่งสมการนี้เป็นไปตามหลักการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ ซึ่งความเร็วเสียง a ในระบบถูกกำหนดโดยคุณสมบัติของของไหลที่เกี่ยวกับ Bulk Modulus นอกจากนี้ ยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของชนิดท่อ ความหนาของท่อ Young's Modulus การติดตั้งระบบท่อในความเป็นจริงค่า Bulk Modulus จะมากขึ้นทันทีเมื่อมีฟองอากาศเกิดขึ้น Waterhammer ที่เกิดขึ้นในท่อโดยการปิดวาล์วอย่างรวดเร็วจะมีปรากฏการณ์ Waterhammer ทั้งที่ Upstream และ Downstream ของวาล์วแต่จะอธิบายเฉพาะที่ Upstream ของวาล์วเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อปิดวาล์ว (อย่างรวดเร็ว) ความเร็วของของไหลที่วาล์วจะลดลงเป็นศูนย์อย่างรวดเร็วและก่อให้เกิด Pressure เพิ่มขึ้นที่วาล์วอย่างรวดเร็วมีขนาด Δp จากรูป 2.2 ค่า Δp คือ ปริมาณ Pressure ที่จำเป็นในการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมของของไหลจากความเร็ว (v) ไปเป็นศูนย์

ความดันที่เพิ่มขึ้นเป็นผลให้ท่อขยายออกและของไหลมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น การยืดตัวของท่อและการลดลงของปริมาตรของไหลขึ้นอยู่กับขนาดและวัสดุของท่อ และค่า Elasticity ของของไหล โดยทั่วไปแล้วการเปลี่ยนแปลงของของไหลและท่อจะเกิดขึ้นน้อยกว่า 0.5%

ความดันที่เพิ่มขึ้นจะเดินทางไปยัง Upstream ด้วยความเร็วคลื่นเสียง (a) ซึ่งค่า a นี้หาได้จากคุณสมบัติทาง Elastic ของระบบท่อ ของของไหลและคุณสมบัติทางเรขาคณิตของระบบท่อ ความเร็วคลื่นความดัน a นี้จะคงที่ราบเท่าที่คุณสมบัติยังคงที่

พฤติกรรมที่ก่อให้เกิด Waterhammer ในช่วงเวลา $0 < t < L/a$ การเคลื่อนที่ของคลื่นความดันด้วยความเร็ว a จะถึง Reservoir เวลา $t = L/a$ และในเวลา t ความเร็วของของไหลในท่อทุก ๆ จุดเป็นศูนย์ และ Pressure = $p + \Delta p$ ตลอดความยาวท่อ ในขณะที่ขั้วกันของไหลอัดตัวอยู่และท่อจะขยายออกภายใต้เงื่อนไขของไหลในท่อจะอยู่ในสภาวะไม่สมดุลย์ เนื่องจากความแตกต่างของ Pressure ในท่อและที่ Reservoir (ในท่อ $\Delta p + p$, Reservoir = p)

ในช่วงเวลา $L/a < t < 2L/a$ ความดันแตกต่างในท่อกับ Reservoir เป็นผลให้เกิดการไหลไปยัง Reservoir ความเร็วของของไหลที่ไหลออกมีขนาดเท่ากับความเร็วในตอน Steady state (ไม่คิดแรงเสียดทาน) และปริมาณของไหลที่ไหลออกจะเท่ากับของไหลที่อัดตัวเข้ามาในท่อ จนทำให้ท่อขยายตัวการไหลขึ้นนี้จะเกิดต่อเนื่องจนถึงเวลา $t = 2L/a$ ที่เวลานี้ความดันจะลดลงเท่าเดิม (H) ตลอดทั้งท่อ

ในช่วงเวลา $2L/a < t < 3L/a$ ของไหลยังไหลไปใน Reservoir อยู่แต่ที่วาล์วไม่มี source ของของไหลเพื่อสนับสนุนการไหลออกนี้ จึงทำให้เกิด Pressure drop (Δp) ขึ้นเพื่อหน่วงความเร็วไหลออก ($-v$) นั้นให้มีค่าเป็นศูนย์ Pressure ที่ลดลงนี้เป็นผลของไหลขยายตัวและท่อหดตัวในแนวรัศมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า, ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในช่วงเวลา $3L/a < t < 4L/a$ ที่เวลา $t=3L/a$ ความเร็วจะเท่ากับศูนย์ตลอดความยาวท่อและ Pressure ในท่อต่ำกว่า Reservoir เท่ากับ Δp จึงทำให้เกิดการดูดของไหลจาก Reservoir เข้าท่อ เนื่องจาก Unbalance force ด้วยความเร็ว v เหมือนกับตอน Steady flow (ตอนยังไม่ปิดวาล์ว) และความดันจะเพิ่มขึ้น Δp จนกระทั่งถึงเวลา $t=4L/a$ ของไหลจะมีความดัน H ซึ่งเท่ากับความดันในท่อเหมือนกับที่เวลาเริ่มต้น ($t=0$)

หลังจากเวลา ($t=4L/a$) จะเกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะเช่นเดียวกับที่อธิบายมาแล้วข้างต้น ช่วงเวลาที่เกิดเหตุการณ์เช่นนี้ขึ้นคือ ค่าของความดันขนาดที่เวลาผ่านไปวัฏจักรของ Waterhammer จะเกิดขึ้นอย่างไม่มีที่สิ้นสุด เนื่องจากไม่คิดแรงเสียดทานจากการอธิบาย Waterhammer ข้างต้นมีความเข้าใจพื้นฐานทางด้านปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในระบบเช่น พารามิเตอร์ ของเวลา บ่งบอกถึงลำดับเหตุการณ์ต่าง ๆ นั้น ไม่ใช่ใช้เวลาเพียงอย่างเดียว ยังมีค่า L/a ด้วยจากกราฟความถี่สัมพันธ์ระหว่างเวลากับความดันที่จุดต่าง ๆ ของท่อจะเห็นว่า Pressure ที่วาล์วขึ้น ๆ ลง ๆ อยู่ระหว่าง $p+\Delta p$ ขณะที่ Pressure ที่จุดอื่นจะมีช่วงเวลาที่เกิด Pressure ด้วยหรือ Pressure head = H ดังรูป 2.3 เนื่องจากในปัจจุบันการแก้ไขที่หาต่าง ๆ มีความรวดเร็วขึ้นเนื่องจากการพัฒนาคอมพิวเตอร์ใหม่ความเร็วสูง จึงนำที่จะเอาปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นจริงของ Waterhammer มาจำลองในระบบคอมพิวเตอร์ด้วยวิธีเชิงตัวเลข ทั้งนี้โดยอาศัยเงื่อนไขการเกิดในเชิงคณิตศาสตร์ ลักษณะเช่นนี้จะประยุกต์เข้ากับทฤษฎีการไหลของของไหลตาม Continuity Equation ก่อนอื่นต้องทราบปรากฏการณ์การเกิด Waterhammer และคลื่นความดันที่เกิดขึ้นรวมทั้งคุณสมบัติที่เปลี่ยนแปลงได้รับผลกระทบอย่างไรเมื่อมีแรงเสียดทานมาเกี่ยวข้อง

2.2 สมมติฐานเบื้องต้น

มี Transient Flow หลายแบบที่เกิดขึ้นได้ในระบบท่อขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางเรขาคณิตของท่อและสาเหตุที่ทำให้เกิด ตลอดทั้งวิชานี้พจนานุกรมนี้จะกล่าวถึงของไหล Transient Flow ภายใต้งานต่อไปนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. เป็นทวารไหล 1 มิติ และความดัน ความเร็ว และความหนาแน่น กระจายอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งพื้นที่หน้าตัดใด ๆ ของท่อ
2. ระบบท่อบรรจุเต็มด้วยของเหลวซึ่งต้องมีความดันอย่างน้อยสูงกว่าความดันไอของของเหลวนั้น คือ ไม่เกิด Column Separation หรือ Cavitation และไม่มี Gas Release คือ Homogeneous Single-Phase Fluid
3. การเปลี่ยนรูปของท่อเนื่องจากความดันเป็นแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear Elastic) คือ การยืด-หด ของท่อจะต้องเกิดอย่างสม่ำเสมอตลอดความยาวท่อ
4. ค่า Friction Factor ของของไหลในสภาวะไม่คงที่เป็นค่าเดียวกันกับค่าในสภาวะคงที่ (Darcy Friction Factor)

ในการวิเคราะห์ปัญหาการไหลจำเป็นต้องเริ่มต้นด้วยกฎพื้นฐานทางฟิสิกส์ต่าง ๆ เช่น กฎการอนุรักษ์มวล กฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน กฎข้อที่ 1 และ 2 ของเทอร์โมไดนามิกส์ เป็นต้น กฎต่าง ๆ เหล่านี้ ไม่ขึ้นกับคุณสมบัติการไหลของของไหล และการไหลชนิดที่อยู่ภายใต้กระบวนการที่พิจารณา สมการที่กล่าวมาไม่จำเป็นต้องใช้ทุกสมการ และในบางครั้งก็มีความจำเป็นที่จะต้องนำ Constitutive Equation มาร่วมด้วย เช่น สมการสถานะ (Equation Of State) ซึ่งอธิบายพฤติกรรมของคุณสมบัติทางกายภาพของของไหลภายใต้สภาวะที่กำหนด ถ้าสมการสถานะพิจารณาให้ความหนาแน่นเป็นฟังก์ชันของทั้งความดันและอุณหภูมิก็มีความจำเป็นที่จะต้องนำสมการพลังงานมาวิเคราะห์ด้วย

ในการศึกษาการไหลแบบไม่คงที่มีรูปแบบของการไหลที่ใช้ศึกษามากมายเช่น

- Isothermal Wave Propagation In Liquids
- Incompressible Flow
- ไม่สนใจ Convective Term เป็นต้น

สำหรับรูปแบบการไหลที่ใช้ศึกษาใน Project นี้ จะอยู่ภายใต้ข้อสมมติที่ความเร็วของคลื่นความดันมีค่ามากกว่าความเร็วของของไหลในท่อในสภาวะคงที่มาก ๆ ($a \gg v$) และไม่สนใจ Convective Term ฉะนั้น จะได้สมการรามเมนดัม และสมการความต่อเนื่องดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาการไหลของของเหลวในท่อที่เปลี่ยนแปลงตามตำแหน่ง

$$(2.3) \quad \frac{\partial}{\partial t} (\rho A \delta x v) + \left[(\rho + \frac{\partial \rho}{\partial x} \delta x) (A + \frac{\partial A}{\partial x} \delta x) v + \frac{\partial}{\partial x} (\rho A v) \right] - (\rho A v) =$$

ของระบบต่อเวลา ปรากฏว่ามีผลที่ออกมาจาก Control Volume และตั้งต้น

ผลรวมของแรงในทิศทางยาวไหลเท่ากัน อัตราการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมเชิงเส้น ความยาว δx Control Volume ให้นำไปใช้กับสมการโมเมนตัมโดยตรง จากรูป 2.3 1 มิติ และคงความดันเท่ากันไป Upstream ที่ x กับแนวระดับและพิจารณา Control Volume จากส่วนของรูป 2.3 ซึ่งเป็นการไหล

2.3.1 THE MOMENTUM EQUATION

$$(2.4) \quad v = v(x, t), \quad p = p(x, t)$$

ables 2 คือ ระยะทางนับจาก Upstream ไป Downstream และ ความเร็วและค่าความดันที่หน้าตัดใด ๆ ที่นับเป็น Independent Variables 2 ในสมการเหล่านี้เป็น 2 มิติ ขึ้นกับ Dependent Variables 2 คือ ความยาวของท่อ δx ของ Waterhammer 2 สมการ โดยทั่วไป จะใช้หลักการโมเมนตัมและสมการความต่อเนื่องในส่วนนี้

2.3 DERIVATION OF EQUATION FOR WATERHAMMER

สมการอันดับสอง 1 มิติ ที่ไม่เชิงเส้น Non-Linear ปรากฏขึ้น โดยทั่วไปแล้วสมการจะแก้ยากกว่าของท่อตันไป การสังเกตว่าสมการโมเมนตัมและสมการความต่อเนื่องของ Waterhammer

$$(2.2) \quad \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho A v) + v \frac{\partial A}{\partial x} = 0 \quad p = \text{const}$$

(2.1) $\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho A v) + v \frac{\partial A}{\partial x} + \rho g \sin \theta = 0$ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับนักเรียน เพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ภายนอกมหาวิทยาลัยได้ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



หน้าตัดบนแต่ละปลายของControl Volume เทอมที่ 3 เป็นองค์ประกอบของแรงดันที่กระทำที่ผนังท่อในทิศทางการไหล เทอมที่ 4 เป็นองค์ประกอบของแรงเนื่องจากน้ำหนักของของไหลในทิศตรงข้ามการไหล และเทอมสุดท้ายคือค่าเฉลี่ยของแรงเฉือน ระหว่างของไหลกับผนังท่อ พิจารณาทางขวาของสมการ เทอมแรกคือ อัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมภายในControl Volume เทอมที่ 2 และ 3 แสดงโมเมนตัมที่ไหลออกสุทธิจากControl Volume

สมมติว่าการเปลี่ยนแปลงของ sx ไม่ขึ้นกับเวลา, ตัดเทอมที่มีค่าน้อย $(sx)^2$ และหารตลอดด้วยมวลของ ๆ ไหล ρASx เมื่อ $A = \pi D^2/4$ จะได้สมการ

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} - g \sin \theta - \frac{4\tau_w}{\rho D} = \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} \quad (2.4)$$

จากเงื่อนไขที่กล่าวแล้วว่าค่า Friction Factor ในการไหลแบบไม่คงที่ แสดงได้เช่นเดียวกับในสภาวะคงที่ ความเค้นเฉือนที่ผนังท่อจึงแสดงได้ในรูปของ Darcy-Weisbach Friction Factor (f) ดังนี้:

$$\tau_w = \frac{\rho f v^2}{8} = \frac{\rho f v |v|}{8} \quad (2.5)$$

เมื่อแทนลงใน 2.4 และจัดเรียงใหม่จะได้

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \left\{ v \frac{\partial v}{\partial x} \right\} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + g \sin \theta + \frac{f |v| v}{2D} = 0 \quad (2.6)$$

เทอมภายในวงเล็บ { } แสดง Convective Term และค่าสัมบูรณ์ของความเร็ว v ใช้เพื่อให้เทอมความเสียดทานสามารถบอกทิศทางของแรงเสียดทานได้เมื่อมีการไหลในทิศทางตรงข้าม.

2.3.2 THE CONTINUITY EQUATION

Continuity Equation ของ Unsteady Flow กล่าวว่ามวลสุทธิที่ไหลเข้า Control Volume ต่อหน่วยเวลาจะต้องเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงต่อเวลาของมวลภายใน Control Volume

$$\rho Av - \left(\rho Av + \frac{\partial (\rho Av)}{\partial x} \delta x \right) = \frac{\partial (\rho A \delta x)}{\partial t} \quad (2.7)$$

จะเห็น

$$\frac{\partial (\rho A \delta x)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho Av)}{\partial x} \delta x = 0 \quad (2.8)$$

พิจารณาให้ CONTROL VOLUME ความยาว δx ไม่เคลื่อนที่ตามการยืดหดของท่อ สมการ 2.8 เขียนได้เป็น

$$\left(A \frac{\partial \rho}{\partial t} \delta x + \rho \frac{\partial A}{\partial t} \delta x \right) + \left(Av \frac{\partial \rho}{\partial x} \delta x + \rho v \frac{\partial A}{\partial x} \delta x + \rho A \frac{\partial v}{\partial x} \delta x \right) = 0 \quad (2.9)$$

แล้วหาตลอดด้วย $\rho a \delta x$ และจัดวงเล็บ

$$\frac{\partial v}{\partial x} + \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{v}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) + \left(\frac{1}{A} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{v}{A} \frac{\partial A}{\partial x} \right) = 0 \quad (2.10)$$

จะเห็นว่าสมการยังยุ่งยากเพราะมีตัวแปรหลายตัว แต่อย่างไรก็ตามเทอมในวงเล็บอาจเขียนให้อยู่ในรูปอื่นได้ และเนื่องจากเงื่อนไขข้างต้นที่ไม่นับ Convective Term ดังนั้นจะได้สมการ

$$\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (2.11)$$

เทอมแรกเกี่ยวข้องกับความเร็วไหลเข้า-ออกของมวลในช่วงเวลา δt เทอมที่สอง
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกี่ยวกับ Compressibility ของของไหล และเทอมสุดท้ายกล่าวถึง Elastic Strain ของผนังท่อ

โดยการใช้ความสัมพันธ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ซึ่งคุณสมบัติใด ๆ เช่น ρ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันของตัวแปรเทอร์โมไดนามิกส์อีก 2 ตัวได้ ดังนั้นจะได้ สมการสถานะ (Equation Of State) ของของไหล

$$\rho = \rho(P, u) \quad (2.12)$$

เมื่อ u คือ พลังงานภายในของของไหลเมื่อ Differentiate สมการได้

$$\delta\rho = \frac{\partial\rho}{\partial P} \delta P + \frac{\partial\rho}{\partial u} \delta u \quad (2.13)$$

สำหรับการไหลที่ไม่มีความร้อนมาเกี่ยวข้องของการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นจะต้องอยู่ระหว่างการยืด-ขยายตัว แบบ Isothermal กับ Adiabatic การเปลี่ยนแปลงของ $\delta\rho$ จะขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของ δp มากกว่า ดังนั้นจึงถือว่าตัดเทอม δu ที่จะได้ จะเหลือสมการ

$$\delta\rho = \frac{\partial\rho}{\partial P} \delta p \quad (2.14)$$

หรือ

$$\frac{\partial\rho}{\partial x} = \frac{\partial\rho}{\partial P} \frac{\partial P}{\partial x} \quad \frac{\partial\rho}{\partial t} = \frac{\partial\rho}{\partial P} \frac{\partial P}{\partial t} \quad (2.15)$$

เช่นกันสมการที่เกี่ยวข้องกับพื้นที่หน้าตัดที่สัมผัสกับสมการสถานะจะขึ้นอยู่กับตัวแปรทางเทอร์โมไดนามิกส์คือ p และ u และเช่นเดียวกับสมการ 2.12 เมื่อตัดเทอมอนุกรมที่ทั้งจะได้ว่าการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดของท่อจะขึ้นอยู่กับความดันเพียงอย่างเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A = A(p, x) \tag{2.16}$$

Differentiate ได้

$$\delta A \approx \frac{\partial A}{\partial p} \delta p + \frac{\partial A}{\partial x} \Big|_{p = \text{const}} \delta x \tag{2.17}$$

$$\frac{\partial A}{\partial x} = \frac{\partial A}{\partial p} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{dA}{dx} \Big|_{p = \text{const}} \tag{2.18a}$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} = \frac{\partial A}{\partial p} \frac{\partial p}{\partial t} \tag{2.18b}$$

ทางด้านขวาของสมการ 2.18a เทอมแรกเป็นการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดเนื่องจากความเปลี่ยนแปลงความดันและเทอมหลังเป็นการเปลี่ยนแปลงรูปทรงทางเรขาคณิตของพื้นที่หน้าตัดของท่อซึ่งไม่ขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงความดันในท่อ สมการ 2.18b สมมติว่ารูปทรงเรขาคณิตของท่อไม่เปลี่ยนแปลงกับเวลาแทนสมการ 2.15 และ 2.18 ใน 2.1 จะได้

$$\frac{\partial v}{\partial x} + \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial p} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{v}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial p} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \left(\frac{1}{A} \frac{\partial A}{\partial p} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{v}{A} \frac{\partial A}{\partial p} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{v}{A} \frac{dA}{dx} \Big|_{p = \text{const}} \right) = 0 \tag{2.19}$$

จัดรูปได้

$$\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} + \frac{\rho}{A} \frac{\partial A}{\partial p} \right) \left(\frac{\partial p}{\partial t} + v \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{v}{A} \frac{dA}{dx} \Big|_{p = \text{const}} = 0 \tag{2.20}$$

ในสมการ 2.20 ผลของวงเล็บแรกประกอบด้วย

1. Isentropic Velocity Of Sound In An Unconstrained Fluid

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial p} \Big|_{s = \text{const}} = \frac{p}{K} \tag{2.21}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อ $\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial p} \Big|_{s = \text{const}}$ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. Young Weak Disturbance Propagation Velocity สำหรับ Incompressible Fluid ในท่อที่โป่งได้

$$\frac{1}{a^2} = \frac{\rho}{A} \frac{\partial A}{\partial P} = \frac{\rho DC}{Ec} \quad (2.22)$$

Korteweg-Joukowski รวมเอาทั้งความยืดหยุ่นของของไหล และความยืดหยุ่นของท่อเข้าด้วยกันได้เป็นความเร็วคลื่นความดัน

$$\frac{1}{a^2} = \frac{1}{a_f^2} + \frac{1}{a_p^2} = \frac{\partial \rho}{\partial P} + \frac{\rho}{A} \frac{\partial A}{\partial P} = \frac{\rho}{K} + \frac{\rho DC}{Ec} \quad (2.23)$$

จัดสมการ เลี้ยวใหม่ได้

$$a^2 \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial t} + \left\{ \frac{v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \right\} + a^2 \frac{v}{A} \frac{dA}{dx} \Big|_{p=\text{const}} = 0 \quad (2.24)$$

ซึ่งเป็นสมการความต่อเนื่องสำหรับการไหลไม่คงที่ในรูปของอนุพันธ์ย่อย ซึ่ง $\frac{d^2 v}{A dx}$ เป็นเทอมที่เพิ่มเข้ามาเนื่องจากผลของรูปทรงของท่อ

สมการโมเมนตัมและสมการความต่อเนื่องจัดเป็นสมการอนุพันธ์ย่อยอันดับ 1 (First-Order Partial Differential Equation) ซึ่งสามารถใช้แก้สมการหาค่า $v(x,t)$ และ $p(x,t)$ ได้ เทอม Non-Linear ในสมการที่ 2.6 และ 2.24 จัดเป็น Quasi-Linear Partial Differential Equation แบบ Hyperbolic การมี Non-Linear Term ทำให้หาคำตอบได้ยาก ฉะนั้นจะต้องทำการอินทิเกรตสมการและหาคำตอบโดยวิธีประมาณต่อไป

จากเงื่อนไขตอนแรกที่ทำให้ตัด Convective Term จะเขียนสมการทั้งสองได้ดังนี้

$$\text{สมการโมเมนตัม } L_1 = \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + g \sin \theta + \frac{f}{2D} v |v| = 0$$

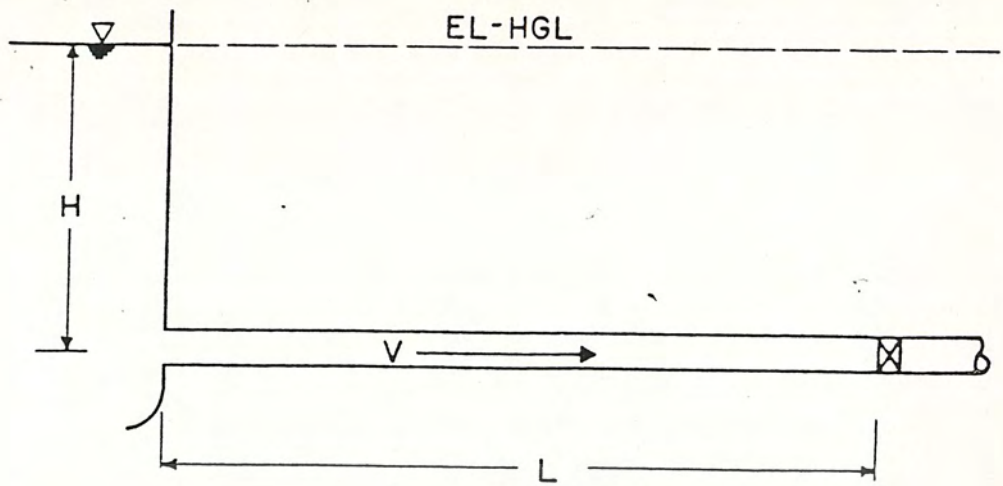
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการความต่อเนื่อง $L_2 = a^2 \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{a^2 v}{A} \frac{dA}{dx} \Big|_{p = \text{const}} =$

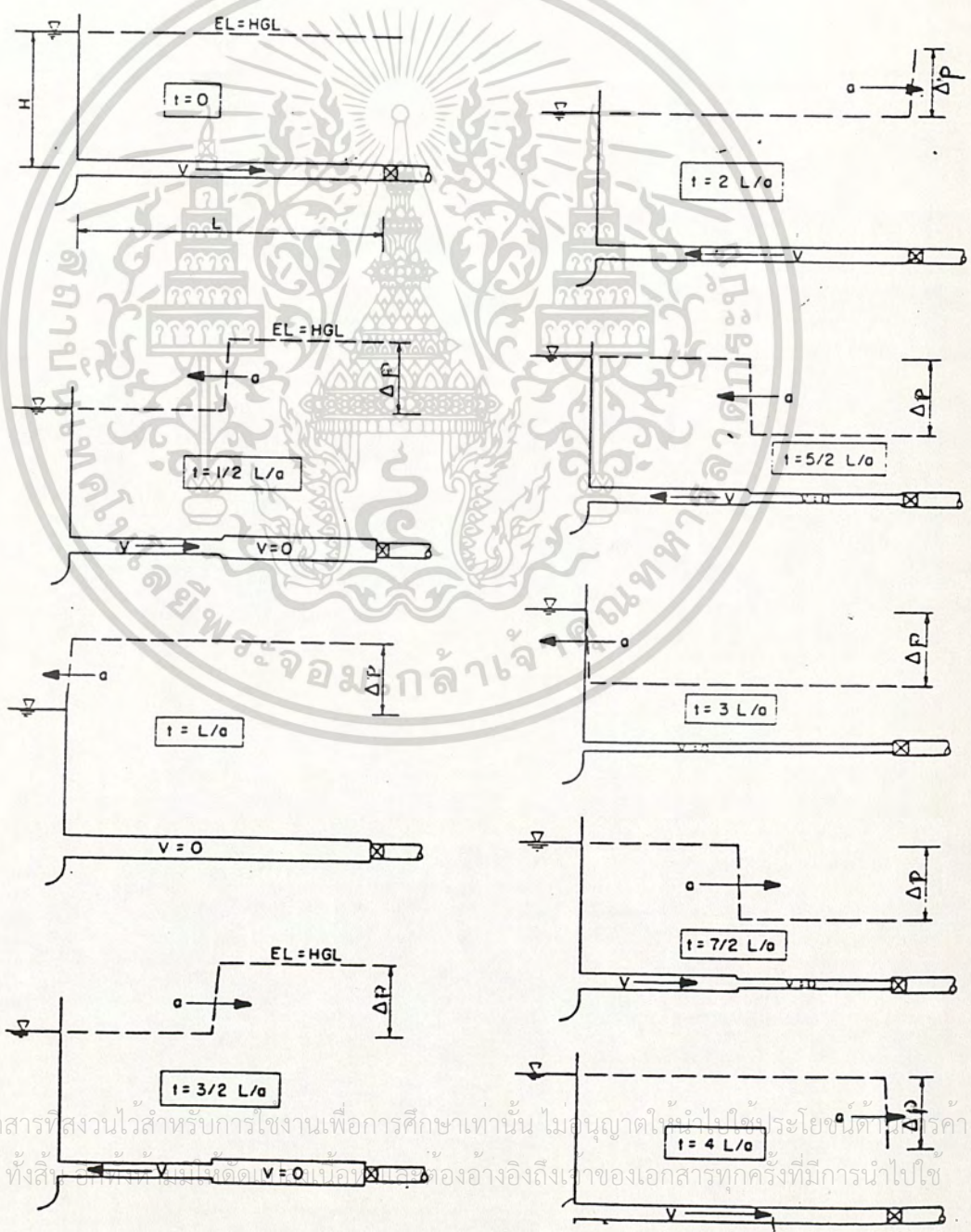
L_1, L_2 จะใช้ในการ Derive สมการ Characteristic ในบทต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

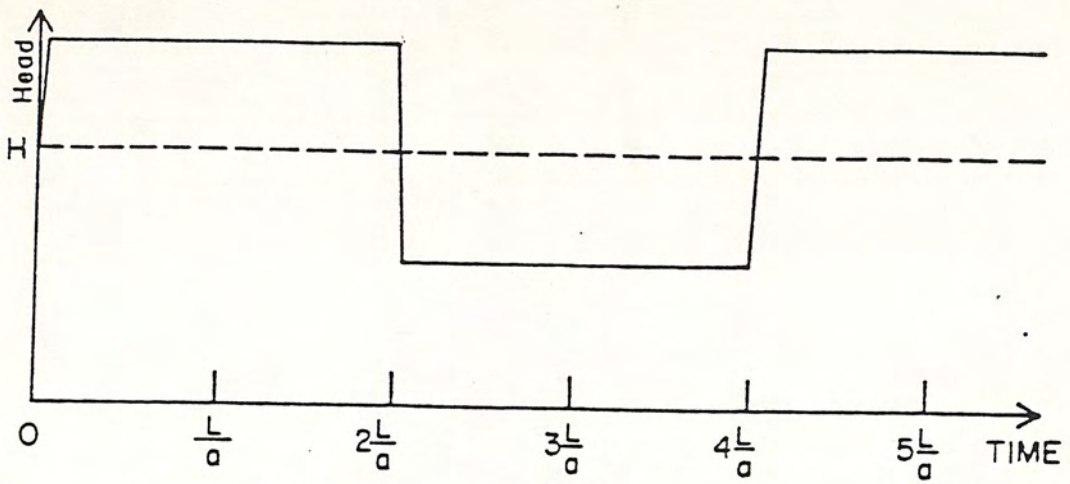


รูปที่ 2.1 ระบบท่อที่ใช้ในการวิเคราะห์

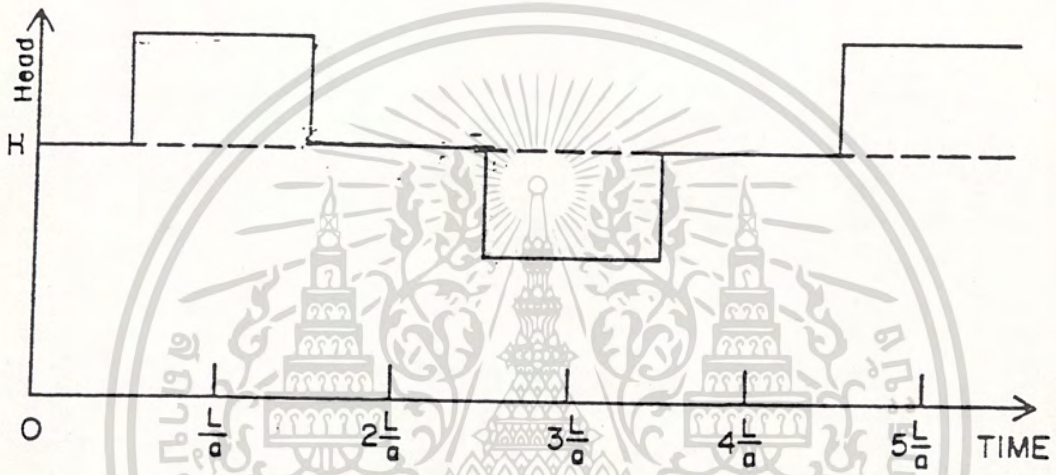


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้แก้ไขหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น หากมีการนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต อาจก่อให้เกิดความเสียหายทางกฎหมายได้

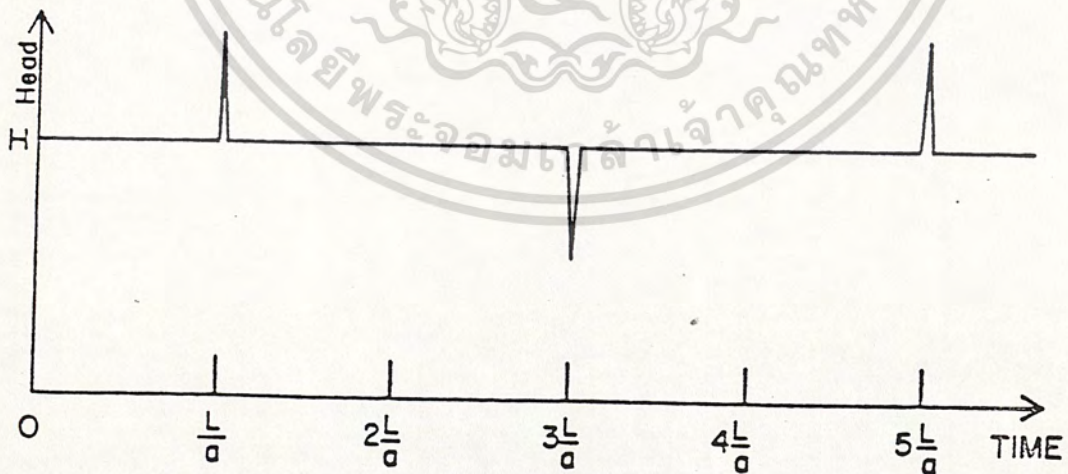
รูปที่ 2.2 แสดงปรากฏการณ์ WATERHAMMER



a). ความดันในหน่วยความสูงเมื่อเทียบกับเวลา (ตำแหน่งวาล์ว)

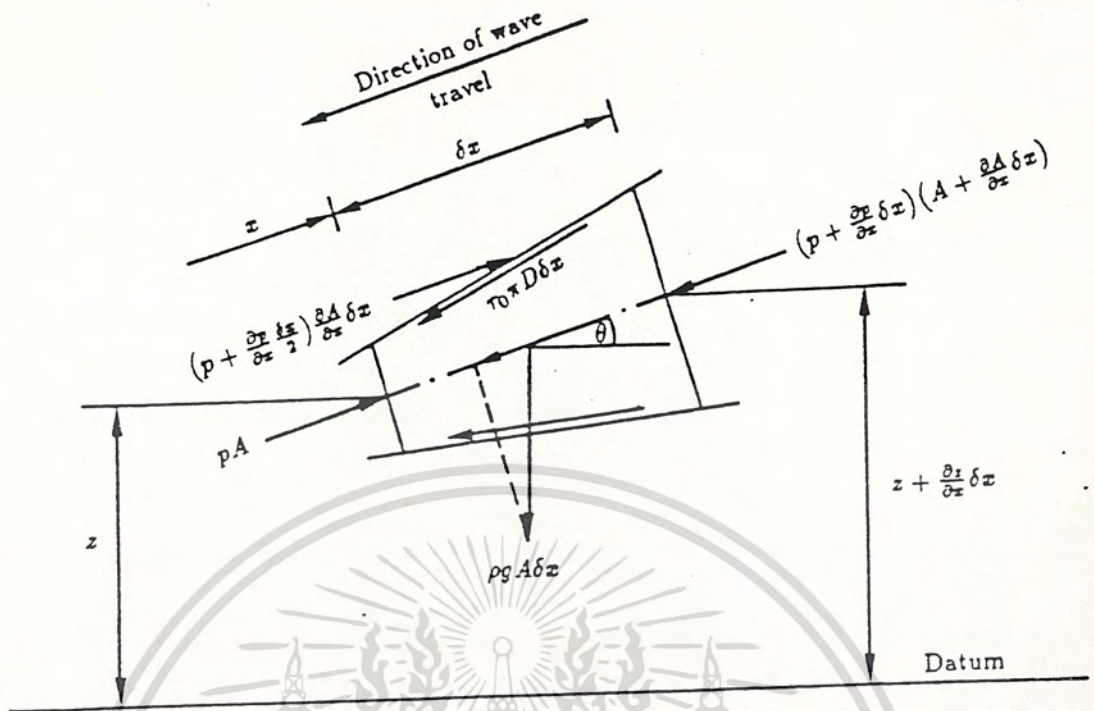


b). ความดันเมื่อเทียบกับเวลาที่ตำแหน่ง MID POINT

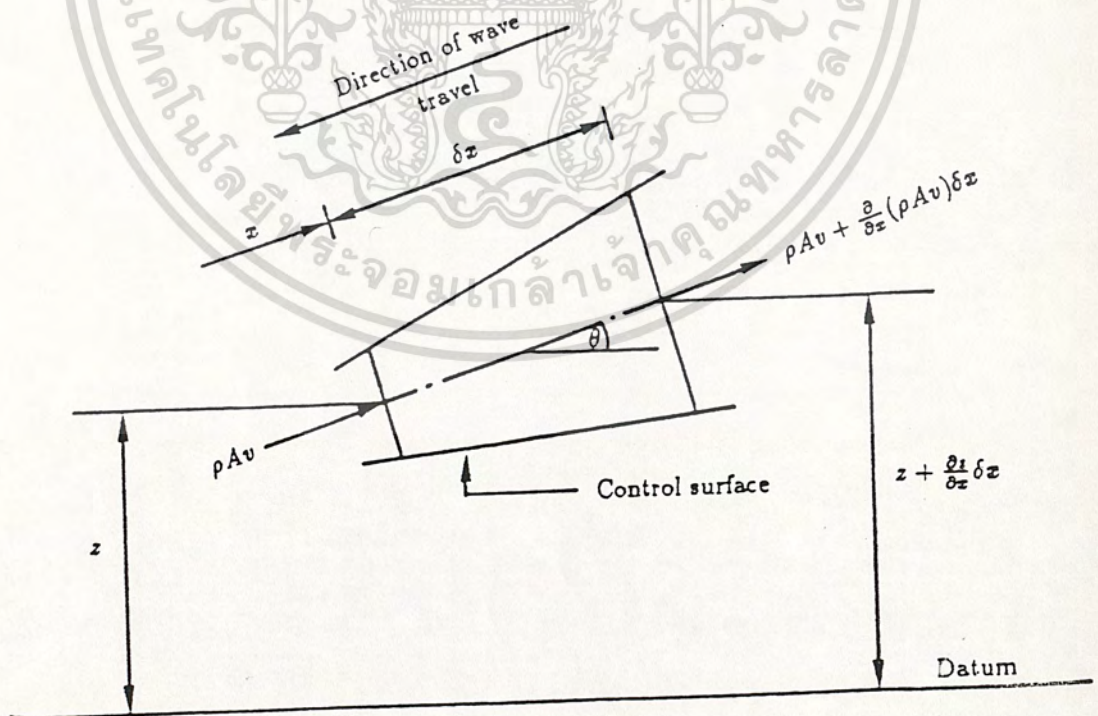


c). ความดันเมื่อเทียบกับเวลาที่ RESERVOIR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติ ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 รูปที่ 2.3 ความดันในหน่วยความสูงเมื่อเทียบกับเวลาในตำแหน่งต่างๆ
 ไม่วากรณใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 แสดง FREE BODY DIAGRAM ของสมการโมเมนตัม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังช่วยให้ท่านได้ความรู้เกี่ยวกับหลักการของเอกสารนี้ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.5 แสดงปริมาตรควบคุมสำหรับสมการความต่อเนื่อง

บทที่ 3 การหาค่าตอบด้วยวิธี Method Of Characteristics

ในการวิเคราะห์ปัญหา Waterhammer มีวิธีการหาค่าตอบของปัญหาได้หลายวิธี เช่น Method Of Characteristics , Four-Point Centered , Crank-Nicholson , Fully Implicit เป็นต้น วิธีการวิเคราะห์หลาย ๆ วิธีที่กล่าวมานี้วิธีที่นิยมและให้ค่าตอบถูกต้องมากที่สุดคือ Method Of Characteristics ซึ่งจะกล่าวถึงในบทนี้

มีผู้ทำการทดลองและวิจัยหลายคนจะใช้ Method Of Characteristic โดยใช้ Grid Of Characteristic หาค่าตอบปัญหา Transient Flow เช่น Chaudhry , Streeter And Wylie และ Watters รวมทั้งนักศึกษาที่ทำ Project จะต้องย้ำว่าการใช้ Grid Of Characteristics นี้ใช้กับกรณีที่มีการพื้นฐานได้ตัดเทอม Convective ทิ้งไปแล้วเท่านั้น ซึ่งตรงกับเงื่อนไขเบื้องต้นและการศึกษา Waterhammer ที่ได้กล่าวแล้วในบทที่ 2

สมการพื้นฐานของ Waterhammer (L_1, L_2) ที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 จะนำมาใช้ในบทนี้ เพื่อหาค่าตอบของ Partial Differential Equation โดยใช้ Method Of Characteristic เปลี่ยน Partial Differential Equation ไปเป็น Particular Total Differential Equation ซึ่งสมการหลังสามารถอินทิเกรตได้

3.1 NUMERICAL PROCEDURE IN THE MOC

วิธีการนี้เป็นการนำเอาสมการ Partial Differential Equation 2 สมการ (L_1, L_2) จากบทที่แล้วมาแปลงรูปเป็น สมการ Ordinary Differential Equation 4 สมการด้วย Method Of Characteristic สมการทั้งสองซึ่งประกอบด้วย Independent Variable 2 ตัว และ Dependent Variable 2 ตัวนำมาเขียน

โดยตัด Convective Term ทิ้งแล้วดังนี้
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{สมการโมเมนตัม } L_1 = \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + g \sin \theta + \frac{f |v|}{2D} = 0$$

$$\text{สมการความต่อเนื่อง } L_2 = a^2 \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{a^2 v}{A} \frac{dA}{dx} \Big|_{p = \text{const}} = 0$$

แปลงให้สมการ 3.1 และ 3.2 เป็น Ordinary Differential Equation ด้วยวิธี Linear Combination โดยใช้ λ เป็น Unknown Multiplier

$$L = L_1 + \lambda L_2 = \lambda \left[\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{1}{\lambda \rho} \frac{\partial p}{\partial x} \right] + \left[\frac{\partial v}{\partial t} + a^2 \lambda \frac{\partial v}{\partial x} \right] + g \sin \theta + \lambda a^2 \frac{v}{A} \frac{dA}{dx} \Big|_{p = \text{const}} = 0$$

หาคำตอบของสมการ 3.1 และ 3.2 คือ $v = v(x, t)$ และ $p = p(x, t)$ แล้วดังนั้น TOTAL DERIVATIVE ของคำตอบเขียนได้เป็น

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{dx}{dt} \quad (3.4)$$

และ

$$\frac{dp}{dt} = \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} \frac{dx}{dt} \quad (3.5)$$

เปรียบเทียบกับสมการ (3.4) และ (3.5) กับสมการ 3.3 จะได้ข้อสังเกตดังนี้

$$\text{ถ้า } \frac{dx}{dt} = \frac{1}{\lambda} = a^2 \lambda \quad (3.6)$$

สมการ 3.3 จะกลายเป็น Ordinary Difference Equation

เอกสารนี้แยกส่วน $\lambda \frac{dp}{dt}$ ออกจากสมการ (3.4) และ (3.5) แล้วนำ $\frac{dx}{dt} = \frac{1}{\lambda} = a^2 \lambda$ ไปใช้กับสมการ (3.4) และ (3.5) จะได้สมการ (3.7) ดังต่อไปนี้

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{f |v|}{2D} + g \sin \theta + \lambda a^2 \frac{v}{A} \frac{dA}{dx} \Big|_{p = \text{const}} = 0 \quad (3.7)$$

เพื่อที่จะมองเห็นภาพได้ง่ายขึ้นจึงได้สร้างระนาบ xt ซึ่งเป็นระนาบของ Independent Variable ขึ้น ถ้า a ในที่ถือเป็นค่าคงที่สำหรับท่อที่สามารถ Plot เส้นตรง 2 เส้นจากสมการ 3.11 และ 3.13 ลงบนระนาบ xt ดังรูป (3.1) เส้นตรง AP เรียกว่าเส้น Characteristic บวก (C^+) ได้จากสมการ 3.11 จุดต่างๆ บนเส้น C^+ จะสอดคล้องกับสมการ 3.10 ทำนองเดียวกัน เส้นตรง BP เรียกว่าเส้น Characteristic ลบ (C^-) ได้จากสมการ 3.13 จุดต่างๆ บนเส้น C^- จะสอดคล้องกับสมการ 3.12

สมการที่กล่าวถึงทั้งหมดนี้ได้จากการ Transform จากสมการเริ่มต้น 2 สมการ เท่านั้นยังไม่มีการใช้วิธีการ Approximate ทางคณิตศาสตร์มาเกี่ยวข้องเลย ดังนั้น ทุก ๆ คำตอบของสมการใหม่ที่ได้จะยังคงเป็นคำตอบของสมการเริ่มต้น 2 สมการ (คือ สมการที่ 3.1 และ 3.2) เช่นเดิม

3.2 INTERNAL POINT MESH

ก่อนที่จะกล่าวถึงการหาคำตอบของสมการจำเป็นจะต้องกล่าวถึงลักษณะบางประการของระนาบ xt และเงื่อนไขสำหรับหาคำตอบสมการ Characteristic บนระนาบ xt เสียก่อน เพื่อความเข้าใจในส่วนต่อไป

ระนาบ $x-t$ มีลักษณะดังรูป 3.2 โดยแกน x จะแทนความยาวท่อ L ที่วัดจาก Upstream และแกน t คือเวลา บนแกน x แบ่งท่อยาว L ออกเป็นส่วนย่อยๆ N ส่วนโดยแต่ละส่วนยาว $\Delta x = L/a$ ค่า Δx จะเป็นตัวกำหนดช่วงเวลาที่หาคำตอบโดยอัตโนมัติ เปรียบเทียบจากสมการ 3.11

จะสามารถสร้าง Characteristic Lines ได้โดยกำหนด Grid บนระนาบ xt ด้วยระยะ Grid ทั่วบนแกน $x = \Delta x$ และระยะห่าง Grid บนแกน $t = \Delta t$ โดยอ้างอิงสมการ 3.11 และ 3.12 จะสามารถลากเส้น C^+ และ C^- ได้ดังรูป

เงื่อนไขเบื้องต้นสำหรับ Characteristic Solution :

1. สมมติให้ท่อกับขนาดสม่ำเสมอตลอดความยาว L นั่นคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$1.1 \quad \left. \frac{1}{A} \frac{dA}{dx} \right|_{p = \text{const}} = 0$$

1.2 Friction Factor (f) มีค่าคงที่

2. แบ่งท่อเป็นส่วน ๆ N ส่วน (N + 1 จุด) ตามความยาว โดยแต่ละส่วนมีความยาว x เท่ากัน

3. ไม่สนใจ Convective Term

3.3 FINITE-DIFFERENCE EQUATIONS

ในหัวข้อที่แล้วได้ใช้ Method Of Characteristic ในการแปลงสมการ Hyperbolic Partial Differential ของ Waterhammer ไปอยู่ในรูปของ Total Differential Equation 4 สมการดังนี้

$$\frac{dv}{dt} + \frac{1}{\rho a} \frac{dp}{dt} + g \sin \theta + \frac{f |v| v}{2D} = 0 \quad (3.14)$$

$$\frac{dx}{dt} = a \quad (3.15)$$

$$\frac{dv}{dt} - \frac{1}{\rho a} \frac{dp}{dt} + g \sin \theta + \frac{f |v| v}{2D} = 0 \quad (3.16)$$

$$\frac{dx}{dt} = -a \quad (3.17)$$

สมการ 3.14 สามารถ SOLVE หา P (x,t) และ V(x,t) ได้ที่ทุกจุดภายในท่อ โดยเราทราบค่า P และ V จุด A จะสามารถอินทิเกรต A ถึง P แล้วติดตัวแปร P_u และ V_u (P,V ที่จุด P) ไว้ ส่วนสมการที่ 3.16 ก็จะสามารถคล้อยกับเส้นตรงตามสมการ 3.18 ซึ่งมีค่าความชันเป็นลบแสดงดังเส้น BP ในรูป เช่นเดียวกันถ้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หากทราบค่า P และ V ที่จุด A ก็จะสามารถอินทิเกรตจาก B ถึง P เพื่อให้ได้ตัวแปร P_D และ V_D เดียวกันกับตอนอินทิเกรตตามเส้น $C^+(AP)$ จะเห็นว่าได้สมการ 2 สมการตามเส้น C^+ และ C^- ซึ่งติดค่าตัวแปร P_D และ V_D ทั้งคู่ ค่าตอบของสมการทั้งสองคือ V และ P ที่ตำแหน่งและเวลาบนระนาบ xt ดังแสดงจุด P ในรูปนั่นเอง

ที่กล่าวมาข้างต้นสามารถแสดงเป็นสมการได้ดังนี้ คูณตลอดสมการ 3.14 ด้วย dt แล้วอินทิเกรตตามเส้น Characteristic C^+ และ C^-

$$C^+; \int_A^P dv + \frac{1}{\rho a} \int_A^P dp + \int_A^P g \sin \theta dt + \int_A^P dt \frac{f|v|}{2D} = 0 \quad (3.18)$$

สมการ 3.18 เขียนใหม่ในรูป Finite-Difference ได้เป็น

$$C^+; (v_P - v_A) + \frac{1}{\rho a} (P_P - P_A) + g \Delta t \sin \theta + \int_A^P \frac{f|v|}{2D} dt = 0 \quad (3.19)$$

เช่นเดียวกับสมการ C^- สามารถเขียนในรูป FINITE-DIFFERENCE ได้เป็น

$$C^-; (v_P - v_B) - \frac{1}{\rho a} (P_P - P_B) + g \Delta t \sin \theta + \int_B^P \frac{f|v|}{2D} dt = 0 \quad (3.20)$$

มาถึงจุดนี้อาจกล่าวได้ว่าสมการทั้งสองจะเป็น Exact Equation ถ้าทราบความเร็วที่แปรเปลี่ยนไปตาม Characteristic Curve หรือไม่มีแรงเสียดทานในท่อและการหาค่าตอบของสมการก็ไม่ต้องการ Approximate ด้วย แต่ในทางปฏิบัติก็มีความเสียดทานดังนั้นจึงจำเป็นต้อง Approximate เทอมความเสียดทานในสมการ 3.19 และ 3.20 ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป

ในการคำนวณปัญหา Transient Flow ด้วยสมการ 3.19 และ 3.20 จำเป็นที่จะต้องทราบ v และ p ในสภาวะเริ่มต้นเสียก่อน เรียกว่าต้องรู้ Initial Condition ทุก ๆ จุดที่ Initial Time ($t=0$) ก่อน ซึ่งก็คือ p และ v ของของไหลในท่อในสภาวะ Steady State นั้นเอง สังเกตจากรูปจะเห็นว่าในการหา $v(x, t)$ ไม่ว่าจะวิธีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$t+\Delta t$) และ $P(x,t+\Delta t)$ ต้องอาศัย Grid ข้างเคียงสร้าง Characteristic Curve ไปตัดกันที่จุด x ที่พิจารณาหา V และ P นั้น

ในการ APPROXIMATE FRICTION Term สามารถกระทำได้หลายรูปแบบซึ่งจะกล่าวในส่วนต่อไป

3.4 Non-Linear Term In Unsteady Flow

ในการแสดง Non-Linear Term สามารถแสดงได้หลายวิธี ซึ่งวิธีเหล่านี้อาจจะมผลต่อ Stability ของ Solution ได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาเทอม Non-Linear ในรูปแบบต่างๆ เพื่อให้แน่ใจว่า Instability ที่อาจเกิดขึ้นในระบบไม่ได้เกิดจากวิธีการคำนวณที่ไม่ Stable

ก่อนที่จะมีผู้สนใจผลกระทบจากความเสียดทาน นักวิจัยได้มุ่งความสนใจไปที่การสั่นของคลื่นเสียงและ Wave Propagation เท่านั้น จากนั้นจึงได้มีทั้งนักวิทยาศาสตร์ และวิศวกรหันมาศึกษาผลกระทบเนื่องจากความเสียดทานในท่อกันมากขึ้น แต่ก็ยังได้สมการที่ค่อนข้างยุ่งยากอยู่มาก เป็นผลให้หาคำตอบได้ยาก

ก่อนที่จะใช้ Method Of Characteristic ในการแก้ปัญหาการไหลแบบไม่คงที่ มีวิธีแก้ปัญหาก็ใช้กันอยู่ 2 วิธี คือ Graphical Method และ Analytical Method ซึ่งมุ่งความสนใจไปที่ Boundary Condition เช่น ที่วาล์ว, Pump, Turbine และ เสรีจแกงค์เท่านั้น ความเสียดทานในท่อถูกสนใจน้อยมาก เพราะความยุ่งยากในการหาคำตอบของวิธีข้างต้น จนกระทั่ง High Speed Digital Computer ถูกพัฒนาขึ้นมาจึงรวมเทอมของความเสียดทานเข้าไว้ในสมการ Unsteady Flow ต่อเมื่อได้มีการใช้ Method Of Characteristic เข้ามาแปลงสมการ Partial Differential Equation ให้อยู่ในรูป Finite Differential Equation จึงได้มีการประมาณค่า Friction Term ที่ได้จากการอินทิเกรตสมการ Finite-difference นั้น อย่างไรก็ตามก็ยังคงใช้ Fiction Factor (f) ค่าเดียวกับที่ใช้ในสภาวะ Steady Flow อยู่ ในส่วนนี้จะแสดงการประมาณค่า Fiction Term ในรูปแบบต่างๆ เพื่อให้ได้ Stability และความต้องแม่นยำในการใช้ Method Of Characteristic

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.1 ปัญหาในการหาค่าดลสมการ Finite-difference

โดย Method Of Characteristic

จากสมการ 3.14

$$\frac{dv}{dt} + \frac{1}{\rho a} \frac{dp}{dt} + g \sin \theta + \frac{f v |v|}{2D} + \frac{v}{A} \frac{dA}{dx} \Big|_{p = \text{const}} = 0 \quad (3.21)$$

$$\frac{dv}{dt} - \frac{1}{\rho a} \frac{dp}{dt} + g \sin \theta + \frac{f v |v|}{2D} + \frac{v}{A} \frac{dA}{dx} \Big|_{p = \text{const}} = 0 \quad (3.22)$$

ในการแก้สมการ 3.21 และ 3.22 จะต้องเปลี่ยนสมการไปเป็น Finite-difference ก่อน ปัญหาใหญ่ที่ตามมาคือปัญหาการเปลี่ยน Non-linear Term ไปเป็น Finite-difference นอกจากนี้ยังมีความลำบากในการแปลงบางเทอมซึ่งไม่สามารถแทนได้ง่ายด้วย finite-difference ดังนี้

1. เทอม $\frac{1}{\rho a} \frac{dp}{dt}$ ค่า ρ ในเทอมนี้จะไม่คงที่และเปลี่ยนแปลงไปตาม Characteristic Curve.

2. เทอม $\frac{v}{A} \frac{dA}{dx} \Big|_{p = \text{const}}$ ในสมการ 3.21

3. Friction Term $\frac{f v |v|}{2D}$ แม้จะใช้ f ตาม Darcy-Weisbach Friction Factor แล้วก็ตามเพราะเป็นเทอม Non-Linear.

แต่อย่างไรก็ตามกล่าวแล้วว่าจุดประสงค์ของบทนี้เพื่อประมาณค่า Friction Term ในแบบต่างๆ ฉะนั้นจึงสมมติเงื่อนไขที่จะศึกษาได้ดังนี้

1. $\rho = \text{const}$ ดังนั้นสามารถให้เบอร์นูลลีสำหรับ Incompressible Flow หา Initial Steady-State Condition ได้

2. ถ้าพิจารณาท่อที่มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากันตลอดความยาว ฉะนั้น

$$\frac{dA}{dx} \Big|_{p = \text{const}} = 0$$

3.4.2 Approximation For Friction Term

เขียนสมการ 3.21 และ 3.22 ตามเงื่อนไขที่กล่าวในหัวข้อที่แล้วได้

$$\frac{dv}{dt} + \frac{1}{\rho a} \frac{dp}{dt} + g \sin \theta + \frac{f v |v|}{2D} = 0 \quad (3.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{dv}{dt} - \frac{1}{\rho a} \frac{dp}{dt} + g \sin \theta + \frac{f}{2D} |v| |v| = 0 \quad (3.24)$$

เขียนให้อยู่ในรูป Finite-Difference

$$(v_p - v_A) + \frac{1}{\rho a} (P_p - P_A) + g \Delta t \sin \theta + \frac{f}{2D} \int_{P_A}^P |v| |v| dt = 0 \quad (3.25)$$

$$(v_p - v_B) - \frac{1}{\rho a} (P_p - P_B) + g \Delta t \sin \theta + \frac{f}{2D} \int_{P_B}^P |v| |v| dt = 0 \quad (3.26)$$

สังเกต Friction Term ค่า v ในเทอมนี้จะเปลี่ยนแปลงไปตาม Characteristic Line AP และ BP ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้ค่าประมาณของความเร็ว เพื่อให้ได้วิธีหาค่าตอบที่มี Stability และได้คำตอบที่แม่นยำ มีวิธีประมาณค่าของความเร็วใน Friction เทอม ให้อยู่ในรูป Finite-difference ได้หลายแบบ สรุปได้ดังนี้

1. Model A: Linear explicit

เป็นการประมาณค่าที่ใช้กันอย่างกว้างขวางและทำให้ Friction Term มีลักษณะเป็น Linear จึงสามารถแก้สมการได้โดยง่าย Model A จะประมาณค่า v ให้เป็นค่าที่จุด A และ B (ดังรูป (3.2)) ของ Characteristic Lines ทั้งสองซึ่งเขียนเป็นรูป Finite-difference อันดับที่ 1 ได้เป็น

$$\frac{f}{2D} \int_{A,B}^{P,P} |v| |v| dt = \frac{f \Delta t}{2D} v_{A,B} |v_{A,B}| \quad (3.27)$$

นอกจากนี้เคยมีการทดลองใช้ค่า v ที่จุด c มาใช้เป็นค่าประมาณของความเร็วบนเส้น Characteristic Lines ทั้งสองแต่ให้คำตอบที่ Unstable ค่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. Model B: Linear implicit

เพื่อความถูกต้องยิ่งขึ้นสามารถแสดง Friction Term ได้ดังนี้

$$\frac{f}{2D} \int_{A,B}^{P,P} v|v| dt = \frac{f \Delta t}{2D} v_{A,B} |v_{P,P}| \quad (3.28)$$

ซึ่งยังคงได้เทอมที่เป็น Linear และหาค่าตอบได้ง่าย เช่นเดียวกับ Model A

3. Model C: Nonlinear implicit average velocity head

อีกวิธีหนึ่งในการประมาณ Friction Term โดยใช้ Nonlinear implicit average velocity head ซึ่งจะให้ผลออกมาในรูปของ Trapezoidal Rule Formula การประมาณในกรณีนี้จะให้ผลที่ถูกต้องแม่นยำกว่าสมการ ค่าเฉลี่ยของ $v|v|$ Non-Line Term คำนวณที่จุด P และ A สำหรับสมการ Characteristic บวก เช่นกันกับสมการ Characteristic ลบ จะได้ความเร็วที่จุดและ B ในการหาค่าเฉลี่ยของ $v|v|$

$$\frac{f}{2D} \int_{A,B}^{P,P} v|v| dt = \frac{1}{2} \frac{f \Delta t}{D} \frac{(v_{A,B} |v_{A,B}| + v_{P,P} |v_{P,P}|)}{2} \quad (3.29)$$

4. Model D: Nonlinear implicit average velocity

$$\frac{f}{2D} \int_{A,B}^{P,P} v|v| dt = \frac{1}{2} \frac{f \Delta t}{D} \frac{(v_{A,B} + v_{P,P}) |v_{A,B} + v_{P,P}|}{2} \quad (3.30)$$

3.5 Direct Solution ของ Method Of Characteristic

สำหรับเทอม Non-Linear Model A

ได้กล่าวแล้วว่าเทอม Non-Linear ในสมการ Finite-Difference สามารถประมาณให้อยู่ในรูปต่างๆมากมาย ในส่วนนี้จะประมาณค่าเทอม Non-Linear โดยเทียบเคียงกับ Model A แล้วหาค่าตอบของสมการ Ordinary ไม่วากรณ์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Differential Equation ซึ่งจำเป็นต้องกลางถึงการวิเคราะห์ Interior Nodes, Initial Condition และ Boundary Condition ของการไหลแบบไม่คงที่ด้วย
เมื่อนำ Non-Linear Term Model A ประยุกต์ใช้กับสมการ Finite-difference. จะแสดงได้ดังนี้

$$(v_p - v_A) + \frac{(P_p - P_A)}{\rho a} + g \sin \theta + \frac{f v_A |v_A| \Delta t}{2D} = 0 \quad (3.31)$$

$$(v_p - v_B) - \frac{(P_p - P_B)}{\rho a} + g \sin \theta + \frac{f v_B |v_B| \Delta t}{2D} = 0 \quad (3.32)$$

ซึ่งจะเขียนให้อยู่ในรูปที่ง่ายได้

$$c^+ : P_p = C_p - B v_p \quad (3.33)$$

$$c^- : P_p = C_m + B v_p \quad (3.34)$$

$$\text{เมื่อ } C_p = P_A + B(v_A - R v_A |v_A| - C_0)$$

$$C_m = P_B - B(v_B - R v_B |v_B| - C_0)$$

$$B = \rho a$$

$$R = \frac{f \Delta t}{2D}$$

$$C_0 = g \sin \theta \Delta t$$

สังเกตว่า c_p และ c_m คือค่าคงที่ที่ได้จากสภาวะ $t=t$

3.5.1 Interior nodes

การหาค่าตอที่แต่ละ Nodes หรือ Grid ภายในท่อสามารถแสดงได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_p = \frac{C_p + C_M}{2} \quad (3.35)$$

$$V_p = \frac{C_p - C_M}{2} \quad (3.36)$$

3.5.2 Initial Steady State Condition

ในสภาวะการไหลแบบคงที่ที่สามาน่าสมการเบอร์นูลีมาใช้ระหว่าง 2 จุดใดๆได้คือ จากระดับผิวน้ำ (จุด 0) ไปยังจุดต่างๆบนท่อ ดังรูป (3.1) ในกรณี Incompressible Flow สมมติให้ความเร็วคงที่

$$v_i = v_0 \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n)$$

เมื่อ v_i คือความเร็วที่ Node ต่างๆบนท่อ และ v_0 คือค่าคงที่ความดันที่สภาวะการไหลแบบคงที่ที่อธิบายได้ด้วยสมการเบอร์นูลี

เช่นกัน ดังนี้

$$P_R + \frac{1}{2} \rho V_R^2 + \rho g z_R = P_i + \frac{1}{2} \rho v_i^2 + \rho g z_i + \frac{1}{2} \rho v_i |v_i| K_L$$

$$P_i = [P_R - \rho g (z_R - z_i)] - \frac{1}{2} \rho v_i^2 - \frac{1}{2} K_L \rho v_i |v_i|$$

$$(3.37)$$

เมื่อ $K =$ Loss Coefficient

เขียนสมการเบอร์นูลีจาก 1 ไป i เมื่อ $i = 2, 3, 4, \dots$ เพื่อหารูปทั่ว

ไปของ INITIAL CONDITION ดังนี้

$$P_i + \frac{1}{2} \rho v_i^2 + \rho g z_i = P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g z_1 + \frac{1}{2} \rho f \frac{L}{D} v_i |v_i|$$

ดังนั้น

$$P_i = P_1 + \rho g (z_1 - z_i) + \frac{1}{2} \rho (v_1^2 - v_i^2) - \frac{1}{2} \rho f \frac{L}{D} v_i |v_i|$$

หรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัด P_i แปลงเป็น $P_i - \rho g (z_i - z_1) + \frac{1}{2} \rho (v_1^2 - v_i^2) - \frac{1}{2} \rho f \frac{L}{D} v_i |v_i|$

เพราะฉะนั้น

$$P_i = P_1 - \rho g (i-1) \Delta x \sin \theta + \frac{1}{2} \rho (v_i^2 - v_1^2) - \frac{1}{2} \rho f \frac{v_i |v_i| (i-1) \Delta x}{D} \quad (3.38)$$

เมื่อ

$$\sin \theta = \frac{z_i - z_1}{x_i - x_1} = \frac{\Delta z}{\Delta x}$$

3.5.3 BASIC BOUNDARY CONDITION

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าจะต้องให้ Initial Condition ของจุดข้างเคียงในการหาค่าตอบของสมการ 3.33 และ 3.34 ที่เวลา $t + \Delta t$ สังเกตว่าในการหาค่าตอบที่ปลายด้าน upstream ของท่อ (ดังรูป 3.2) มีเพียงสมการที่ 3.34 ตามเส้น C^+ เท่านั้น และที่ปลายท่อด้าน downstream (ดังรูป 3.2) มีเพียงสมการที่ 3.33 ตามเส้น C^- เท่านั้นเช่นกัน ทั้ง 2 กรณีนี้ไม่อาจหาค่าตอบของสมการได้จำเป็นจะต้องหา boundary equation มาอีกกรณีละ 1 สมการที่เป็นอิสระกัน เพื่อร่วมกับสมการ characteristic ที่อยู่หาค่าตอบที่ upstream และ downstream นั้น ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป

UPSTREAM BOUNDARY CONDITION ($i = 1$)

นำสมการเบอร์นูลีมาพิจารณาที่เวลา $t + \Delta t$ ตามรูป (3.2)

$$P_{P_1} = [P_R + \rho g (z_R - z_1)] - \frac{1}{2} \rho v_{P_1}^2 [1 - K_x \text{sign}(v_{P_1})] \quad (3.39)$$

$$\text{sign}(v_{P_1}) = \frac{v_{P_1}}{|v_{P_1}|}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และสมการ 3.34 นำมาไว้ที่ Upstream จะได้

c^- :

$$P_{P_1} = C_M + B V_{P_1} \quad (3.40)$$

แก้สมการ 3.39 และ 3.40 ก็จะได้คำตอบที่ Upstream

$$V_{P_1} = \frac{P_{P_1} - C_{M_1}}{B} \quad (3.41)$$

VALVE AT DOWNSTREAM CONDITION ($i = N + 1 = NS$)

จากสมการ 3.33

$$C^+ : P_{P_{NS}} = C_{P_{NS}} - B V_{P_{NS}} \quad (3.42)$$

ที่วาล์ว $t = 0$: $v_0 A = (C_d A_0)_0 \sqrt{\frac{2P_0}{\rho}} \quad (3.43)$

เมื่อ

v_0 = ความเร็วในสถานะ Steady State ที่วาล์ว

A = พื้นที่หน้าตัดของท่อ

C_d = Valve discharge coefficient

A_0 = พื้นที่ของการเปิดวาล์ว

P_0 = ความดันที่วาล์วในสถานะ Steady State

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ $t = t + \Delta t$; (Unsteady State)

$$v_p A = (C_d A_0) \sqrt{\frac{2P_p}{\rho}} \quad (3.44)$$

ให้

$$\tau = \frac{C_d A_0}{(C_d A_0)_0}$$

หารสมการ 3.44 ด้วยสมการ 3.43 ได้

$$v_p = \tau v_0 \sqrt{\frac{P_p}{P_0}} \quad (3.45)$$

ในกรณี Steady Flow มีค่าเท่ากับ 1 และในกรณีที่ปิดวาล์วในตำแหน่ง ปิดสนิทจะมีค่าเท่ากับ 0 ควรสังเกตว่าค่าของวาล์วอาจมีค่าเกิน 1 ได้ถ้า Unsteady Flow เกิดจากการเปิดวาล์วอย่างฉับพลันโดยใช้ตัวห้อย NS แสดงตำแหน่ง Down stream ของท่อโดยใช้สมการ 3.42 และ 3.45 ดังนี้

แทนสมการ 3.42 ในสมการ 3.45

$$v_{PNS}^2 = \frac{(\tau v_0)^2 (C_p - B v_p)}{P_0}$$

$$v_{PNS}^2 + 2BC_v v_{PNS} - 2C_v C_p = 0$$

$$v_{PNS} = -BC_v \pm \sqrt{(BC_v)^2 + 2C_v C_p}$$

ดังนั้น

$$v_{PNS} = -BC_v + \sqrt{(BC_v)^2 + 2C_v C_p} \quad (3.46)$$

$$\text{เมื่อ } C_v = \frac{(v_0 \tau)^2}{2P_0}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับค่า τ อาจใช้ความสัมพันธ์ของเวลาในการปิดวาล์วจนสนิทดังนี้

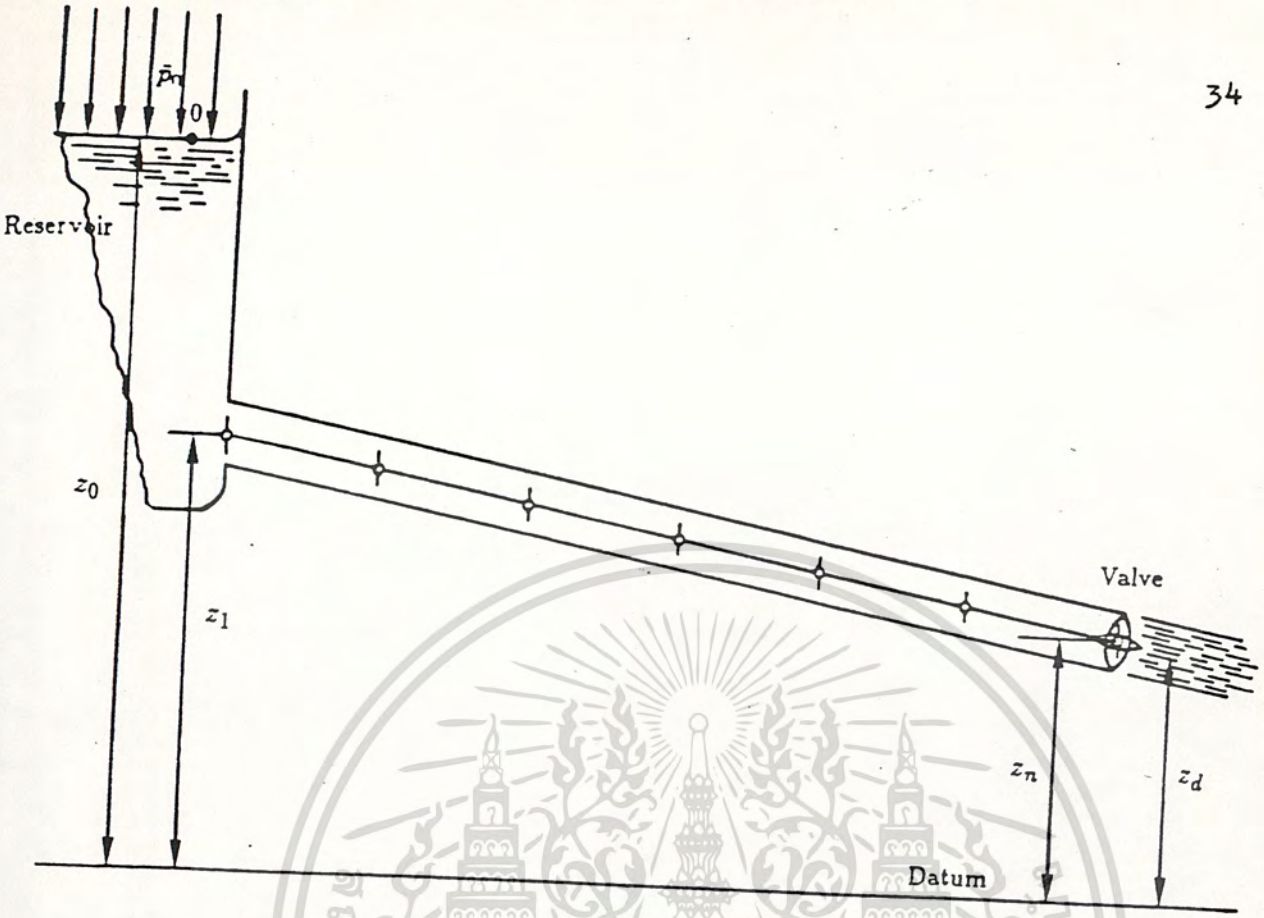
$$\tau = \begin{cases} (1 - \frac{t}{t_c})^{E_m} & ; 0 < t_c < t \\ 0 & ; t > t_c \end{cases}$$

t = เวลาใด ๆ นับตั้งแต่ปิดวาล์ว

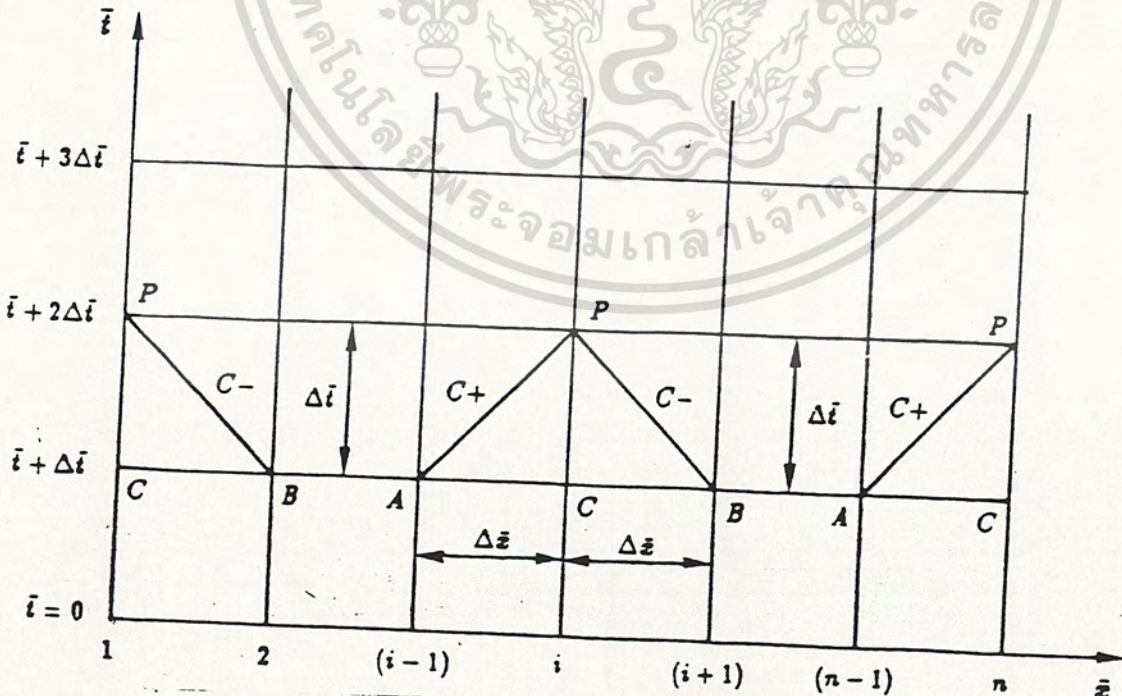
t_c = เวลาวาล์วปิดสนิท



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 ระบบที่เชื่อม RESERVOIR โดยมีวาล์วที่ปลายท่อ



รูปที่ 3.2 ระบาย $x-t$ แสดง GRID OF CHARACTERISTICS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ สรุปผลและผลการวิจารณ์

ในปัจจุบัน high speed digital computer ได้ถูกพัฒนาจนสามารถนำมาใช้เป็นเครื่องมือในการคำนวณแบบที่ต้องทำซ้ำได้ การแก้ปัญหาของการไหลแบบไม่คงที่ด้วย Method of Characteristic มีลักษณะของการทำซ้ำเช่นกันจึงเหมาะสมที่จะใช้ high speed computer แก้ปัญหา หลังจากที่ได้อีกขั้นขั้นตอนในการหาคำตอบของสมการของการไหลแบบไม่คงที่จนมีความเข้าใจสามารถเขียนโปรแกรม computer เพื่อแสดงผลการคำนวณ ผลการคำนวณที่ได้จะนำมาเป็นบรรทัดฐานในการเปรียบเทียบกับวิธี Method of Lines ในส่วนนี้จะแสดงโปรแกรมการวิเคราะห์สมการการไหล

4.1 โปรแกรมการวิเคราะห์คำตอบของสมการ Characteristic

สำหรับโปรแกรมการวิเคราะห์และผลที่ได้จะได้อย่างยิ่งในภาคผนวก

4.2 Introduction to method of Line

จากสมการพื้นฐานการไหลแบบไม่คงที่ที่ได้ derive ในบทที่ 2

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{\rho a} \frac{\partial p}{\partial t} + g \sin \theta + \frac{f v |v|}{2D} = 0 \tag{4.1}$$

$$a^2 \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial t} + a^2 v \frac{dA}{A dx} \Big|_{p=const} = 0$$

สมการ 4.1 เขียนให้อยู่ในรูป

$$\frac{A}{a} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{B}{a} \frac{\partial u}{\partial x} = C \tag{4.2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{\rho a} \\ 0 & \frac{1}{\rho a} \end{bmatrix} \frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} v \\ p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ a^2 & 0 \end{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \begin{bmatrix} v \\ p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{f v |v|}{2\rho} \\ -a^2 v \frac{dA}{A dx} \Big|_{p=\text{const}} \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

และสมการ C^+ และ C^- ซึ่งได้ derive แล้ว

$$\frac{\partial v}{\partial t} \pm \frac{1}{\rho a} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{f v |v|}{2D} + g \sin \theta + \frac{a v dA}{A dx} \Big|_{p=\text{const}} = 0 \quad (4.4)$$

เขียนให้อยู่ในรูปแบบสมการ 4.2 ได้คือ

(4.5)

$$\begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{\rho a} \\ 1 & -\frac{1}{\rho a} \end{bmatrix} \frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} v+p \\ v-p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a & \frac{1}{a} \\ a & \frac{1}{a} \end{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \begin{bmatrix} v+p \\ v-p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -g \sin \theta - \frac{1}{2} f v |v| - \frac{d v d A}{A dx} \Big|_p \\ -g \sin \theta - \frac{1}{2} f v |v| + \frac{a v d A}{A dx} \Big|_p \end{bmatrix}$$

ในส่วนของการพัฒนา Method Of Lines ในการวิเคราะห์ปัญหาการไหลแบบไม่คงที่จะอยู่นอกเหนือขอบเขตของวิทยานิพนธ์ในภาคการศึกษาที่ ๑ จึงไม่ได้กล่าวไว้ แต่อาจจะนำมาเป็นจุดสำคัญของวิทยานิพนธ์ในปีต่อไป

4.3 บทสรุป-วิจารณ์และสิ่งที่จะทำต่อไป

การวิเคราะห์ปัญหาการไหลแบบไม่คงที่ด้วยวิธี Method of Characteristic นี้เป็นวิธีที่ได้คำตอบถูกต้องแม่นยำมาก แต่ไม่เหมาะสมในการวิเคราะห์ Stability ของระบบ เพราะสมการ Ordinary Differential Equation ซึ่งไม่สามารถหา Stability ของระบบได้

สำหรับภาคการศึกษาที่ ๑ นักศึกษาได้ค้นคว้าและรวบรวมข้อมูลเบื้องต้นที่จำเป็นในการศึกษาเกี่ยวกับวิธี Method of Characteristic เพื่อนำผลการวิเคราะห์เป็นบรรทัดฐานสำหรับการหาคำตอบของสมการพื้นฐานการไหลแบบไม่คงที่ด้วย Method of Lines ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมแสดงผลการคำนวณเชิงตัวเลข



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมแสดงผลเชิงตัวเลข

```
CLS: DIM hp(101), qp(101), h(101), q(101)
```

```
start:
```

```
CLS
```

```
ipr = 1
```

```
LPRINT " Pipe length(m)"; : INPUT "x1"; x1: LPRINT x1
```

```
LPRINT " Pipe diameter(m)"; : INPUT "d"; d: LPRINT d
```

```
LPRINT " Pipe friction"; : INPUT "f"; f: LPRINT f
```

```
LPRINT " Elevation at reservoir(m)"; : INPUT "hr"; hr: LPRINT hr
```

```
LPRINT " Time of closure(sec)"; : INPUT "tc"; tc: LPRINT tc
```

```
LPRINT " Time-Max(sec) "; : INPUT "tmax"; tmax: LPRINT tmax
```

```
begin:
```

```
a = 1200: g = 9.806: em = 1.5: n = 5: cda = .009
```

```
ns = n + 1
```

```
r = f * x1 / (2 * g * d * 5 * .7854 ^ 2 * n)
```

```
b = a / (g * .7854 * d ^ 2)
```

```
dt = x1 / (a * n)
```

```
q0 = SQR(2 * g * cda ^ 2 * hr / ((r * n * 2 * g * (cda ^ 2)) + 1))
```

```
FOR i = 1 TO ns
```

```
h(i) = hr - (i - 1) * r * q0 ^ 2
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่าวิธีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
q(i) = q0
```

```
NEXT i
```

```
cvp = (tau * q0) ^ 2 / (2 * h(ns))
```

```
t = 0
```

```
k = 0
```

```
tau = 1
```

```
LPRINT "a,xl,d,f = "; a; ; xl; ; d; ; f
```

```
LPRINT "hr,h0,q0 = "; hr; ; h0; ; q0
```

```
LPRINT "cda,tc,em = "; cda; ; tc; ; em
```

```
LPRINT "g,tmax,dt,b = "; g; ; tmax; ; dt; ; b
```

```
LPRINT "n = "; n
```

```
LPRINT : LPRINT "head and discharge along the pipe"
```

```
LPRINT "time x/l = 0 .2 .4 .6 .8
```

```
30 LPRINT USING "##.##"; t; : LPRINT SPC(2); "h =";
```

```
FOR i = 1 TO ns
```

```
LPRINT USING "###.##"; h(i) - hr; : LPRINT SPC(2);
```

```
NEXT
```

```
LPRINT USING "#.###"; tau
```

```
LPRINT SPC(7); "q = ";
```

```
FOR i = 1 TO ns
```

```
LPRINT USING "#.###"; q(i); : LPRINT SPC(4);
```

```
NEXT
```

```
LPRINT
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
40 หากกรณี $t = t_i + dt$ ห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
IF t > tmax THEN GOTO endprog
```

```
k = k + 1
```

```
FOR i = 2 TO n
```

```
    cp = h(i - 1) + q(i - 1) * (b - r * ABS(q(i - 1)))
```

```
    cm = h(i + 1) - q(i + 1) * (b - r * ABS(q(i + 1)))
```

```
    hp(i) = .5 * (cp + cm)
```

```
    qp(i) = (hp(i) - cm) / b
```

```
NEXT i
```

```
hp(1) = hr
```

```
qp(1) = q(2) + (hp(1) - h(2) - r * q(2) * ABS(q(2))) / b
```

```
sign = SGN(t - tc)
```

```
SELECT CASE sign
```

```
    CASE -1
```

```
        tau = (1 - (t / tc)) ^ em
```

```
        cv = tau ^ 2 * cvp
```

```
    CASE 0, 1
```

```
        tau = 0
```

```
        cv = 0
```

```
END SELECT
```

```
cp = h(n) + q(n) * (b - r * ABS(q(n)))
```

```
qp(ns) = -cv * b + SQR((cv * b) ^ 2 + 2 * cv * cp)
```

```
hp(ns) = cp - b * qp(ns)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

FOR i = 1 TO ns
  h(i) = hp(i)
  q(i) = qp(i)
NEXT i

chk = SGN(k / (ipr ^ 2) - k)
SELECT CASE chk
  CASE -1
    GOTO 40
  CASE 0
    GOTO 30
  CASE 1
    GOTO 40
END SELECT

endprog:
ERASE hp, qp, h, q
GOTO start

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการคำนวณเชิงตัวเลข



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pipe length(m) 600
 Pipe diameter(m) .5
 Pipe friction .02
 Elevation at reservoir(m) 150
 Time of closure(sec) 0
 Time-Max(sec) 2

a,xl,d,f = 1200 600 .5 .02
 hr,h0,q0 = 150 0 .4879915
 cda,bc,em = .009 0 1.5
 g,tmax,dt,b = 9.806 2 .1 623.2445
 n = 5

head and discharge along the pipe

time	x/l =	0	.2	.4	.6	.8	1.0	tau
0.00	h =	0.00	-0.02	-0.04	-0.06	-0.08	-0.09	1.000
	q =	0.488	0.488	0.488	0.488	0.488	0.488	
0.10	h =	0.00	-0.02	-0.04	-0.06	-0.08	304.04	0.000
	q =	0.488	0.488	0.488	0.488	0.488	0.000	
0.20	h =	0.00	-0.02	-0.04	-0.06	304.05	304.04	0.000
	q =	0.488	0.488	0.488	0.488	0.000	0.000	
0.30	h =	0.00	-0.02	-0.04	304.06	304.05	304.06	0.000
	q =	0.488	0.488	0.488	0.000	0.000	0.000	
0.40	h =	0.00	-0.02	304.07	304.06	304.07	304.06	0.000
	q =	0.488	0.488	0.000	0.000	0.000	0.000	
0.50	h =	0.00	304.08	304.07	304.08	304.07	304.08	0.000
	q =	0.488	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
0.60	h =	0.00	304.08	304.09	304.08	304.09	304.08	0.000
	q =	-0.488	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
0.70	h =	0.00	0.02	304.09	304.10	304.09	304.10	0.000
	q =	-0.488	-0.488	0.000	0.000	0.000	0.000	
0.80	h =	0.00	0.02	0.04	304.10	304.11	304.10	0.000
	q =	-0.488	-0.488	-0.488	0.000	0.000	0.000	
0.90	h =	0.00	0.02	0.04	0.06	304.11	304.12	0.000
	q =	-0.488	-0.488	-0.488	-0.488	0.000	0.000	
1.00	h =	0.00	0.02	0.04	0.06	0.08	304.12	0.000
	q =	-0.488	-0.488	-0.488	-0.488	-0.488	0.000	
1.10	h =	0.00	0.02	0.04	0.06	0.08	-303.95	0.000
	q =	-0.488	-0.488	-0.488	-0.488	-0.488	0.000	
1.20	h =	0.00	0.02	0.04	0.06	-303.96	-303.95	0.000
	q =	-0.488	-0.488	-0.488	-0.488	-0.000	0.000	
1.30	h =	0.00	0.02	0.04	-303.97	-303.96	-303.97	0.000
	q =	-0.488	-0.488	-0.488	-0.000	-0.000	0.000	
1.40	h =	0.00	0.02	-303.98	-303.97	-303.98	-303.97	0.000
	q =	-0.488	-0.488	-0.000	-0.000	-0.000	0.000	
1.50	h =	0.00	-303.99	-303.98	-303.99	-303.98	-303.99	0.000
	q =	-0.488	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	0.000	
1.60	h =	0.00	-303.99	-304.00	-303.99	-304.00	-303.99	0.000
	q =	0.488	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	0.000	
1.70	h =	0.00	-0.02	-304.00	-304.01	-304.00	-304.01	0.000
	q =	0.488	0.488	-0.000	-0.000	-0.000	0.000	
1.80	h =	0.00	-0.02	-0.04	-304.01	-304.02	-304.01	0.000
	q =	0.488	0.488	0.488	-0.000	-0.000	0.000	
1.90	h =	0.00	-0.02	-0.04	-0.06	-304.02	-304.02	0.000
	q =	0.488	0.488	0.488	0.488	-0.000	0.000	

Pipe length(m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pipe length(m) 600
 Pipe diameter(m) .5
 Pipe friction .02
 Elevation at reservoir(m) 150
 Time of closure(sec) 10
 Time-Max(sec) 2
 a,x1,d,f = 1200 600 .5 .02
 hr,h0,q0 = 150 0 .4879915
 cda,tc,em = .009 10 1.5
 g,tmax,dl,b = 9.806 2 .1 623.2445
 n = 5

head and discharge along the pipe

time	x/l =	0	.2	.4	.6	.8	1.0	tau
0.00	h =	0.00	-0.02	-0.04	-0.06	-0.08	-0.09	1.000
	q =	0.488	0.488	0.488	0.488	0.488	0.488	
0.10	h =	0.00	-0.02	-0.04	-0.06	-0.08	304.04	0.985
	q =	0.488	0.488	0.488	0.488	0.488	0.000	
0.20	h =	0.00	-0.02	-0.04	-0.06	304.05	304.04	0.970
	q =	0.488	0.488	0.488	0.488	0.000	0.000	
0.30	h =	0.00	-0.02	-0.04	304.06	304.05	304.06	0.955
	q =	0.488	0.488	0.488	0.000	0.000	0.000	
0.40	h =	0.00	-0.02	304.07	304.06	304.07	304.06	0.941
	q =	0.488	0.488	0.000	0.000	0.000	0.000	
0.50	h =	0.00	304.08	304.07	304.08	304.07	304.08	0.926
	q =	0.488	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
0.60	h =	0.00	304.08	304.09	304.08	304.09	304.08	0.911
	q =	-0.488	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
0.70	h =	0.00	0.02	304.09	304.10	304.09	304.10	0.897
	q =	-0.488	-0.488	0.000	0.000	0.000	0.000	
0.80	h =	0.00	0.02	0.04	304.10	304.11	304.10	0.882
	q =	-0.488	-0.488	-0.488	0.000	0.000	0.000	
0.90	h =	0.00	0.02	0.04	0.06	304.11	304.12	0.868
	q =	-0.488	-0.488	-0.488	-0.488	0.000	0.000	
1.00	h =	0.00	0.02	0.04	0.06	0.08	304.12	0.854
	q =	-0.488	-0.488	-0.488	-0.488	-0.488	0.000	
1.10	h =	0.00	0.02	0.04	0.06	0.08	-303.95	0.840
	q =	-0.488	-0.488	-0.488	-0.488	-0.488	0.000	
1.20	h =	0.00	0.02	0.04	0.06	-303.96	-303.95	0.826
	q =	-0.488	-0.488	-0.488	-0.488	-0.000	0.000	
1.30	h =	0.00	0.02	0.04	-303.97	-303.96	-303.97	0.811
	q =	-0.488	-0.488	-0.488	-0.000	-0.000	0.000	
1.40	h =	0.00	0.02	-303.98	-303.97	-303.98	-303.97	0.798
	q =	-0.488	-0.488	-0.000	-0.000	-0.000	0.000	
1.50	h =	0.00	-303.99	-303.98	-303.99	-303.98	-303.99	0.784
	q =	-0.488	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	0.000	
1.60	h =	0.00	-303.99	-304.00	-303.99	-304.00	-303.99	0.770
	q =	0.488	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	0.000	
1.70	h =	0.00	-0.02	-304.00	-304.01	-304.00	-304.01	0.756
	q =	0.488	0.488	-0.000	-0.000	-0.000	0.000	
1.80	h =	0.00	-0.02	-0.04	-304.01	-304.02	-304.01	0.743
	q =	0.488	0.488	0.488	-0.000	-0.000	0.000	
1.90	h =	0.00	-0.02	-0.04	-0.06	-304.02	-304.02	0.729
	q =	0.488	0.488	0.488	0.488	-0.000	0.000	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pipe length(m) 600
 Pipe diameter(m) .5
 Pipe friction .02
 Elevation at reservoir(m) 150
 Time of closure(sec) 1
 Time-Max(sec) 2
 a,x1,d,f = 1200 600 .5 .02
 hr,h0,q0 = 150 0 .4879915
 cda,tc,em = .009 1 1.5
 g,tmax,dt,b = 9.806 2 .1 623.2445
 n = 5

head and discharge along the pipe

time	x/l =	0	.2	.4	.6	.8	1.0	tau
0.00	h =	0.00	-0.02	-0.04	-0.06	-0.08	-0.09	1.000
	q =	0.488	0.488	0.488	0.488	0.488	0.488	
0.10	h =	0.00	-0.02	-0.04	-0.06	-0.08	73.10	0.854
	q =	0.488	0.488	0.488	0.488	0.488	0.371	
0.20	h =	0.00	-0.02	-0.04	-0.06	73.12	99.41	0.716
	q =	0.488	0.488	0.488	0.488	0.371	0.328	
0.30	h =	0.00	-0.02	-0.04	73.13	99.42	127.41	0.586
	q =	0.488	0.488	0.488	0.371	0.328	0.283	
0.40	h =	0.00	-0.02	73.15	99.44	127.42	156.67	0.465
	q =	0.488	0.488	0.371	0.328	0.283	0.236	
0.50	h =	0.00	73.16	99.45	127.43	156.68	186.60	0.354
	q =	0.488	0.371	0.328	0.283	0.236	0.188	
0.60	h =	0.00	99.46	127.45	156.69	186.61	216.38	0.253
	q =	0.253	0.328	0.283	0.237	0.188	0.141	
0.70	h =	0.00	54.29	156.70	186.62	216.39	244.95	0.164
	q =	0.169	0.166	0.237	0.188	0.141	0.095	
0.80	h =	0.00	57.24	113.46	216.40	244.96	270.86	0.089
	q =	0.079	0.077	0.071	0.141	0.095	0.053	
0.90	h =	0.00	59.18	116.94	171.80	270.87	292.06	0.032
	q =	-0.015	-0.016	-0.019	-0.022	0.053	0.019	
1.00	h =	0.00	59.70	117.51	171.41	218.90	304.10	0.000
	q =	-0.111	-0.111	-0.110	-0.106	-0.098	0.000	
1.10	h =	0.00	58.33	114.16	164.61	204.64	157.78	0.000
	q =	-0.206	-0.205	-0.198	-0.185	-0.160	0.000	
1.20	h =	0.00	54.47	105.44	147.40	103.50	105.18	0.000
	q =	-0.298	-0.294	-0.280	-0.251	-0.087	0.000	
1.30	h =	0.00	47.10	87.71	44.32	47.94	49.21	0.000
	q =	-0.381	-0.374	-0.347	-0.182	-0.092	0.000	
1.40	h =	0.00	33.24	-14.01	-11.75	-9.96	-9.29	0.000
	q =	-0.449	-0.435	-0.276	-0.188	-0.095	0.000	
1.50	h =	0.00	-61.11	-66.21	-68.29	-68.98	-69.13	0.000
	q =	-0.488	-0.351	-0.275	-0.189	-0.096	0.000	
1.60	h =	0.00	-99.44	-115.38	-123.44	-127.46	-128.67	0.000
	q =	-0.253	-0.328	-0.264	-0.183	-0.094	0.000	
1.70	h =	0.00	-54.28	-156.67	-174.55	-183.13	-185.78	0.000
	q =	-0.169	-0.166	-0.236	-0.169	-0.087	0.000	
1.80	h =	0.00	-57.23	-113.44	-216.36	-232.87	-237.58	0.000
	q =	-0.079	-0.077	-0.071	-0.141	-0.076	0.000	
1.90	h =	0.00	-59.17	-116.92	-171.77	-270.81	-279.96	0.000
	q =	0.015	0.016	0.019	0.022	-0.053	0.000	

Pipe length(m) 80000
 Pipe diameter(m) .75
 Pipe friction .1
 Elevation at reservoir(m) 150
 Time of closure(sec) 0
 Time-Max(sec) 267
 a,xl,d,f = 1200 80000 .75 .1
 hr,h0,q0 = 150 0 .4314414
 cda,tc,em = .009 0 1.5
 g,tmax,dt,b = 9.806 267 13.33333 276.9976
 n = 5

head and discharge along the pipe

time	x/l =	0	.2	.4	.6	.8	1.0	tau
0.00	h =	0.00	-6.56	-13.13	-19.69	-26.26	-32.82	1.000
	q =	0.431	0.431	0.431	0.431	0.431	0.431	
13.33	h =	0.00	-6.56	-13.13	-19.69	-26.26	86.68	0.000
	q =	0.431	0.431	0.431	0.431	0.431	0.000	
26.67	h =	0.00	-6.56	-13.13	-19.69	89.97	86.68	0.000
	q =	0.431	0.431	0.431	0.431	0.012	0.000	
40.00	h =	0.00	-6.56	-13.13	93.25	89.97	93.24	0.000
	q =	0.431	0.431	0.431	0.024	0.012	0.000	
53.33	h =	0.00	-6.56	96.54	93.25	96.52	93.24	0.000
	q =	0.431	0.431	0.036	0.024	0.012	0.000	
66.67	h =	0.00	99.85	96.54	99.79	96.52	99.79	0.000
	q =	0.431	0.047	0.036	0.024	0.012	0.000	
80.00	h =	0.00	99.85	103.07	99.79	103.05	99.79	0.000
	q =	-.313	0.047	0.035	0.024	0.012	0.000	
93.33	h =	0.00	4.97	103.07	106.31	103.05	106.31	0.000
	q =	-.313	-.319	0.035	0.024	0.012	0.000	
%106.67	h =	0.00	4.97	10.02	106.31	109.56	106.31	0.000
	q =	-.324	-.319	-.324	0.024	0.012	0.000	
%120.00	h =	0.00	5.04	10.02	15.12	109.56	112.80	0.000
	q =	-.324	-.329	-.324	-.329	0.012	0.000	
%133.33	h =	0.00	5.04	10.14	15.12	20.27	112.80	0.000
	q =	-.333	-.329	-.333	-.329	-.334	0.000	
%146.67	h =	0.00	5.10	10.14	15.28	20.27	-68.32	0.000
	q =	-.333	-.337	-.333	-.338	-.334	0.000	
%160.00	h =	0.00	5.10	10.24	15.28	-71.29	-68.32	0.000
	q =	-.341	-.337	-.342	-.338	-.011	0.000	
%173.33	h =	0.00	5.14	10.24	-74.28	-71.29	-74.26	0.000
	q =	-.341	-.345	-.342	-.022	-.011	0.000	
%186.67	h =	0.00	5.14	-77.29	-74.28	-77.25	-74.26	0.000
	q =	-.348	-.345	-.032	-.022	-.011	0.000	
%200.00	h =	0.00	-80.31	-77.29	-80.24	-77.25	-80.23	0.000
	q =	-.348	-.043	-.032	-.022	-.011	0.000	
%213.33	h =	0.00	-80.31	-83.23	-80.24	-83.21	-80.23	0.000
	q =	0.247	-.043	-.032	-.022	-.011	0.000	
%226.67	h =	0.00	-4.02	-83.23	-86.19	-83.21	-86.19	0.000
	q =	0.247	0.254	-.032	-.021	-.011	0.000	
%240.00	h =	0.00	-4.02	-8.12	-86.19	-89.16	-86.19	0.000
	q =	0.260	0.254	0.260	-.021	-.011	0.000	
%253.33	h =	0.00	-4.10	-8.12	-12.29	-89.16	-92.12	0.000
	q =	0.260	0.266	0.260	0.267	-.011	0.000	
%266.67	h =	0.00	-4.10	-8.26	-12.29	-16.50	-92.12	0.000
	q =	0.272	0.266	0.272	0.267	0.273	0.000	

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสำนักงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ทางการค้า
 ไม่สามารถเผยแพร่หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต และต้องขออนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีนำไปใช้

Pipe length(m) 80000
 Pipe diameter(m) .75
 Pipe friction .02
 Elevation at reservoir(m) 150
 Time of closure(sec) 2
 Time-Max(sec) 267
 a,x1,d,r = 1200 80000 .75 .02
 hr,h0,q0 = 150 0 .4750198
 cda,tc,em = .009 2 1.5
 g,tmax,dt,b = 9.806 267 13.33333 276.9976
 n = 5

head and discharge along the pipe

time	x/l =	0	.2	.4	.6	.8	1.0	tau
0.00	h =	0.00	-1.59	-3.18	-4.77	-6.37	-7.96	1.000
	q =	0.475	0.475	0.475	0.475	0.475	0.475	
13.33	h =	0.00	-1.59	-3.18	-4.77	-6.37	123.62	0.000
	q =	0.475	0.475	0.475	0.475	0.475	0.000	
26.67	h =	0.00	-1.59	-3.18	-4.77	124.42	123.62	0.000
	q =	0.475	0.475	0.475	0.475	0.003	0.000	
40.00	h =	0.00	-1.59	-3.18	125.21	124.42	125.21	0.000
	q =	0.475	0.475	0.475	0.006	0.003	0.000	
53.33	h =	0.00	-1.59	126.01	125.21	126.01	125.21	0.000
	q =	0.475	0.475	0.009	0.006	0.003	0.000	
66.67	h =	0.00	126.80	126.01	126.80	126.01	126.80	0.000
	q =	0.475	0.011	0.009	0.006	0.003	0.000	
80.00	h =	0.00	126.80	127.60	126.80	127.60	126.80	0.000
	q =	-.446	0.011	0.009	0.006	0.003	0.000	
93.33	h =	0.00	1.50	127.60	128.40	127.60	128.40	0.000
	q =	-.446	-.447	0.009	0.006	0.003	0.000	
106.67	h =	0.00	1.50	3.00	128.40	129.19	128.40	0.000
	q =	-.447	-.447	-.447	0.006	0.003	0.000	
120.00	h =	0.00	1.50	3.00	4.50	129.19	129.99	0.000
	q =	-.447	-.447	-.447	-.447	0.003	0.000	
133.33	h =	0.00	1.50	3.00	4.50	6.00	129.99	0.000
	q =	-.448	-.447	-.448	-.447	-.448	0.000	
146.67	h =	0.00	1.50	3.00	4.50	6.00	-116.58	0.000
	q =	-.448	-.448	-.448	-.448	-.448	0.000	
160.00	h =	0.00	1.50	3.00	4.50	-117.37	-116.58	0.000
	q =	-.448	-.448	-.448	-.448	-.003	0.000	
173.33	h =	0.00	1.50	3.00	-118.16	-117.37	-118.16	0.000
	q =	-.448	-.449	-.448	-.006	-.003	0.000	
186.67	h =	0.00	1.50	-118.95	-118.16	-118.95	-118.16	0.000
	q =	-.449	-.449	-.009	-.006	-.003	0.000	
200.00	h =	0.00	-119.74	-118.95	-119.74	-118.95	-119.74	0.000
	q =	-.449	-.011	-.009	-.006	-.003	0.000	
213.33	h =	0.00	-119.74	-120.53	-119.74	-120.53	-119.74	0.000
	q =	0.421	-.011	-.009	-.006	-.003	0.000	
226.67	h =	0.00	-1.41	-120.53	-121.32	-120.53	-121.32	0.000
	q =	0.421	0.421	-.009	-.006	-.003	0.000	
240.00	h =	0.00	-1.41	-2.83	-121.32	-122.11	-121.32	0.000
	q =	0.422	0.421	0.422	-.006	-.003	0.000	
253.33	h =	0.00	-1.42	-2.83	-4.25	-122.11	-122.90	0.000
	q =	0.422	0.423	0.422	0.423	-.003	0.000	
266.67	h =	0.00	-1.42	-2.83	-4.25	-5.67	-122.90	0.000
	q =	0.423	0.423	0.423	0.423	0.423	0.000	

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pipe length(m) 80000
 Pipe diameter(m) 1
 Pipe friction .02
 Elevation at reservoir(m) 150
 Time of closure(sec) 200
 Time-Max(sec) 268

a,x1,d,f = 1200 80000 1 .02
 hr,h0,q0 = 150 0 .4782017
 cda,tc,em = .009 200 1.5
 g,tmax,dt,b = 9.806 268 13.33333 155.8111
 n = 5

head and discharge along the pipe

time	x/l =	0	.2	.4	.6	.8	1.0	tau
0.00	h =	0.00	-1.21	-2.42	-3.63	-4.84	-6.05	1.000
	q =	0.478	0.478	0.478	0.478	0.478	0.478	
13.33	h =	0.00	-1.21	-2.42	-3.63	-4.84	68.46	0.902
	q =	0.478	0.478	0.478	0.478	0.478	0.000	
26.67	h =	0.00	-1.21	-2.42	-3.63	69.07	68.46	0.807
	q =	0.478	0.478	0.478	0.478	0.004	0.000	
40.00	h =	0.00	-1.21	-2.42	69.67	69.07	69.67	0.716
	q =	0.478	0.478	0.478	0.008	0.004	0.000	
53.33	h =	0.00	-1.21	70.28	69.67	70.27	69.67	0.628
	q =	0.478	0.478	0.012	0.008	0.004	0.000	
66.67	h =	0.00	70.88	70.28	70.88	70.27	70.88	0.544
	q =	0.478	0.016	0.012	0.008	0.004	0.000	
80.00	h =	0.00	70.88	71.48	70.88	71.48	70.88	0.465
	q =	-0.439	0.016	0.012	0.008	0.004	0.000	
93.33	h =	0.00	1.11	71.48	72.09	71.48	72.09	0.389
	q =	-0.439	-0.440	0.012	0.008	0.004	0.000	
106.67	h =	0.00	1.11	2.23	72.09	72.69	72.09	0.319
	q =	-0.441	-0.440	-0.441	0.008	0.004	0.000	
120.00	h =	0.00	1.12	2.23	3.35	72.69	73.30	0.253
	q =	-0.441	-0.441	-0.441	-0.441	0.004	0.000	
133.33	h =	0.00	1.12	2.23	3.35	4.47	73.30	0.192
	q =	-0.442	-0.441	-0.442	-0.441	-0.442	0.000	
146.67	h =	0.00	1.12	2.23	3.35	4.47	-63.33	0.138
	q =	-0.442	-0.442	-0.442	-0.442	-0.442	0.000	
160.00	h =	0.00	1.12	2.24	3.35	-63.93	-63.33	0.089
	q =	-0.443	-0.442	-0.443	-0.442	-0.004	0.000	
173.33	h =	0.00	1.12	2.24	-64.52	-63.93	-64.52	0.049
	q =	-0.443	-0.443	-0.443	-0.008	-0.004	0.000	
186.67	h =	0.00	1.12	-65.12	-64.52	-65.12	-64.52	0.017
	q =	-0.444	-0.443	-0.012	-0.008	-0.004	0.000	
200.00	h =	0.00	-65.72	-65.12	-65.72	-65.12	-65.72	0.000
	q =	-0.444	-0.015	-0.012	-0.008	-0.004	0.000	
213.33	h =	0.00	-65.72	-66.32	-65.72	-66.32	-65.72	0.000
	q =	0.406	-0.015	-0.012	-0.008	-0.004	0.000	
226.67	h =	0.00	-1.03	-66.32	-66.91	-66.32	-66.91	0.000
	q =	0.406	0.407	-0.012	-0.008	-0.004	0.000	
240.00	h =	0.00	-1.03	-2.07	-66.91	-67.51	-66.91	0.000
	q =	0.408	0.407	0.408	-0.008	-0.004	0.000	
253.33	h =	0.00	-1.04	-2.07	-3.11	-67.51	-68.11	0.000
	q =	0.408	0.409	0.408	0.410	-0.004	0.000	
266.67	h =	0.00	-1.04	-2.08	-3.11	-4.15	-68.11	0.000
	q =	0.410	0.409	0.410	0.410	0.410	0.000	

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pipe length(m) 80000
 Pipe diameter(m) 1
 Pipe friction .1
 Elevation at reservoir(m) 150
 Time of closure(sec) 5
 Time-Max(sec) 267
 a,xl,d,r = 1200 80000 1 .1
 hr,h0,q0 = 150 0 .4437503
 cda,t,c,em = .009 5 1.5
 g,tmax,dt,b = 9.806 267 13.33333 155.3111
 n = 5

head and discharge along the pipe

time	x/l =	0	.2	.4	.6	.8	1.0	tau
0.00	h =	0.00	-5.21	-10.42	-15.63	-20.83	-26.04	1.000
	q =	0.444	0.444	0.444	0.444	0.444	0.444	
13.33	h =	0.00	-5.21	-10.42	-15.63	-20.83	43.10	0.000
	q =	0.444	0.444	0.444	0.444	0.444	0.000	
26.67	h =	0.00	-5.21	-10.42	-15.63	45.70	43.10	0.000
	q =	0.444	0.444	0.444	0.444	0.017	0.000	
40.00	h =	0.00	-5.21	-10.42	48.31	45.70	48.30	0.000
	q =	0.444	0.444	0.444	0.033	0.017	0.000	
53.33	h =	0.00	-5.21	50.93	48.31	50.89	48.30	0.000
	q =	0.444	0.444	0.050	0.033	0.017	0.000	
66.67	h =	0.00	53.57	50.93	53.48	50.89	53.48	0.000
	q =	0.444	0.067	0.050	0.033	0.017	0.000	
80.00	h =	0.00	53.57	56.08	53.48	56.05	53.48	0.000
	q =	-.278	0.067	0.050	0.033	0.017	0.000	
93.33	h =	0.00	3.56	56.08	58.62	56.05	58.62	0.000
	q =	-.278	-.288	0.050	0.033	0.017	0.000	
106.67	h =	0.00	3.56	7.22	58.62	61.17	58.62	0.000
	q =	-.297	-.288	-.297	0.033	0.016	0.000	
120.00	h =	0.00	3.65	7.22	10.94	61.17	63.71	0.000
	q =	-.297	-.305	-.297	-.306	0.016	0.000	
133.33	h =	0.00	3.65	7.36	10.94	14.72	63.71	0.000
	q =	-.313	-.305	-.313	-.306	-.314	0.000	
146.67	h =	0.00	3.71	7.36	11.14	14.72	-31.65	0.000
	q =	-.313	-.320	-.313	-.321	-.314	0.000	
160.00	h =	0.00	3.71	7.48	11.14	-33.88	-31.65	0.000
	q =	-.326	-.320	-.327	-.321	-.014	0.000	
173.33	h =	0.00	3.76	7.48	-36.13	-33.88	-36.10	0.000
	q =	-.326	-.332	-.327	-.029	-.014	0.000	
186.67	h =	0.00	3.76	-38.40	-36.13	-38.34	-36.10	0.000
	q =	-.338	-.332	-.043	-.029	-.014	0.000	
200.00	h =	0.00	-40.67	-38.40	-40.59	-38.34	-40.57	0.000
	q =	-.338	-.057	-.043	-.029	-.014	0.000	
213.33	h =	0.00	-40.67	-42.83	-40.59	-42.81	-40.57	0.000
	q =	0.204	-.057	-.043	-.029	-.014	0.000	
226.67	h =	0.00	-2.73	-42.83	-45.03	-42.81	-45.03	0.000
	q =	0.204	0.215	-.043	-.029	-.014	0.000	
240.00	h =	0.00	-2.73	-5.55	-45.03	-47.25	-45.03	0.000
	q =	0.224	0.215	0.225	-.029	-.014	0.000	
253.33	h =	0.00	-2.82	-5.55	-8.44	-47.25	-49.45	0.000
	q =	0.224	0.234	0.225	0.235	-.014	0.000	
266.67	h =	0.00	-2.82	-5.70	-8.44	-11.38	-49.45	0.000
	q =	0.243	0.234	0.243	0.235	0.244	0.000	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pipe length(m) 80000
 Pipe diameter(m) 1
 Pipe friction .1
 Elevation at reservoir(m) 150
 Time of closure(sec) 2
 Time-Max(sec) 267
 a,xl,d,f = 1200 80000 1 .1
 hr,h0,q0 = 150 0 .4437503
 cda,tc,em = .009 2 1.5
 g,tmax,dt,b = 9.806 267 13.33333 155.8111
 n = 5

head and discharge along the pipe

time	x/l =	0	.2	.4	.6	.8	1.0	tau
0.00	h =	0.00	-5.21	-10.42	-15.63	-20.83	-26.04	1.000
	q =	0.444	0.444	0.444	0.444	0.444	0.444	
13.33	h =	0.00	-5.21	-10.42	-15.63	-20.83	43.10	0.000
	q =	0.444	0.444	0.444	0.444	0.444	0.000	
26.67	h =	0.00	-5.21	-10.42	-15.63	45.70	43.10	0.000
	q =	0.444	0.444	0.444	0.444	0.017	0.000	
40.00	h =	0.00	-5.21	-10.42	48.31	45.70	48.30	0.000
	q =	0.444	0.444	0.444	0.033	0.017	0.000	
53.33	h =	0.00	-5.21	50.93	48.31	50.89	48.30	0.000
	q =	0.444	0.444	0.050	0.033	0.017	0.000	
66.67	h =	0.00	53.57	50.93	53.48	50.89	53.48	0.000
	q =	0.444	0.067	0.050	0.033	0.017	0.000	
80.00	h =	0.00	53.57	56.08	53.48	56.05	53.48	0.000
	q =	-.278	0.067	0.050	0.033	0.017	0.000	
93.33	h =	0.00	3.56	56.08	58.62	56.05	58.62	0.000
	q =	-.278	-.288	0.050	0.033	0.017	0.000	
106.67	h =	0.00	3.56	7.22	58.62	61.17	58.62	0.000
	q =	-.297	-.288	-.297	0.033	0.016	0.000	
120.00	h =	0.00	3.65	7.22	10.94	61.17	63.71	0.000
	q =	-.297	-.305	-.297	-.306	0.016	0.000	
133.33	h =	0.00	3.65	7.36	10.94	14.72	63.71	0.000
	q =	-.313	-.305	-.313	-.306	-.314	0.000	
146.67	h =	0.00	3.71	7.36	-11.14	14.72	-31.65	0.000
	q =	-.313	-.320	-.313	-.321	-.314	0.000	
160.00	h =	0.00	3.71	7.48	11.14	-33.88	-31.65	0.000
	q =	-.326	-.320	-.327	-.321	-.014	0.000	
173.33	h =	0.00	3.76	7.48	-36.13	-33.88	-36.10	0.000
	q =	-.326	-.332	-.327	-.029	-.014	0.000	
186.67	h =	0.00	3.76	-38.40	-36.13	-38.34	-36.10	0.000
	q =	-.338	-.332	-.043	-.029	-.014	0.000	
200.00	h =	0.00	-40.67	-38.40	-40.59	-38.34	-40.57	0.000
	q =	-.338	-.057	-.043	-.029	-.014	0.000	
213.33	h =	0.00	-40.67	-42.83	-40.59	-42.81	-40.57	0.000
	q =	0.204	-.057	-.043	-.029	-.014	0.000	
226.67	h =	0.00	-2.73	-42.83	-45.03	-42.81	-45.03	0.000
	q =	0.204	0.215	-.043	-.029	-.014	0.000	
240.00	h =	0.00	-2.73	-5.55	-45.03	-47.25	-45.03	0.000
	q =	0.224	0.215	0.225	-.029	-.014	0.000	
253.33	h =	0.00	-2.82	-5.55	-8.44	-47.25	-49.45	0.000
	q =	0.224	0.234	0.225	0.235	-.014	0.000	
266.67	h =	0.00	-2.82	-5.70	-8.44	-11.38	-49.45	0.000
	q =	0.243	0.234	0.243	0.235	0.244	0.000	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม้วารณใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pipe length(m) 80000
 Pipe diameter(m) .6
 Pipe friction .08
 Elevation at reservoir(m) 150
 Time of closure(sec) 140
 Time-Max(sec) 270
 a,x,l,d,T = 1200 80000 .6 .08
 hr,h0,q0 = 150 0 .4314414
 cda,tc,em = .009 140 1.5
 g,tmax,dt,b = 9.806 270 13.33333 432.8087
 n = 5

head and discharge along the pipe

time	x/l =	0	.2	.4	.6	.8	1.0	tau
0.00	h =	0.00	-6.56	-13.13	-19.69	-26.26	-32.82	1.000
	q =	0.431	0.431	0.431	0.431	0.431	0.431	
13.33	h =	0.00	-6.56	-13.13	-19.69	-26.26	153.91	0.861
	q =	0.431	0.431	0.431	0.431	0.431	0.000	
26.67	h =	0.00	-6.56	-13.13	-19.69	157.19	153.91	0.728
	q =	0.431	0.431	0.431	0.431	0.008	0.000	
40.00	h =	0.00	-6.56	-13.13	160.47	157.19	160.47	0.604
	q =	0.431	0.431	0.431	0.015	0.008	0.000	
53.33	h =	0.00	-6.56	163.76	160.47	163.75	160.47	0.487
	q =	0.431	0.431	0.023	0.015	0.008	0.000	
66.67	h =	0.00	167.05	163.76	167.03	163.75	167.03	0.379
	q =	0.431	0.030	0.023	0.015	0.008	0.000	
80.00	h =	0.00	167.05	170.31	167.03	170.30	167.03	0.281
	q =	-.356	0.030	0.023	0.015	0.008	0.000	
93.33	h =	0.00	5.50	170.31	173.57	170.30	173.57	0.192
	q =	-.356	-.358	0.023	0.015	0.008	0.000	
106.67	h =	0.00	5.50	11.03	173.57	176.84	173.57	0.116
	q =	-.360	-.358	-.360	0.015	0.008	0.000	
120.00	h =	0.00	5.53	11.03	16.59	176.84	180.11	0.054
	q =	-.360	-.363	-.360	-.363	0.008	0.000	
133.33	h =	0.00	5.53	11.09	16.59	22.17	180.11	0.010
	q =	-.365	-.363	-.365	-.363	-.365	0.000	
146.67	h =	0.00	5.56	11.09	16.67	22.17	-131.06	0.000
	q =	-.365	-.367	-.365	-.367	-.365	0.000	
160.00	h =	0.00	5.56	11.14	16.67	-134.19	-131.06	0.000
	q =	-.369	-.367	-.369	-.367	-.007	0.000	
173.33	h =	0.00	5.58	11.14	-137.33	-134.19	-137.32	0.000
	q =	-.369	-.370	-.369	-.014	-.007	0.000	
186.67	h =	0.00	5.58	-140.47	-137.33	-140.46	-137.32	0.000
	q =	-.372	-.370	-.022	-.014	-.007	0.000	
200.00	h =	0.00	-143.62	-140.47	-143.59	-140.46	-143.59	0.000
	q =	-.372	-.029	-.022	-.014	-.007	0.000	
213.33	h =	0.00	-143.62	-146.73	-143.59	-146.72	-143.59	0.000
	q =	0.303	-.029	-.022	-.014	-.007	0.000	
226.67	h =	0.00	-4.73	-146.73	-149.85	-146.72	-149.85	0.000
	q =	0.303	0.306	-.022	-.014	-.007	0.000	
240.00	h =	0.00	-4.73	-9.51	-149.85	-152.98	-149.85	0.000
	q =	0.310	0.306	0.310	-.014	-.007	0.000	
253.33	h =	0.00	-4.78	-9.51	-14.33	-152.98	-156.10	0.000
	q =	0.310	0.313	0.310	0.313	-.007	0.000	
266.67	h =	0.00	-4.78	-9.60	-14.33	-19.19	-156.10	0.000
	q =	0.316	0.313	0.316	0.313	0.316	0.000	

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ขออนุญาต
 ไฉวกรณิใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pipe length(m) 80000

Pipe diameter(m) .6

Pipe friction .08

Elevation at reservoir(m) 150

Time of closure(sec) 10

Time-Max(sec) 267

a,xl,d,f = 1200 80000 .6 .08

hr,h0,q0 = 150 0 .4314414

cda,tc,em = .009 10 1.5

g,tmax,dt,b = 9.806 267 13.33333 432.8087

n = 5

head and discharge along the pipe

time	x/l =	0	.2	.4	.6	.8	1.0	tau
0.00	h =	0.00	-6.56	-13.13	-19.69	-26.26	-32.82	1.000
	q =	0.431	0.431	0.431	0.431	0.431	0.431	
13.33	h =	0.00	-6.56	-13.13	-19.69	-26.26	153.91	0.000
	q =	0.431	0.431	0.431	0.431	0.431	0.000	
26.67	h =	0.00	-6.56	-13.13	-19.69	157.19	153.91	0.000
	q =	0.431	0.431	0.431	0.431	0.008	0.000	
40.00	h =	0.00	-6.56	-13.13	160.47	157.19	160.47	0.000
	q =	0.431	0.431	0.431	0.015	0.008	0.000	
53.33	h =	0.00	-6.56	163.76	160.47	163.75	160.47	0.000
	q =	0.431	0.431	0.023	0.015	0.008	0.000	
66.67	h =	0.00	167.05	163.76	167.03	163.75	167.03	0.000
	q =	0.431	0.030	0.023	0.015	0.008	0.000	
80.00	h =	0.00	167.05	170.31	167.03	170.30	167.03	0.000
	q =	-.356	0.030	0.023	0.015	0.008	0.000	
93.33	h =	0.00	5.50	170.31	173.57	170.30	173.57	0.000
	q =	-.356	-.358	0.023	0.015	0.008	0.000	
106.67	h =	0.00	5.50	11.03	173.57	176.84	173.57	0.000
	q =	-.360	-.358	-.360	0.015	0.008	0.000	
120.00	h =	0.00	5.53	11.03	16.59	176.84	180.11	0.000
	q =	-.360	-.363	-.360	-.363	0.008	0.000	
133.33	h =	0.00	5.53	11.09	16.59	22.17	180.11	0.000
	q =	-.365	-.363	-.365	-.363	-.365	0.000	
146.67	h =	0.00	5.56	11.09	16.67	22.17	-131.06	0.000
	q =	-.365	-.367	-.365	-.367	-.365	0.000	
160.00	h =	0.00	5.56	11.14	16.67	-134.19	-131.06	0.000
	q =	-.369	-.367	-.369	-.367	-.007	0.000	
173.33	h =	0.00	5.58	11.14	-137.33	-134.19	-137.32	0.000
	q =	-.369	-.370	-.369	-.014	-.007	0.000	
186.67	h =	0.00	5.58	-140.47	-137.33	-140.46	-137.32	0.000
	q =	-.372	-.370	-.022	-.014	-.007	0.000	
200.00	h =	0.00	-143.62	-140.47	-143.59	-140.46	-143.59	0.000
	q =	-.372	-.029	-.022	-.014	-.007	0.000	
213.33	h =	0.00	-143.62	-146.73	-143.59	-146.72	-143.59	0.000
	q =	0.303	-.029	-.022	-.014	-.007	0.000	
226.67	h =	0.00	-4.73	-146.73	-149.85	-146.72	-149.85	0.000
	q =	0.303	0.306	-.022	-.014	-.007	0.000	
240.00	h =	0.00	-4.73	-9.51	-149.85	-152.98	-149.85	0.000
	q =	0.310	0.306	0.310	-.014	-.007	0.000	
253.33	h =	0.00	-4.78	-9.51	-14.33	-152.98	-156.10	0.000
	q =	0.310	0.313	0.310	0.313	-.007	0.000	
266.67	h =	0.00	-4.78	-9.60	-14.33	-19.19	-156.10	0.000
	q =	0.316	0.313	0.316	0.313	0.316	0.000	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ของนักศึกษาที่ศึกษาต่อที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pipe length(m) 122800
 Pipe diameter(m) .6
 Pipe friction .08
 Elevation at reservoir(m) 150
 Time of closure(sec) 10
 Time-Max(sec) 410
 a,xl,d,f = 1200 122800 .6 .08
 hr,h0,q0 = 150 0 .4082073
 cda,tc,em = .009 10 1.5
 g,tmax,dt,b = 9.806 410 20.46667 432.8087
 n = 5

head and discharge along the pipe

time	x/l =	0	.2	.4	.6	.8	1.0	tau
0.00	h =	0.00	-9.02	-18.04	-27.06	-36.08	-45.11	1.000
	q =	0.408	0.408	0.408	0.408	0.408	0.408	
20.47	h =	0.00	-9.02	-18.04	-27.06	-36.08	131.57	0.000
	q =	0.408	0.408	0.408	0.408	0.408	0.000	
40.93	h =	0.00	-9.02	-18.04	-27.06	136.08	131.57	0.000
	q =	0.408	0.408	0.408	0.408	0.010	0.000	
61.40	h =	0.00	-9.02	-18.04	140.59	136.08	140.59	0.000
	q =	0.408	0.408	0.408	0.021	0.010	0.000	
81.87	h =	0.00	-9.02	145.12	140.59	145.09	140.59	0.000
	q =	0.408	0.408	0.031	0.021	0.010	0.000	
102.33	h =	0.00	149.65	145.12	149.59	145.09	149.58	0.000
	q =	0.408	0.042	0.031	0.021	0.010	0.000	
122.80	h =	0.00	149.65	154.09	149.59	154.07	149.58	0.000
	q =	-0.304	0.042	0.031	0.021	0.010	0.000	
143.27	h =	0.00	6.97	154.09	158.55	154.07	158.55	0.000
	q =	-0.304	-0.309	0.031	0.021	0.010	0.000	
163.73	h =	0.00	6.97	14.02	158.55	163.02	158.55	0.000
	q =	-0.313	-0.309	-0.313	0.021	0.010	0.000	
184.20	h =	0.00	7.05	14.02	21.15	163.02	167.48	0.000
	q =	-0.313	-0.317	-0.313	-0.317	0.010	0.000	
204.67	h =	0.00	7.05	14.17	21.15	28.34	167.48	0.000
	q =	-0.321	-0.317	-0.321	-0.317	-0.321	0.000	
225.13	h =	0.00	7.12	14.17	21.36	28.34	-105.20	0.000
	q =	-0.321	-0.324	-0.321	-0.325	-0.321	0.000	
245.60	h =	0.00	7.12	14.30	21.36	-109.33	-105.20	0.000
	q =	-0.328	-0.324	-0.328	-0.325	-0.010	0.000	
266.07	h =	0.00	7.17	14.30	-113.49	-109.33	-113.46	0.000
	q =	-0.328	-0.331	-0.328	-0.019	-0.010	0.000	
286.53	h =	0.00	7.17	-117.66	-113.49	-117.60	-113.46	0.000
	q =	-0.334	-0.331	-0.029	-0.019	-0.010	0.000	
307.00	h =	0.00	-121.84	-117.66	-121.75	-117.60	-121.74	0.000
	q =	-0.334	-0.038	-0.029	-0.019	-0.010	0.000	
327.47	h =	0.00	-121.84	-125.91	-121.75	-125.88	-121.74	0.000
	q =	0.243	-0.038	-0.029	-0.019	-0.010	0.000	
347.93	h =	0.00	-5.69	-125.91	-130.02	-125.88	-130.02	0.000
	q =	0.243	0.249	-0.029	-0.019	-0.010	0.000	
368.40	h =	0.00	-5.69	-11.49	-130.02	-134.14	-130.02	0.000
	q =	0.255	0.249	0.255	-0.019	-0.010	0.000	
388.87	h =	0.00	-5.80	-11.49	-17.38	-134.14	-138.26	0.000
	q =	0.255	0.260	0.255	0.260	-0.010	0.000	
409.33	h =	0.00	-5.80	-11.67	-17.38	-23.33	-138.26	0.000
	q =	0.265	0.260	0.265	0.260	0.265	0.000	

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์งานวิชาการใช้เพื่อการศึกษามาก่อน ไม่อนุยให้ไปใช้โดยไม่ผ่านการคา

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pipe length(m) 80000
 Pipe diameter(m) .6
 Pipe friction .08
 Elevation at reservoir(m) 150
 Time of closure(sec) 0
 Time-Max(sec) 267

a,xl,d,f = 1200 80000 .6 .08
 hr,h0,q0 = 150 0 .4314414
 cda,tc,em = .009 0 1.5
 g,tmax,dt,b = 9.806 267 13.33333 432.8087
 n = 5

head and discharge along the pipe

time	x/l =	0	.2	.4	.6	.8	1.0	tau
0.00	h =	0.00	-6.56	-13.13	-19.69	-26.26	-32.82	1.000
	q =	0.431	0.431	0.431	0.431	0.431	0.431	
13.33	h =	0.00	-6.56	-13.13	-19.69	-26.26	153.91	0.000
	q =	0.431	0.431	0.431	0.431	0.431	0.000	
26.67	h =	0.00	-6.56	-13.13	-19.69	157.19	153.91	0.000
	q =	0.431	0.431	0.431	0.431	0.008	0.000	
40.00	h =	0.00	-6.56	-13.13	160.47	157.19	160.47	0.000
	q =	0.431	0.431	0.431	0.015	0.008	0.000	
53.33	h =	0.00	-6.56	163.76	160.47	163.75	160.47	0.000
	q =	0.431	0.431	0.023	0.015	0.008	0.000	
66.67	h =	0.00	167.05	163.76	167.03	163.75	167.03	0.000
	q =	0.431	0.030	0.023	0.015	0.008	0.000	
80.00	h =	0.00	167.05	170.31	167.03	170.30	167.03	0.000
	q =	-.356	0.030	0.023	0.015	0.008	0.000	
93.33	h =	0.00	5.50	170.31	173.57	170.30	173.57	0.000
	q =	-.356	-.358	0.023	0.015	0.008	0.000	
106.67	h =	0.00	5.50	11.03	173.57	176.84	173.57	0.000
	q =	-.360	-.358	-.360	0.015	0.008	0.000	
120.00	h =	0.00	5.53	11.03	16.59	176.84	180.11	0.000
	q =	-.360	-.363	-.360	-.363	0.008	0.000	
133.33	h =	0.00	5.53	11.09	16.59	22.17	180.11	0.000
	q =	-.365	-.363	-.365	-.363	-.365	0.000	
146.67	h =	0.00	5.56	11.09	16.67	22.17	-131.06	0.000
	q =	-.365	-.367	-.365	-.367	-.365	0.000	
160.00	h =	0.00	5.56	11.14	16.67	-134.19	-131.06	0.000
	q =	-.369	-.367	-.369	-.367	-.007	0.000	
173.33	h =	0.00	5.58	11.14	-137.33	-134.19	-137.32	0.000
	q =	-.369	-.370	-.369	-.014	-.007	0.000	
186.67	h =	0.00	5.58	-140.47	-137.33	-140.46	-137.32	0.000
	q =	-.372	-.370	-.022	-.014	-.007	0.000	
200.00	h =	0.00	-143.62	-140.47	-143.59	-140.46	-143.59	0.000
	q =	-.372	-.029	-.022	-.014	-.007	0.000	
213.33	h =	0.00	-143.62	-146.73	-143.59	-146.72	-143.59	0.000
	q =	0.303	-.029	-.022	-.014	-.007	0.000	
226.67	h =	0.00	-4.73	-146.73	-149.85	-146.72	-149.85	0.000
	q =	0.303	0.306	-.022	-.014	-.007	0.000	
240.00	h =	0.00	-4.73	-9.51	-149.85	-152.98	-149.85	0.000
	q =	0.310	0.306	0.310	-.014	-.007	0.000	
253.33	h =	0.00	-4.78	-9.51	-14.33	-152.98	-156.10	0.000
	q =	0.310	0.313	0.310	0.313	-.007	0.000	
266.67	h =	0.00	-4.78	-9.60	-14.33	-19.19	-156.10	0.000
	q =	0.316	0.313	0.316	0.313	0.316	0.000	

Pipe length(m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับใช้ศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต
 ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต

โปรแกรมแสดงผลด้วยกราฟ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมแสดงผลการคำนวณด้วยกราฟ

```
DIM hp(200), qp(200), h(200), q(200), hnew(200), hold(200), gold
(200)
```

```
ipr = 1
```

```
begin: ' กำหนดค่าเริ่มต้นต่างๆ
```

```
  a = 1200: x1 = 600: d = .5: f = .02: g = 9.807: hr = 150
```

```
  cda = .009: tc = 10: em = 1.5: 'tmax = 10
```

```
  n = 30: v0 = 3: position = 31
```

```
  ns = n + 1
```

```
  r = f + x1 / (2 + g + d + 5 + .7854 * 2 + n)
```

```
  b = a / (g + .7854 + d * 2)
```

```
  dt = x1 / (a + n)
```

```
  q0 = v0 + .78544 + d ^ 2
```

```
  friccoef = f + x1 / d
```

```
  period = 4 * x1 / a
```

```
  tmax = 16 + period / 4
```

```
  headmax = (a / g) + v0
```

'คำนวณโดยใช้ Method Of Characteristics

```
FOR i = 1 TO ns
```

```
  h(i) = hr - (i - 1) * r + q0 ^ 2
```

```
  q(i) = q0
```

```
NEXT i
```

```
cvp = q0 ^ 2 / (2 * h(ns))
```

```
t = 0
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

```
k = 0
```

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
tau = 1
```

'Plotter operation

```

es = CHR$(3)
LPRINT "M 400,1700,"
LPRINT "X1,150,8,10,0"; es
LPRINT "M 400,1700,"
LPRINT "D"; 400; 1700; 400; 2400; es
LPRINT "AS20,27"
FOR i = 0 TO 8
    LPRINT "M"; 400 + 150 * i; 1650
    LPRINT USING "P#!"; i, es
NEXT i
LPRINT "M"; 950; 1550
LPRINT "AS30,45"
LPRINT "Ptime 1/a sec", es
LPRINT "M"; 250; 1710
LPRINT "R900,"
LPRINT "Ppressure develop (kPa)", es
LPRINT "R(-900),"
LPRINT "M"; 400; 2050
LPRINT "D"; 400; 2050; 1600; 2050; es
LPRINT "M"; 400; 1400
LPRINT "AS 35,35"
LPRINT "Ppipelength ="; : LPRINT USING "#####!"; xl; :
LPRINT "(m.)", es
LPRINT "M"; 400; 1300
LPRINT "Ppipe diameter ="; : LPRINT USING "###.##"; d; : LPRINT

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 หรือ การเผยแพร่ทางอื่นใดที่มิได้ขออนุญาตจากเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

```

"(m.)", e$
LPRINT "M"; 400; 1200
LPRINT "Pfriction factor ="; : LPRINT USING "##.##"; f; : LPRINT
" ", e$
LPRINT "M"; 400; 1100
LPRINT "Pclosure time ="; : LPRINT USING "###"; tc; : LPRINT "
(sec)", e$
LPRINT "M"; 400; 1000
LPRINT "Pvelocity ="; : LPRINT USING "###.##"; v0; : LPRINT "(m
/sec)", e$
LPRINT "M"; 400; 900
LPRINT "Pnumber of section ="; : LPRINT USING "###"; n; : LPRINT
(""; : LPRINT USING "###"; ns; : LPRINT " nodes)", e$
LPRINT "M"; 400; 800
LPRINT "Pobserve node ="; : LPRINT USING "###"; position; :
LPRINT "", e$
LPRINT "M"; 400; 2050

told = 400: hold = 2050
hrnew = 2050
hnew = (h(position) - hr) + 350 / (2 * headmax) + 2050

30 LPRINT "D"; told; hold; told + 75 / n; hnew; e$
    hold = (h(position) - hr) + 350 / (2 * headmax) + 2050
    told = told + 75 / n
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
40 t = t + dt

```

```
IF t > tmax THEN GOTO endprog
```

```
k = k + 1
```

```
FOR i = 2 TO n
```

```
cp = h(i - 1) + q(i - 1) * (b - r + ABS(q(i - 1)))
```

```
cm = h(i + 1) - q(i + 1) * (b - r + ABS(q(i + 1)))
```

```
hp(i) = .5 * (cp + cm)
```

```
qp(i) = (hp(i) - cm) / b
```

```
NEXT i
```

```
hp(1) = hr
```

```
qp(1) = q(2) + (hp(1) - h(2) - r + q(2) * (b - r + ABS(q(2)))) / b
```

```
sign = SGN(t - tc)
```

```
SELECT CASE sign
```

```
  CASE -1
```

```
    tau = (1 - (t / tc)) ^ em
```

```
    cv = tau ^ 2 + cvp
```

```
  CASE 0, 1
```

```
    tau = 0
```

```
    cv = 0
```

```
END SELECT
```

```
cp = h(n) + q(n) * (b - r + ABS(q(n)))
```

$qp(ns) = \frac{-cv + \sqrt{cv^2 + 2 * cv * cp}}{b}$

$hp(ns) = cp - b * qp(ns)$

```

FOR i = 1 TO ns
  h(i) = hp(i)
  q(i) = qp(i)
NEXT i

hnew = (h(position) - hr) + 350 / (2 + headmax) + 2050
chk = SGN(k / (ipr ** 2) - k)

```

```

SELECT CASE chk

```

```

  CASE -1

```

```

    GOTO 40

```

```

  CASE 0

```

```

    GOTO 30

```

```

  CASE 1

```

```

    GOTO 40

```

```

END SELECT

```

```

endprog:

```

```

  END

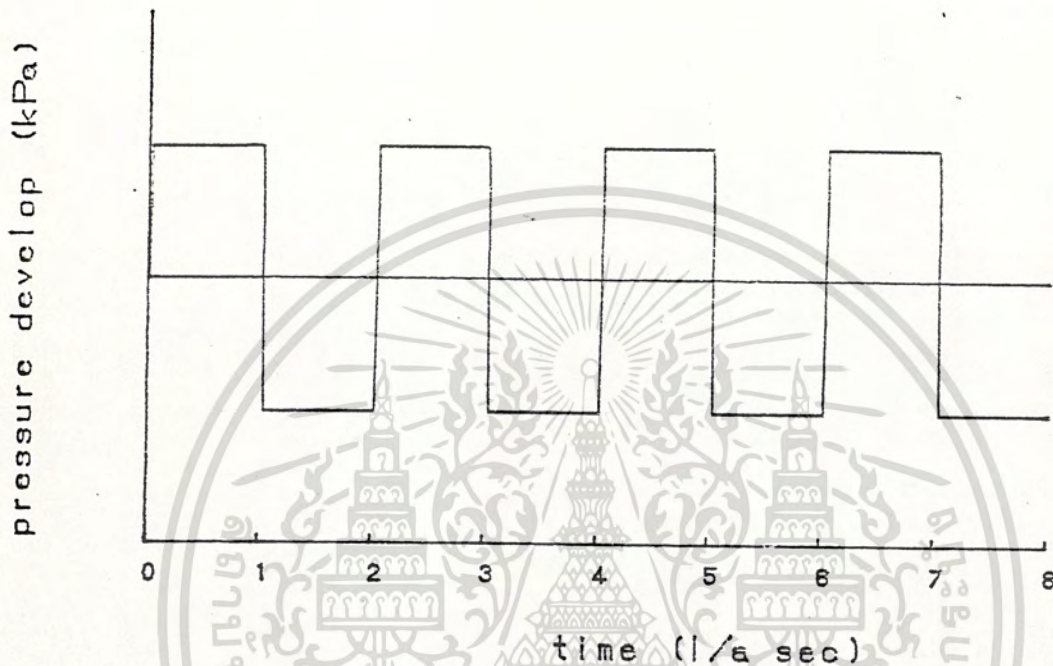
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการคำนวณแสดงผลด้วยกราฟ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



pipelenght = 600(m.)

pipe diameter = 0.50(m.)

friction factor = 0.02

closure time = 0(sec)

velocity = 3.00(m/sec),

number of section = 30 (31 nodes)

observe node = 31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



pipelenght = 600 (m.)

pipe diameter = 0.50 (m.)

friction factor = 0.02

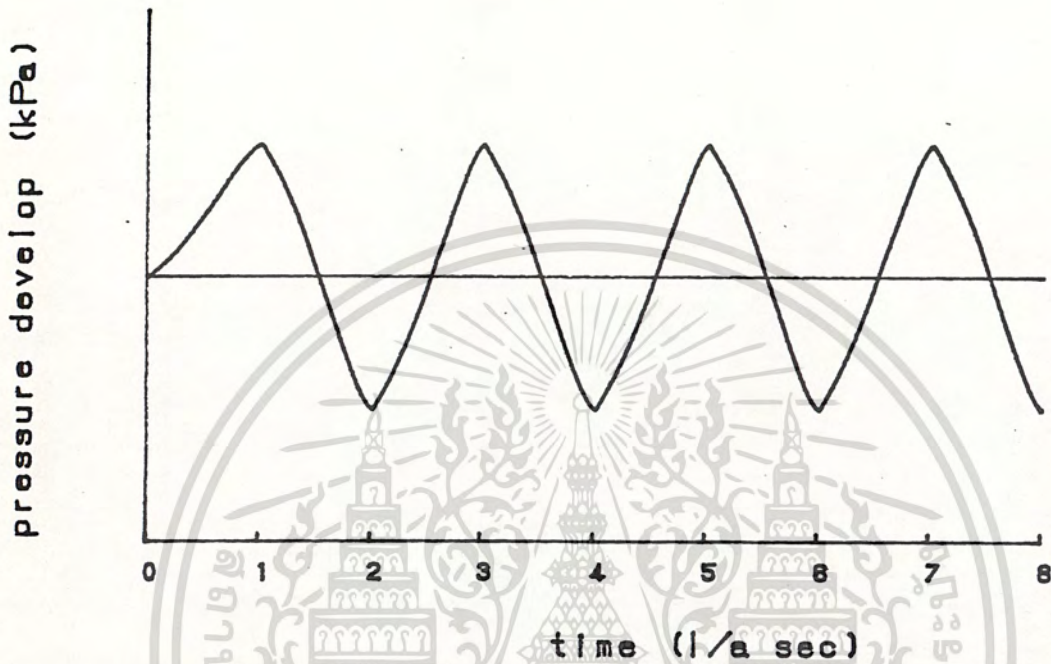
closure time = 10 (sec)

velocity = 3.00 (m/sec),

number of section = 30 (31 nodes)

observe node = 31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



pipelenght = 600(m.)

pipe diameter = 0.50(m.)

friction factor = 0.02

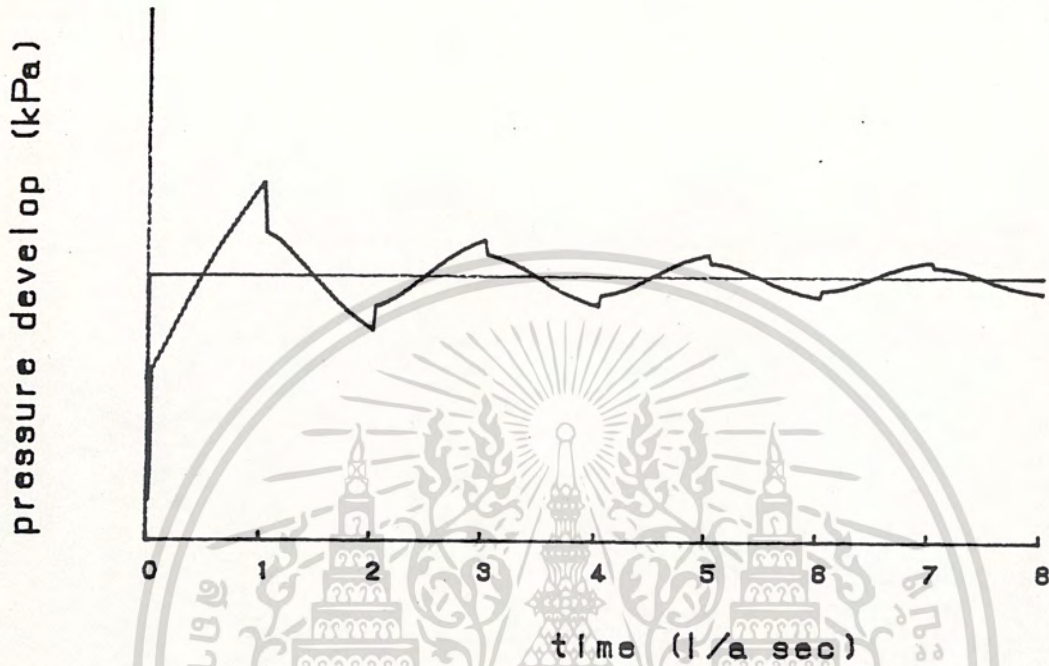
closure time = 1(sec)

velocity = 3.00(m/sec),

number of section = 30(31 nodes)

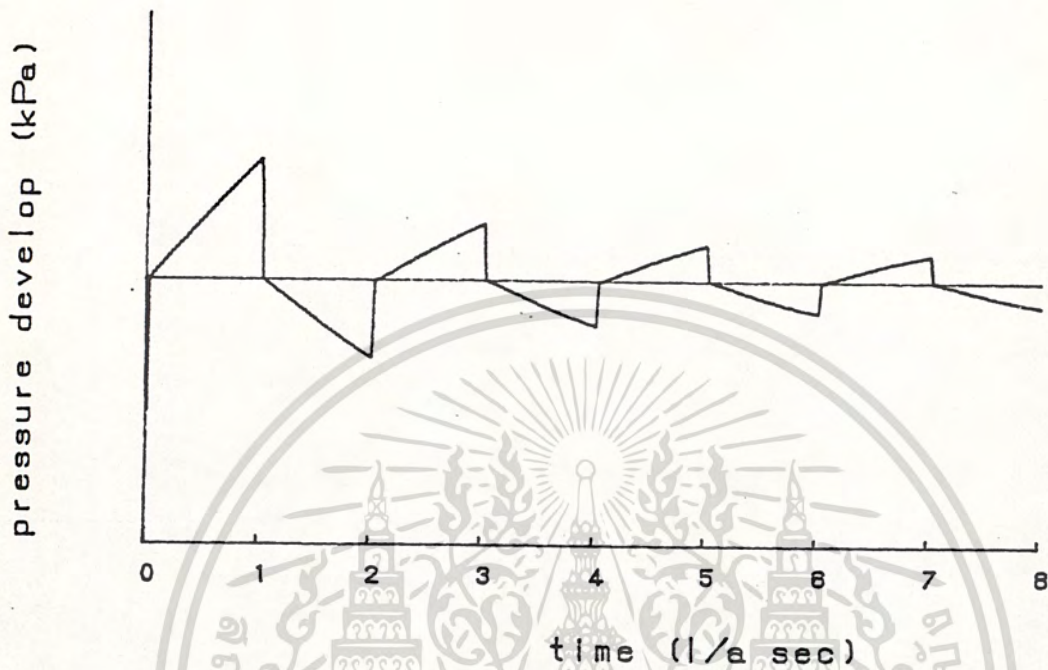
observe node = 31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



pipelenght = 80000(m.)
 pipe diameter = 0.75(m.)
 friction factor = 0.10
 closure time = 0(sec)
 velocity = 6.00(m/sec),
 number of section = 30(31 nodes)
 observe node = 31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



pipelenght = 80000(m.)

pipe diameter = 0.75(m.)

friction factor = 0.10

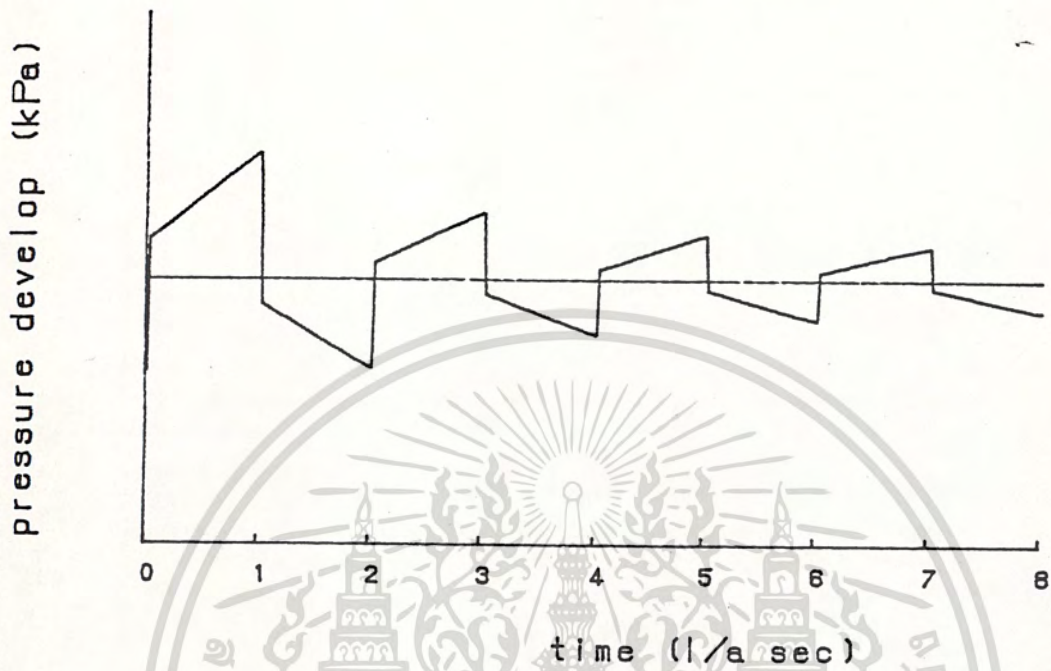
closure time = 0(sec)

velocity = 3.50(m/sec).

number of section = 30 (31 nodes)

observe node = 31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



pipelenght = 80000(m.)

pipe diameter = 0.75(m.)

friction factor = 0.07

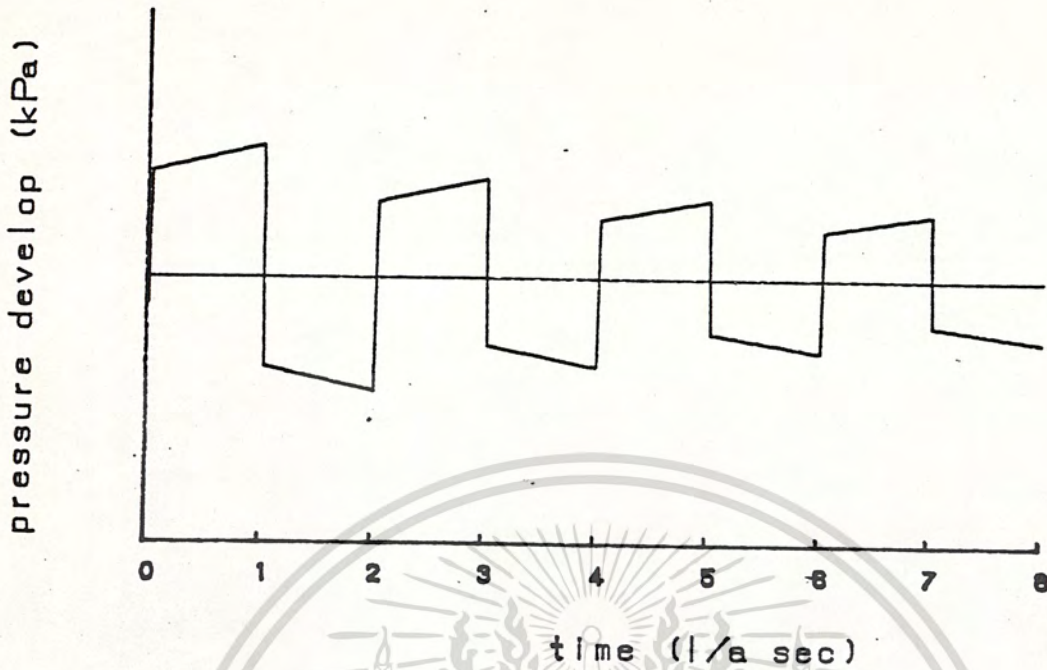
closure time = 0(sec)

velocity = 3.50(m/sec),

number of section = 30(31 nodes)

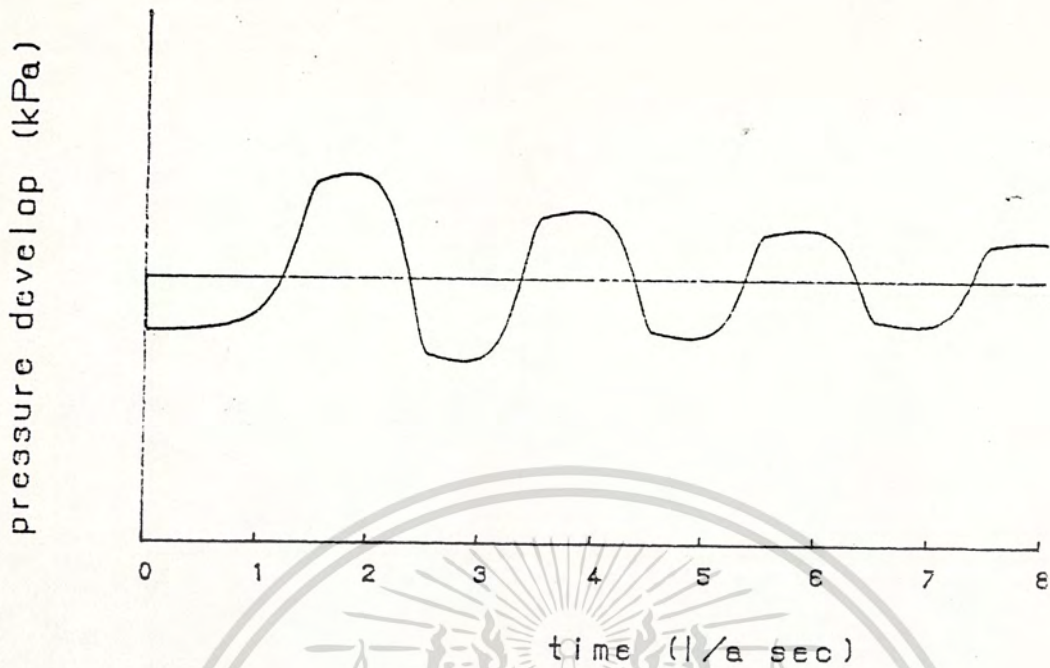
observe node = 31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



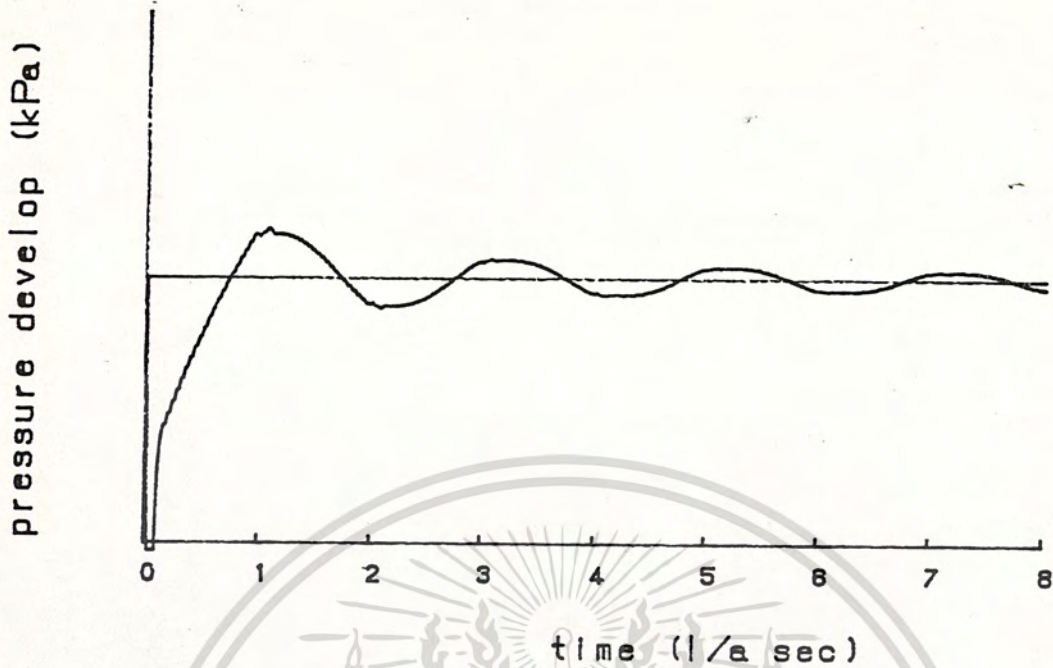
pipelenght = 80000 (m.)
 pipe diameter = 0.75 (m.)
 friction factor = 0.02
 closure time = 2 (sec)
 velocity = 3.50 (m/sec),
 number of section = 30 (31 nodes)
 observe node = 31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



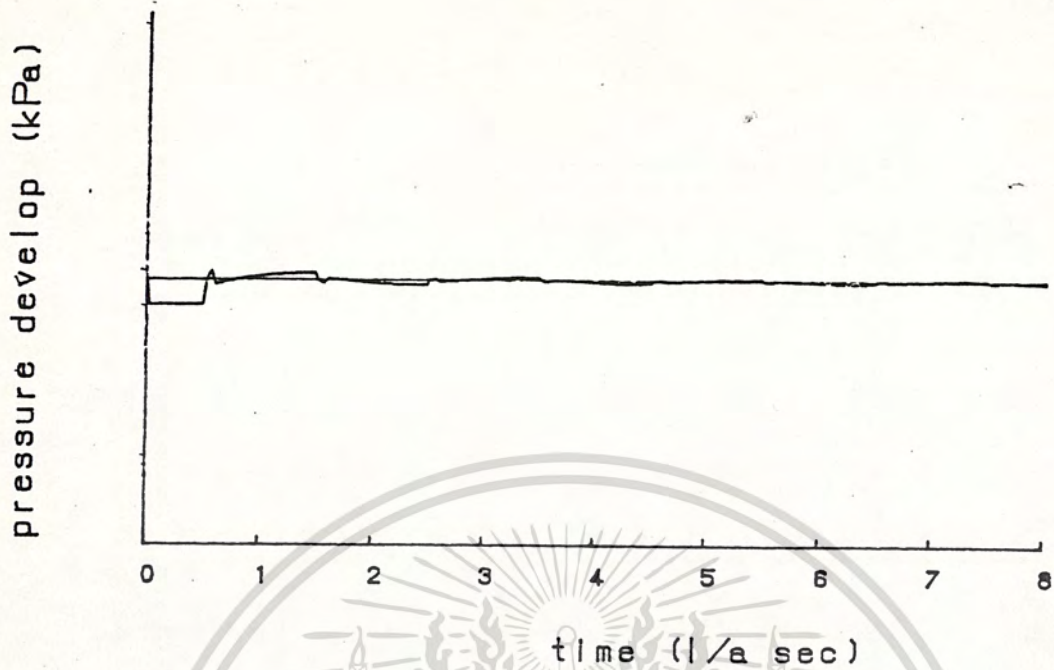
pipelenght = 80000(m.)
 pipe diameter = 1.00(m.)
 friction factor = 0.02
 closure time = 200(sec)
 velocity = 3.00(m./sec),
 number of section = 24(25 nodes)
 observe node = 25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



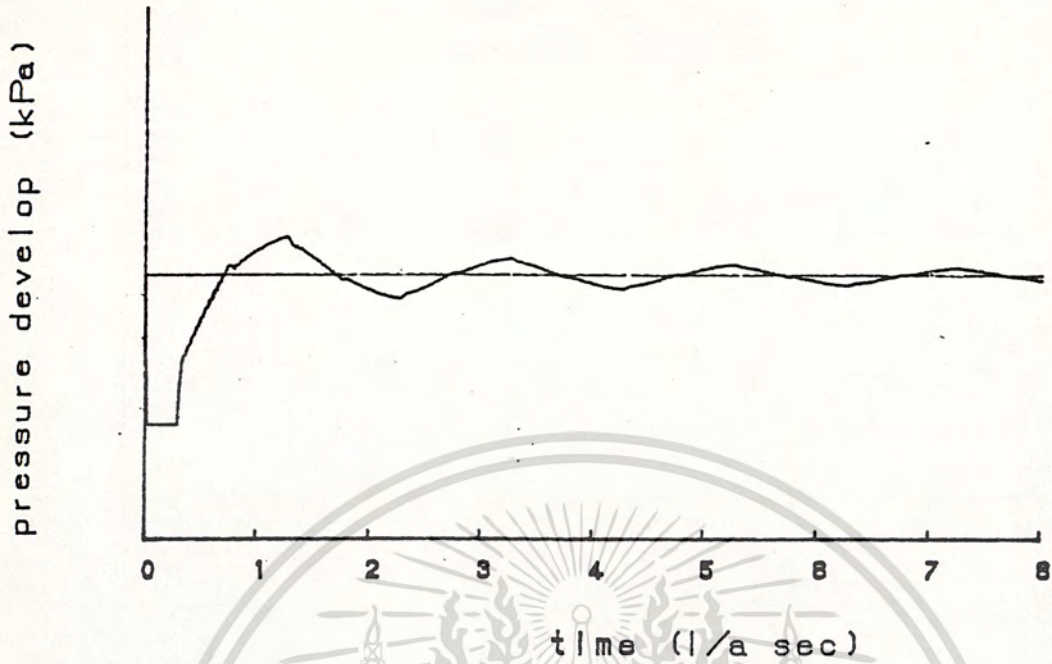
pipelenght = 80000 (ม.)
 pipe diameter = 1.00 (ม.)
 friction factor = 0.10
 closure time = 5 (sec)
 velocity = 3.50 (ม./sec),
 number of section = 25 (26 nodes)
 observe node = 23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



pipelenght = 80000(m.)
 pipe diameter = 1.00(m.)
 friction factor = 0.10
 closure time = 5(sec)
 velocity = 3.50(m/sec),
 number of section = 25(26 nodes)
 observe node = 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



pipelenght = 80000(m.)

pipe diameter = 1.00(m.)

friction factor = 0.10

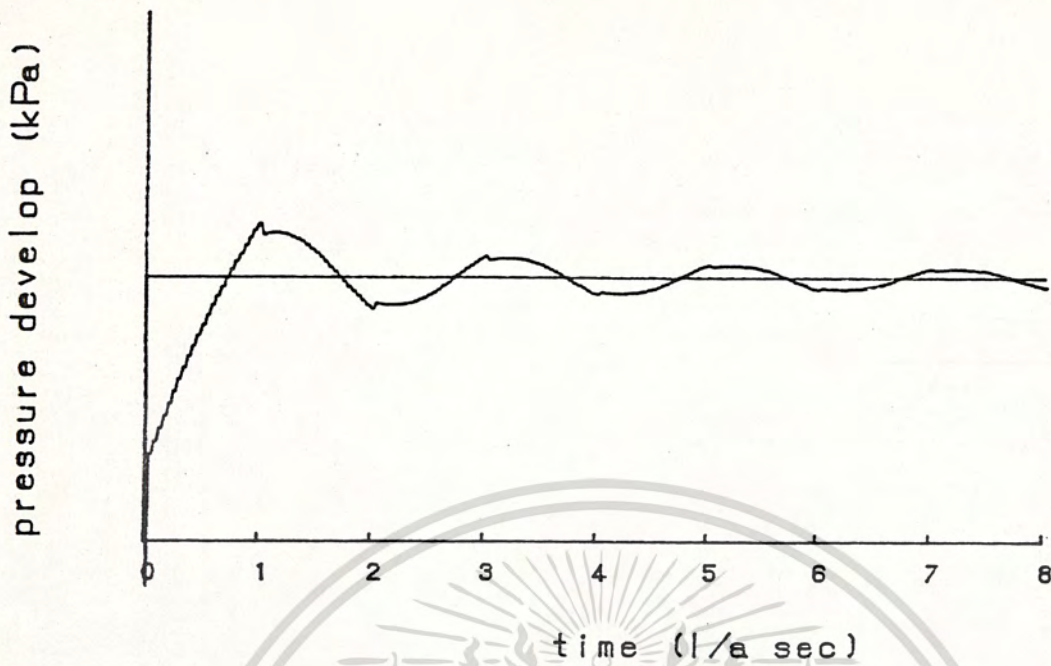
closure time = 5(sec)

velocity = 3.50(m/sec),

number of section = 25(26 nodes)

observe node = 13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



pipelenght = 80000(m.)

pipe diameter = 1.00(m.)

friction factor = 0.10

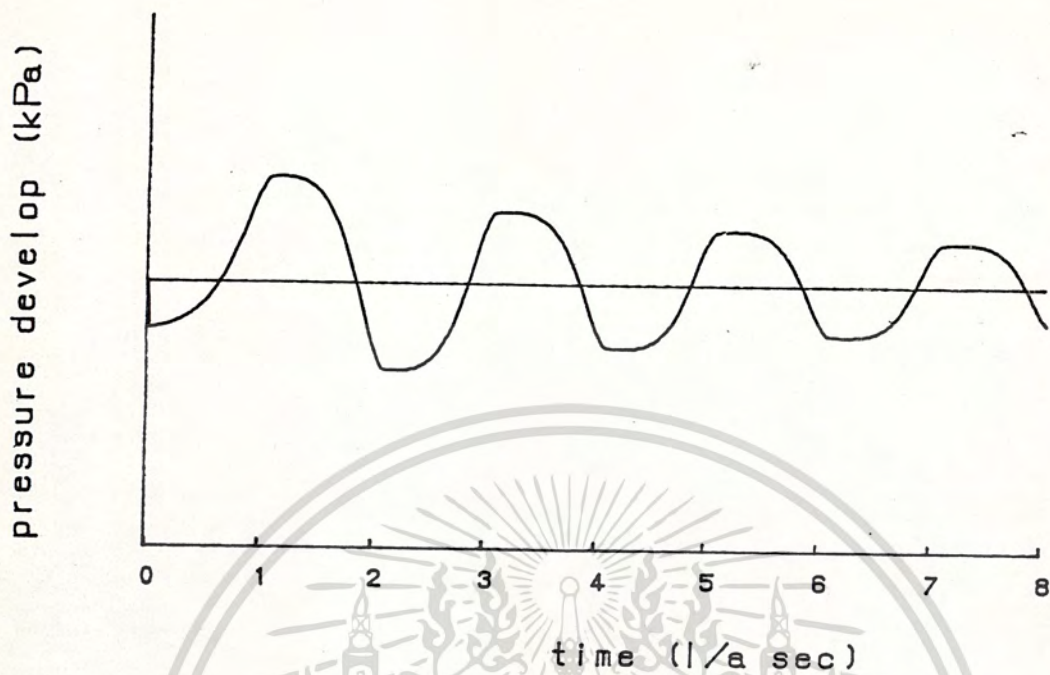
closure time = 2(sec)

velocity = 3.50(m/sec),

number of section = 24(25 nodes)

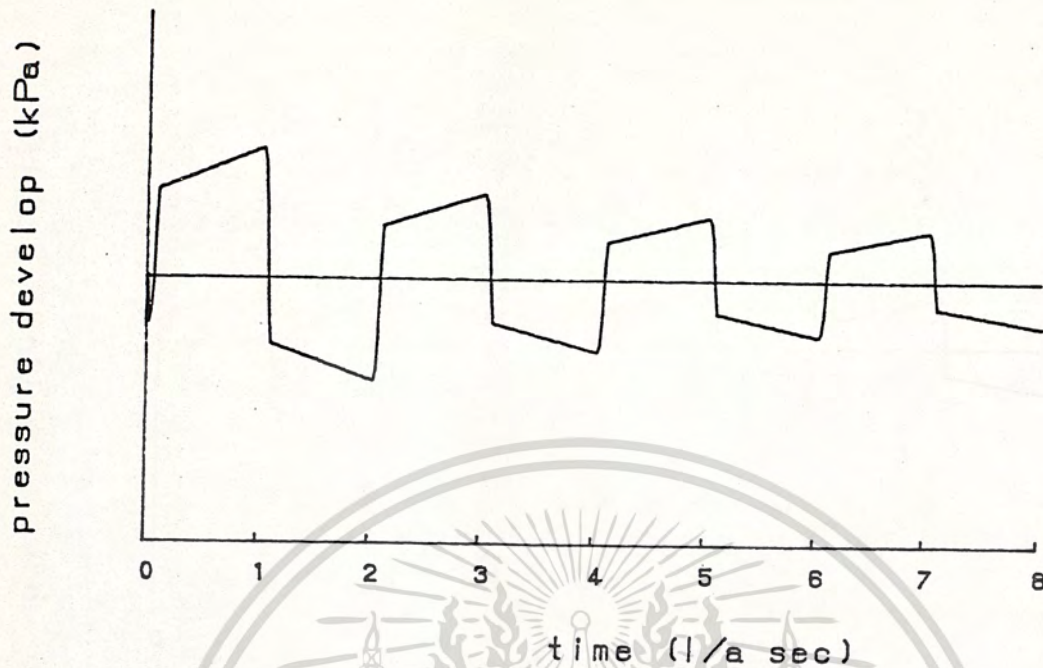
observe node = 25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



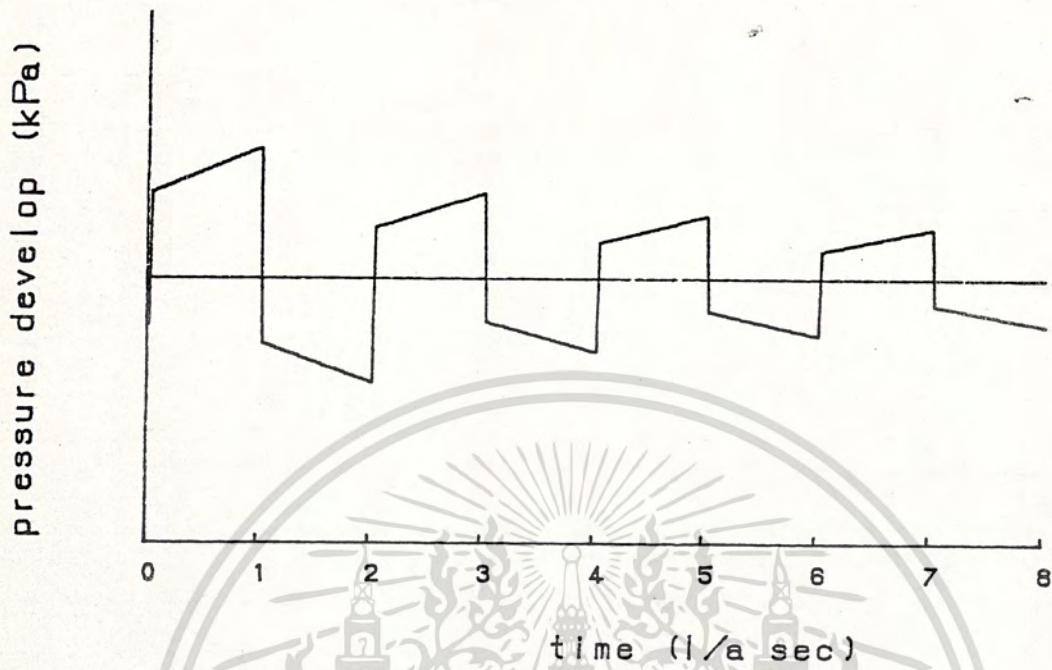
pipelenght = 80000(m.)
 pipe diameter = 0.60(m.)
 friction factor = 0.08
 closure time = 140(sec)
 velocity = 3.00(m/sec),
 number of section = 24(25 nodes)
 observe node = 25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



pipelenght = 80000(m.)
 pipe diameter = 0.60(m.)
 friction factor = 0.08
 closure time = 10(sec)
 velocity = 3.00(m/sec).
 number of section = 24(25 nodes)
 observe node = 25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีก้ารนำไปใช้



pipelenght = 80000(m.)

pipe diameter = 0.60(m.)

friction factor = 0.08

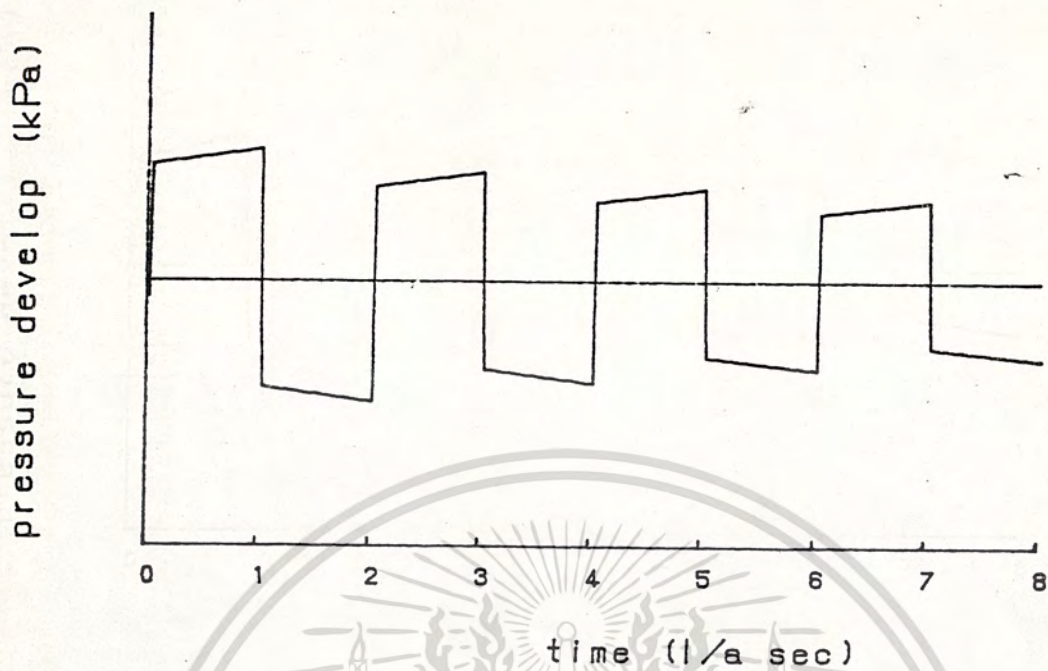
closure time = 0(sec)

velocity = 3.00(m/sec).

number of section = 24(25 nodes)

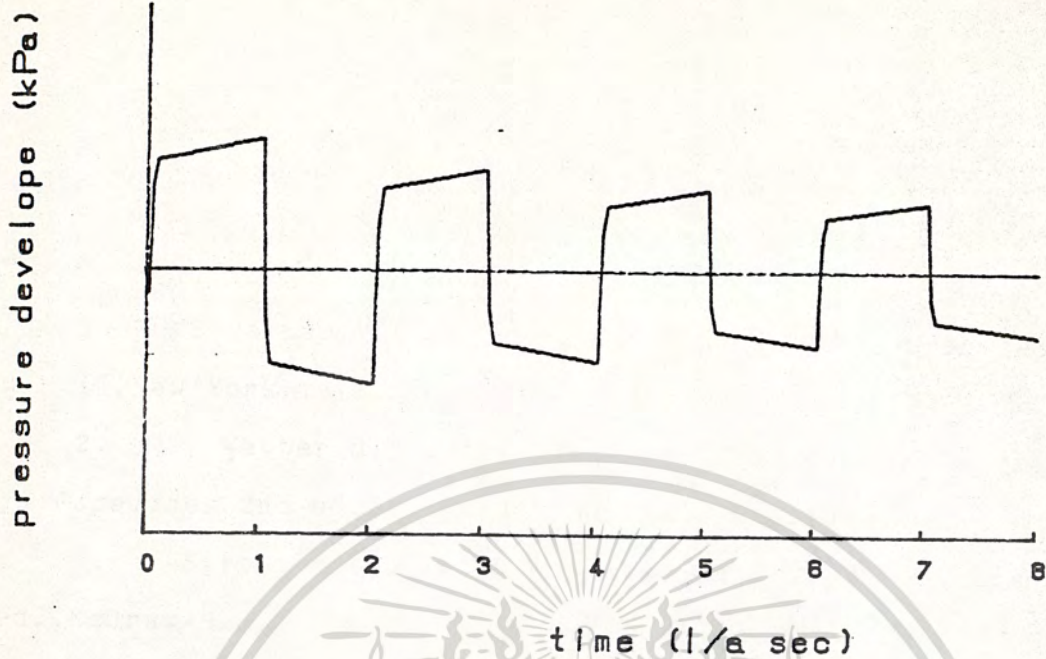
observe node = 25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



pipelenght = 80000(m.)
 pipe diameter = 0.60(m.)
 friction factor = 0.08 closure time = 0(sec)
 velocity = 1.00(m/sec),
 number of section = 24(25 nodes)
 observe node = 25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

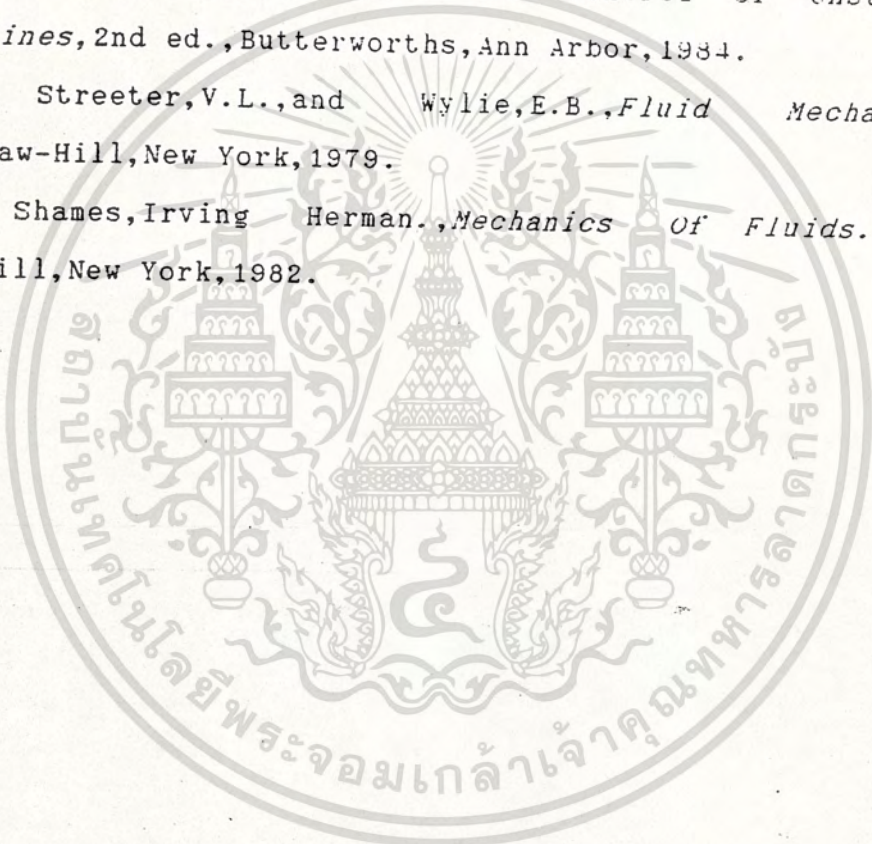


pipelenght = 122800(m.)
 pipe diameter = 0.60(m.)
 friction factor = 0.08 closure time = 10(sec)
 velocity = 1.00(m/sec),
 number of section = 14(15 nodes)
 observe node = 15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

1. Streeter, V.L., and Wylie, E.B., *Fluid Transients*, McGraw-Hill, New York, 1978.
2. Watter, G.Z., *Analysis and Control of Unsteady flow in Pipelines*, 2nd ed., Butterworths, Ann Arbor, 1984.
3. Streeter, V.L., and Wylie, E.B., *Fluid Mechanics*, 7th ed., McGraw-Hill, New York, 1979.
4. Shames, Irving Herman., *Mechanics Of Fluids.*, 2nd ed., McGraw-Hill, New York, 1982.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้