

อุปกรณ์สาริตการเกิดหัวก้อนน้ำ



นายสถิตย์ สุวรรณชนะ

นายสุนทร ใจเย็น

นายอุษา สุวรรณรัตน์

โครงการวิศวกรรมศาสตร์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

พ.ศ. 2537

หัวข้อโครงการวิศวกรรมศาสตร์
โดย

ภาควิชา
อาจารย์ที่ปรึกษา

อุปกรณ์สาริตการเกิดหัวค้อนน้ำ
นายสฤติย์ สุวรรณชนะ
นายสุนทร ใจเย็น
นายอุษา สุวรรณรัตน์
วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์สมสิทธิ์ มูลสถาน
อาจารย์เกียรติชัย รักษาชาติ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ อนุมัติให้นำโครงการ
วิศวกรรมศาสตร์ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต

SL

กณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รศ. ดร. สมบัติ ที่มทรัพย์)

คณะกรรมการสอบโครงการวิศวกรรมศาสตร์

Ap

ประธานกรรมการ

(ร.ศ. ดร. ธนู นุชฉาย)

ดร. อนุช

กรรมการ

(ผศ.ดร. ธนาคม สุนทรชัยนาคแสง)

สมสิทธิ์ มูลสถาน

กรรมการ

(อ. สมสิทธิ์ มูลสถาน)

อุปกรณ์สาริตการเกิดหัวก้อนน้ำ

ปีการศึกษา 2537

โดย

นายสถิตย์ สุวรรณชนะ

นายสุนทร ใจเย็น

นายอุษา สุวรรณรัตน์

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์สมสิทธิ์ มูลสถาน

อาจารย์เกียรติชัย รักษาชาติ

บทคัดย่อ

อุปกรณ์สาริตการเกิดหัวก้อนน้ำเป็นแบบจำลองของระบบการส่งน้ำทางท่อโดย
ใช้ปั๊มหอยโข่งขนาด 1 แรงม้า ปั๊มน้ำ ผ่านท่อเหล็กอบสังกะสี 1 x Sch 40 (STD) ที่ติด
ตั้งวาล์วปรับอัตราการไหลไว้ที่ทางออกของปั๊มและติดตั้งโซลินอยด์วาล์วไว้ที่ปลายท่อ
ทางออก เมื่อต้องการทราบปรากฏการณ์การเกิดหัวก้อนน้ำ (Water Hammer) ก็ทำการ
ปั๊มน้ำที่อัตราไหลต่าง ๆ แล้วทำการปิดโซลินอยด์วาล์วที่ปลายทางออกอย่างทันที
ทันใด จะทำให้โมเมนตัมของน้ำเปลี่ยนเป็นแรงกระแทกที่หน้าวาล์วและผนังท่อ ความ
รุนแรงของปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถดูได้จากจอออสซิลโลสโคป ซึ่งรับสัญญาณมา
จากเพรสเชอร์ทรานสดิวเซอร์ ที่ติดตั้งอยู่ด้านหน้าโซลินอยด์วาล์ว

จากการทดลองหาความรุนแรงของหัวก้อนน้ำในรูปของคลื่นความดันที่อัตรา
ไหลต่าง ๆ ทำให้ทราบว่าความรุนแรงของหัวก้อนน้ำจะเปลี่ยนแปลงตามอัตราการไหล
หรือความเร็วของน้ำที่ไหลในท่อนั้นคือ เมื่อปิดโซลินอยด์วาล์วอย่างทันทีทันใด
คลื่นความดันจะขึ้นสูงอย่างทันทีทันใดแล้วลงสลับกันไปจนกระทั่งหายไปเนื่องจาก
ความฝืดของท่อนั้นผู้จัดทำโครงงานวิศวกรรมศาสตร์ได้ทำการทดลองติดตั้งแอร์แชม
เบอร์ ขนาด 100 x 150 มิลลิเมตร กับระบบส่งน้ำทำการทดลองที่สภาวะเดียวกัน ทำ
ให้ทราบว่าความรุนแรงของหัวก้อนน้ำที่อัตราไหลต่ำกว่า 100 ลิตร/นาที แอร์แชมเบอร์
สามารถดูดคลื่นความรุนแรงไว้ได้เกือบหมด หากมีการออกแบบระบบส่งน้ำในลักษณะ
ข้างต้นจะต้องติดตั้งอุปกรณ์ที่ช่วยดูดคลื่นหัวก้อนน้ำไว้ด้วย เพื่อยืดอายุการใช้งานของ
ระบบส่งน้ำทางท่อดังกล่าว

Water Hammer Demonstrate Apparatus

Academic Year 1994

by

Mr. Satit Suwanchana

Mr. Soontorn Jaiyen

Mr. Usa Suwanrat

Project Report Advisor

Mr. Somsit Moolsathan

Mr. Kiattichai Ruksachat

ABSTRACT

The water hammer demonstrate apparatus have been devised to explain the effect of water hammer in the water supply piping system and it's remedy. The water hammer demonstrate apparatus is the model of water supply system using 1 Hp pump to supply water through 1" sch 40 (STD) with gate valve and ball valve at inlet and solenoid valve with pressure transducer at the outlet. The water is supplied to the system by the pump from mian tank and collected at the calibrated tank.

The principle operation of the apparatus is to supply water from main tank by the pump and collect at calibrate tank the experiment is carried out by various pressure using gate valve and for each pressure value the outlet is cut off by the solenoid valve and the corresponding pressure rise is noted by the use of pressure transducer and oscilloscope. From the experiment found that for each cut off at outlet there is sudden increase in the pressure in the system and reduced gradually by the friction developed between water and pipe surfaces. This is called water hammer and which is leads to damage the system if occurred repetatively.

Hence to avoid the water hammer and to prevent the system from damage the project team devised a air chamber (100 x 150 mm) before the outlet to absorb the pressure due to water hammer up to 100 liters/min.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ความสำเร็จนี้เกิดจากความช่วย
เหลือและคำแนะนำจากหลาย ๆ ฝ่าย

ขอขอบคุณ อาจารย์สมสิทธิ์ มูลสถาน อาจารย์เกียรติชัย รักษาชาติ
รศ.ดร. ธนู นุชฉาย ผศ.ดร. ธนากร สุนทรชัยนาถแสง อาจารย์สุรพล สันธวานิชย์ ที่
ควบคุมดูแลให้คำปรึกษาตลอดจนแนะนำสิ่งที่เป็นประโยชน์ในการจัดทำโครงการ
ตลอดมา

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยสยาม ที่ให้ยืมกล้องถ่ายรูปสำหรับบันทึกผลการทดลอง
และขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ พี่และน้องที่คอยสนับสนุนและให้กำลังใจตลอดมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	น
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ณ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ญ
บทที่	
1. บทนำ	1
แนวความคิดหรือสมมุติฐาน	1
วัตถุประสงค์	2
ขอบเขตของโครงการวิศวกรรมศาสตร์	2
ผลประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
2. ทฤษฎี	3
หัวข้อนี้	3
สมการคณิตศาสตร์สำหรับการไหลแบบชั่วขณะ	3
การวิเคราะห์ปัญหาของของไหลแบบชั่วขณะ	6
3. การคำนวณและการออกแบบ	12
การเลือกขนาดปั๊ม	12
การกำหนดขนาดท่อ	13
4. วิธีการทดลองและผลการทดลอง	16
การสอบเทียบเครื่องมือวัดเพรสเชอร์ทรานสดิวเซอร์	16
การทดลอง	17
ขั้นตอนการทดลอง	17

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ	26
สรุปผล	26
ข้อเสนอแนะ	27
เอกสารอ้างอิง	28
ภาคผนวก ก.	29
ภาคผนวก ข.	31
ภาคผนวก ค.	33
ภาคผนวก ง.	37
ประวัติผู้เขียน	46

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1. ตารางแสดงผลการทดลอง (ไม่มีแอร์แชมเบอร์)	23
2. ตารางแสดงผลการทดลอง (มีแอร์แชมเบอร์)	25
3. ตารางแสดงคุณสมบัติของน้ำ(SI UNIT)	30
4. ตารางแสดงคุณสมบัติของท่อเหล็กกล้าและท่อเหล็กเหนียว	32
5. ตารางคุณสมบัติของปั้มน้ำ	34

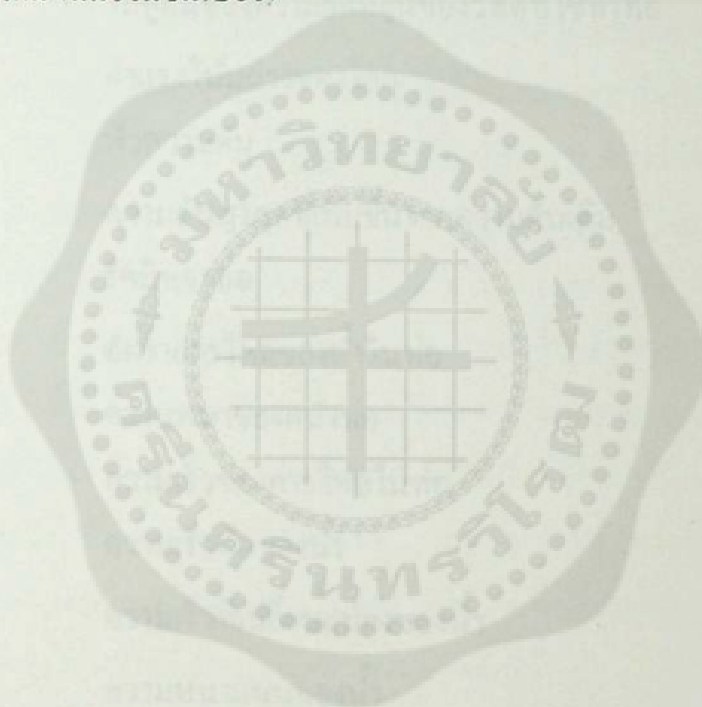


สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1. ลักษณะการเกิดความดันที่เปลี่ยนแปลง	5
2. แสดงการเกิดหัวก้อนน้ำในระบบท่อ	7
3. แสดงความเค้นตามแนวเส้นรอบวงที่กระทำกับภาชนะครึ่งทรงกระบอก	9
4. แสดงความเค้นตามแนวยาวที่กระทำกับภาชนะ ทรงกระบอก	10
5. แสดงอุปกรณ์สาธิตการเกิดหัวก้อนน้ำ	15
6. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าของ เพรสเซอร์ทรานสดิวเซอร์ รุ่น SL 635	17
7. แสดงการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่อัตราการไหล 100 ลิตร/นาที (ไม่มีแอร์แชมเบอร์)	18
8. แสดงการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่อัตราการไหล 80 ลิตร/นาที (ไม่มีแอร์แชมเบอร์)	19
9. แสดงการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่อัตราการไหล 60 ลิตร/นาที (ไม่มีแอร์แชมเบอร์)	19
10. แสดงการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่อัตราการไหล 40 ลิตร/นาที (ไม่มีแอร์แชมเบอร์)	20
11. แสดงการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่อัตราการไหล 100 ลิตร/นาที (มีแอร์แชมเบอร์)	21
12. แสดงการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่อัตราการไหล 80 ลิตร/นาที (มีแอร์แชมเบอร์)	21
13. แสดงการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่อัตราการไหล 60 ลิตร/นาที (มีแอร์แชมเบอร์)	22
14. แสดงการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่อัตราการไหล 40 ลิตร/นาที (มีแอร์แชมเบอร์)	22

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
15. แสดงความดันที่เพิ่มขึ้นจากความดันเดิมจากการทดลองและการคำนวณ	24
16. กราฟแสดง % error ที่อัตราไหลต่าง ๆ	24
17. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราไหลกับความดันที่เพิ่มขึ้นจากความดันเดิม (มีแอร์แชมเบอร์)	25



สัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
A	พื้นที่หน้าตัดของท่อ	m^2
a	คลื่นความดัน	m/s
d	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ	mm
E	โมดูลัสของความยืดหยุ่นของวัสดุที่ใช้ทำท่อ	N/m^2
g	ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก	m/s^2
H	หัวความดัน	m
P	ความดันสูงสุดที่เพิ่มขึ้นจากความดันเดิม	N/m^2
r	รัศมีของท่อ	m.
Q	อัตราการไหลของน้ำในท่อ	m^3/s
t	ความหนาของผนังท่อ	mm.
V	ความเร็วของการไหลในท่อ	m/s
V_o	ความเร็วต้นของน้ำ	m/s
ΔV	ความเร็วที่เปลี่ยนแปลงของน้ำ	m/s
ρ	ความหนาแน่นของน้ำ	kg/m^3
γ	น้ำหนักจำเพาะของน้ำ	N/m^3
σ_H	ความเค้นตามแนวโค้ง	N/m^2
σ_L	ความเค้นตามแนวยาว	N/m^2

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันระบบการส่งน้ำที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมหรือในอาคารสูงส่วนหนึ่งใช้พลังงานจากการส่งน้ำที่มีศักย์ภาพสูง ดังนั้นจึงมีการออกแบบระบบการส่งน้ำและการควบคุมการไหลในหลาย ๆ วิธีหนึ่งในวิธีนั้นคือ การใช้วาล์วควบคุมการปิด-เปิดเพื่อควบคุมปริมาณน้ำ และความดันที่ส่งไปใช้งาน ซึ่งเป็นวิธีที่ประหยัดและคุ้มค่าต่อการลงทุนมากที่สุด อย่างไรก็ตามวิธีการดังกล่าวก็ยังมีปัญหาทางด้านวิศวกรรมกล่าวคือทำให้เกิดการสั่นและเสียงดังขณะที่มีการปิด-เปิดวาล์วควบคุมในจังหวะต่าง ๆ ซึ่งอาจทำให้เกิดความเสียหายกับระบบการส่งน้ำได้ ปรากฏการณ์ดังกล่าวเราเรียกว่าการเกิดหัวค้อนน้ำ

จากการศึกษาปัญหาที่เกิดขึ้นพบว่าระบบส่งน้ำที่ใช้วาล์วควบคุมระบบการส่งน้ำหากมีการปิด-เปิดวาล์วอย่างกะทันหันโมเมนตัมของของเหลวถูกเปลี่ยนกลายเป็นการกระแทกบนประตุน้ำและผนังท่อ แรงกระแทกที่เกิดขึ้นถ้าหากมากเกินไปเกินความสามารถของท่อที่จะรับไว้ได้ก็จะทำให้ท่อหรืออุปกรณ์เสียหาย ระดับความเสียหายขึ้นอยู่กับความแข็งแรง ความยืดหยุ่นของท่อ ความเร็วของการไหล อัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วของการไหล ลักษณะการยึดท่อให้อยู่กับที่และระบบป้องกันที่ติดตั้งไว้

แนวความคิดหรือสมมติฐาน

การเกิดหัวค้อนน้ำ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์เป็นพลังงานสถิติขึ้นทันทีทันใดโดยการปิด-เปิดวาล์ว หรือปั๊มน้ำอย่างทันทีทันใดทำให้เกิดปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงความดันอย่างรุนแรง ปัจจัยที่ก่อให้เกิดหัวค้อนน้ำขึ้นอยู่กับความเร็วของการไหล ความแข็งแรง และความยืดหยุ่นของท่อซึ่งสามารถป้องกันได้โดยการติดตั้งอุปกรณ์ที่สามารถดูดกลืนพลังงานได้เช่น แอร์แชมเบอร์ (Air Chamber) เซอร์จแท็งก์ (Surge Tank) เป็นต้น

วัตถุประสงค์

1. เพื่อให้เข้าใจลักษณะการเกิดหัวก้อนน้ำ
2. เพื่อให้สามารถออกแบบระบบการเดินท่อเพื่อป้องกันการเกิดหัวก้อนน้ำได้อย่างปลอดภัย

ขอบเขตของโครงการงานวิศวกรรมศาสตร์

1. สร้างอุปกรณ์สาธิตการเกิดหัวก้อนน้ำ
2. วิเคราะห์ความดันที่เกิดขึ้นขณะที่ทำการปิดวาล์วอย่างทันทีทันใด
3. คำนวณความดันที่เพิ่มขึ้นจากความดันเดิม
4. เปรียบเทียบค่าจากการทดลองกับค่าจากทฤษฎี

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้การควบคุมการปิด-เปิด ของวาล์วควบคุมการไหลของน้ำเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัย
2. สามารถออกแบบระบบส่งน้ำด้วยวิธีนี้ได้อย่างถูกต้องและวิเคราะห์วัสดุโครงสร้างที่ใช้อยู่ในปัจจุบันว่ามีความเหมาะสมหรือไม่

บทที่ 2

ทฤษฎี

หัวค้อนน้ำ

หัวค้อนน้ำ เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากความดันในท่อที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรุนแรงและฉับพลันโดยมีความดันเพิ่มขึ้นและลดลงจากความดันเดิม (Initial pressure) ในลักษณะเป็นคลื่นขึ้นลงสลับกันไปเป็นอนุกรม

สาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดวอเตอร์แฮมเมอร์ก็คือการเปลี่ยนแปลงความเร็วของการไหลในท่ออย่างกะทันหันมีหลายลักษณะด้วยกันที่จะทำให้เกิดหัวค้อนน้ำขึ้นเช่น

1. เกิดจากการปิด-เปิด วาล์วควบคุมอัตราการไหลของของไหลอย่างทันทีทันใด
2. เกิดจากการเริ่มเดินปั๊ม
3. เกิดการสั่นสะเทือนของน้ำและอุปกรณ์ต่าง ๆ

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วของของไหลในลักษณะดังกล่าวโมเมนตัมของของไหลจะถูกเปลี่ยนไปกลายเป็นแรงกระทำที่หน้าวาล์วควบคุม และผนังของท่อ แรงกระทำที่เกิดขึ้นถ้าหากมากเกินไปความสามารถของท่อหรืออุปกรณ์จะรับไว้ได้ก็จะทำให้เกิดความเสียหายอย่างรุนแรงขึ้นได้ ระดับความเสียหายอันเนื่องมาจากวอเตอร์แฮมเมอร์ขึ้นอยู่กับความแข็งแรง ความยืดหยุ่นของท่อ ความเร็วของการไหล อัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วของการไหล ลักษณะการยึดท่อให้อยู่กับที่และระบบป้องกันหัวค้อนน้ำที่ติดตั้งไว้ เป็นต้น

สมการคณิตศาสตร์สำหรับการไหลแบบชั่วขณะ

การพิจารณาการไหลแบบชั่วขณะสามารถพิจารณาได้จากขอบเขตของของไหลโดย Wylie และ Streeter ได้ประยุกต์ใช้สมการการต่อเนื่อง (Continuity Equation) มาอธิบายการไหลภายในท่อในกรณีของการหยุดของน้ำที่ไหลภายในท่อโดยการปิดวาล์วควบคุมสมการการต่อเนื่องและโมเมนตัม (Continuity & Momentum Equation) ซึ่ง

สามารถอธิบายได้โดยการตั้งสมมุติฐานที่ไม่พิจารณาความเสียดทานและความสูญเสีย

เมื่อวาล์วปิดสนิททันทีที่น้ำที่ไหลมาด้วยความเร็ว V_0 ถูกทำให้หยุดการเปลี่ยนแปลงพลังงานจนกระทั่งเป็นพลังงานสถิตจะทำให้เกิดความดันสูงขึ้นที่ผนังวาล์วเมื่อพิจารณาการเคลื่อนตัวของน้ำเป็นชั้น ๆ จะพบว่าเมื่อชั้นที่หนึ่งหยุดลักษณะเดียวกันนี้จะถูกถ่ายทอดต่อไปยังชั้นต่อไปซึ่งในลักษณะเช่นนี้จะเกิดคลื่นความดัน (Wave Speed) ขึ้นภายในท่อ

จากรูปที่ 1 โดยการใช้สมการโมเมนตัม (Momentum Equation) อธิบายขอบเขตของการไหลของน้ำจะพบว่าคลื่นความดันจะเคลื่อนที่ไปทางซ้ายด้วยความเร็ว $a - V_0$ เนื่องจากการปิดของวาล์ว ความดันที่เปลี่ยนแปลง ΔH จะเกิดขึ้นที่วาล์ว ซึ่งจะเกิดขึ้นพร้อมกับการเปลี่ยนแปลงความเร็วของน้ำ ΔV ดังนั้นสมการสมดุลทางโมเมนตัมมีค่า

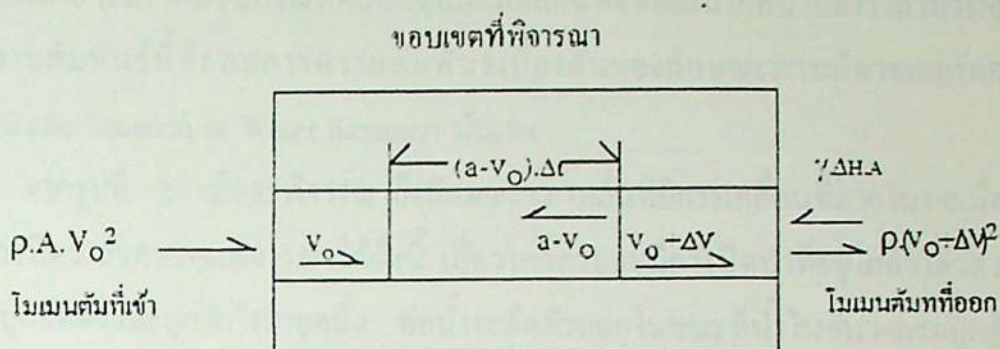
$$-\gamma \cdot \Delta H \cdot A = \rho \cdot A \cdot (a - V_0) \cdot \Delta V + \rho \cdot A \cdot (V_0 + \Delta V)^2 - \rho \cdot A \cdot V_0^2 \quad 2.1$$

โดย

- γ คือ น้ำหนักจำเพาะของน้ำ
- ρ คือ ความหนาแน่นของน้ำ
- g คือ ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก
- A คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อ
- V_0 คือ ความเร็วต้นของน้ำ
- ΔV คือ ความเร็วที่เปลี่ยนแปลงของน้ำ
- a คือ คลื่นความดันของน้ำ
- ΔH คือ ความดันที่เปลี่ยนแปลงของน้ำ

โดยมวลของน้ำ $\rho \cdot A \cdot (a - V_0)$ มีความเร็วเปลี่ยนแปลง ΔV ในเวลาหนึ่งวินาทีเมื่อไม่พิจารณาเทอมที่มีค่าน้อย (ΔV^2) สมการจะลดรูปลงเหลือ

$$\Delta H = -a \cdot \Delta V \cdot (1 + V_0/a) / g = -a \cdot \Delta V / g \quad 2.2$$



การเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมทั้งหมด

$$= [\rho A (a - v_0) / \Delta t] \Delta t (v_0 - \Delta v - v_0) = \rho A (a - v_0) \Delta v$$

รูปที่ 1. ลักษณะการเกิดความดันที่เปลี่ยนแปลง

จะพบว่าเทอม v_0/a มีค่าน้อยมาก ถ้าการไหลของน้ำหยุดทันทีอย่างสมบูรณ์ เทอม $\Delta v = -v_0$ และ $\Delta H = a v_0/g$ ดังนั้นสมการที่ 2.2 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของความเร็วน้ำที่วาล์วควบคุมจะมีผลทำให้ความดันมีค่าลดลง ดังนั้นถ้าวาล์วอยู่ที่ปลายท่อและมีการปิด สมการจะอยู่ในรูป

$$\Sigma \Delta H = -a \cdot \Sigma \Delta v/g \quad 2.3$$

ซึ่งใช้ได้กับการเคลื่อนที่ของวาล์ว ตลอดทั้งการเคลื่อนที่ของคลื่นความดันจากวาล์วควบคุมไปยังต้นน้ำ และในทิศทางกลับกันของคลื่นความดันจากต้นน้ำกลับไปยังวาล์วควบคุม ดังนั้น เมื่อพิจารณาวาล์วอยู่ต้นทางบ้างสมการจะมีรูปเหมือนกันแต่เครื่องหมายต่างกัน ซึ่งสรุปแล้วสมการสำหรับการอธิบายการเคลื่อนที่ตลอดทั้งความยาวท่อจะอยู่ในรูป

$$\Sigma \Delta H = \pm a \cdot \Sigma \Delta v/g \quad 2.4$$

ซึ่งอธิบายการเปลี่ยนแปลงของอัตราการไหลเทียบกับความดันที่เกิดขึ้นภายในท่อน้ำ เครื่องหมาย"ลบ"เกิดขึ้นกรณีที่คลื่นความดันเคลื่อนที่จากวาล์วควบคุมไปยังต้นน้ำ

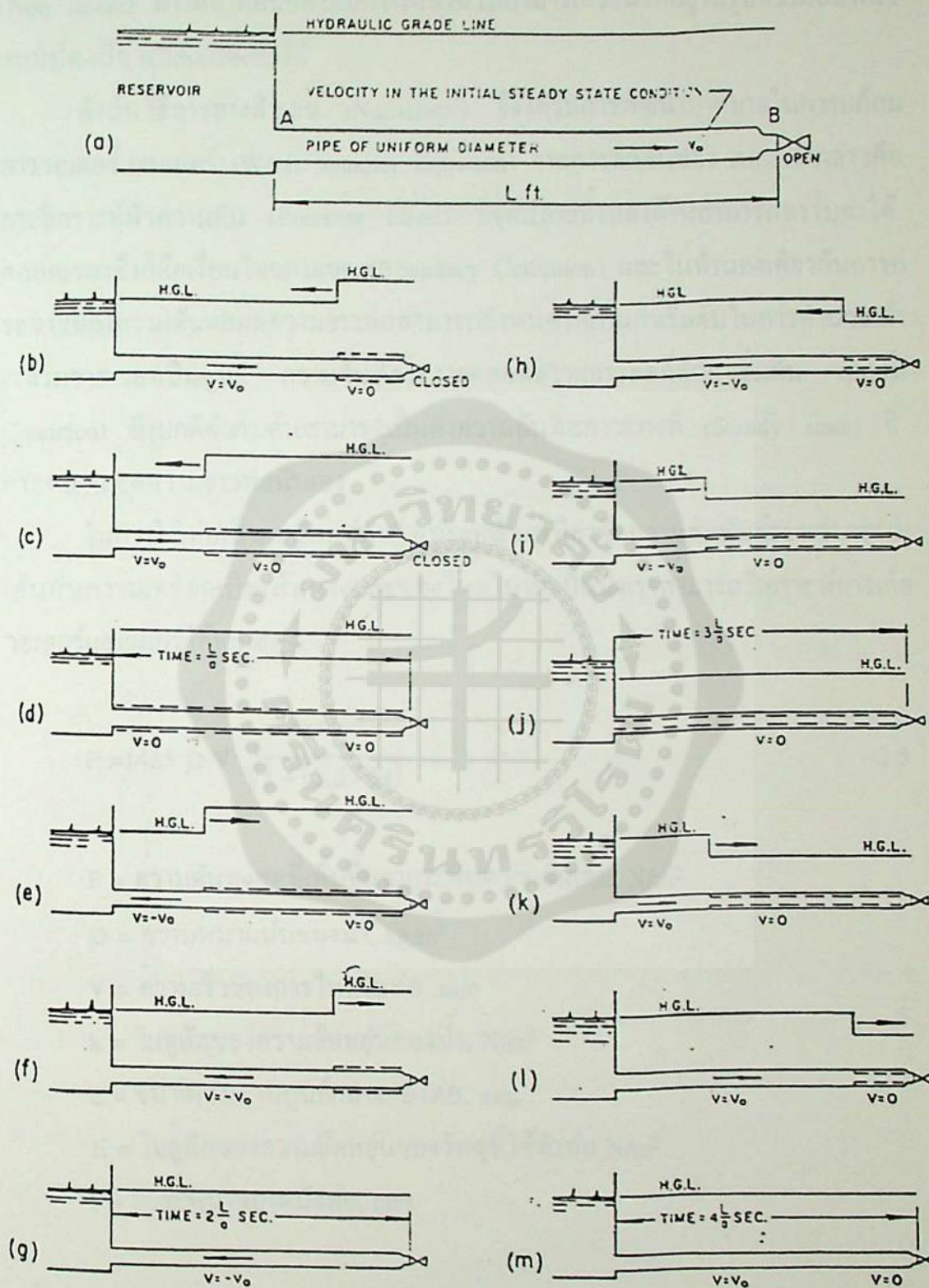
เครื่องหมาย"บวก"เกิดขึ้นกรณีที่คลื่นความดันเคลื่อนที่จากต้นน้ำกลับไปยังวาล์วควบคุม ซึ่งความสัมพันธ์นี้คือสมการความสัมพันธ์เบื้องต้นของลักษณะการเกิดวอเตอร์แฮมเมอร์ (Basic Equation of Water hammer) นั่นเอง

จากรูปที่ 2 เมื่อจะพิจารณาถึงลักษณะของคลื่นที่มีการเคลื่อนที่ภายในท่อเนื่องจากการปิดวาล์วควบคุมพิจารณาได้ดังนี้ เมื่อวาล์วควบคุมมีการปิดน้ำที่อยู่ใกล้วาล์วควบคุมจะถูกอัดตัวและถูกทำให้หยุดนิ่ง ท่อน้ำจะยืดตัวออกในขณะที่น้ำในชั้นวงแรกถูกอัดตัว กระบวนการอัดตัวนี้จะกระทำต่อเนื่องไปยังชั้นต่าง ๆ ต่อไป น้ำจากต้นน้ำจะมีการเคลื่อนตัวไปเรื่อย ๆ โดยไม่ลดความเร็วจนกระทั่งการเคลื่อนที่ของน้ำที่เคลื่อนตัวไปนี้จะถูกดันกลับด้วยความดันสูงที่คลื่นความดันเคลื่อนที่ไปยังต้นน้ำโดยจะทำให้หน้าที่ไหลด้วยความเร็วต้นหยุด ในขณะที่คลื่นความดันเคลื่อนที่ผ่านและเกิดการอัดตัวเป็นผลให้ท่อน้ำมีการขยายตัวโดยคลื่นความดันนี้จะเคลื่อนที่ไปจนถึงทางเริ่มต้นของน้ำในเวลา $2L/a$ วินาที น้ำทั้งหมดที่อยู่ภายในท่อจะตกอยู่ภายใต้ความดัน P (ขนาดเดียวกับที่วาล์วควบคุม) โมเมนตัมของน้ำจะสูญเสียหมดและพลังงานจลน์จะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานยืดหยุ่น (Elastic Energy) จากนั้นจะเกิดสภาพไม่สมดุลขึ้นที่ต้นน้ำเมื่อคลื่นความดันเคลื่อนที่มาถึงถ้าพิจารณาว่าต้นน้ำมีความดันคงที่ตลอด น้ำจะเริ่มเคลื่อนที่กลับไปในท่อ โดยเริ่มจากต้นน้ำและทำให้ผนังท่อกลับคืนสู่สภาพเดิมดังนั้นระหว่างที่คลื่นความดันเคลื่อนที่กลับน้ำในท่อจะมีความเร็วสมบูรณ์ V_0 ในทิศทางไปยังต้นน้ำกระบวนการนี้จะเปลี่ยนลักษณะการเคลื่อนที่ของน้ำในช่วงเวลา $2L/a$ วินาที เมื่อคลื่นความดันเคลื่อนที่มาถึงวาล์วควบคุมที่ปิดอีกครั้งความดันของน้ำในท่อจะกลับสู่สภาพเดิมแต่ทิศทางของความเร็วน้ำจะกลับทางกัน

กระบวนการนี้จะเกิดขึ้นซ้ำ ๆ กันในช่วงระยะเวลาหนึ่งและความเสียหายที่เกิดขึ้นภายในท่อจะทำให้ น้ำกลับมามีความเสียหายในที่สุด

การวิเคราะห์ปัญหาของของไหลแบบชั่วขณะ

วิธีต่าง ๆ ที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์การไหลของของไหลที่ไหลไม่คงที่ภายในท่อเริ่มจากสมการพื้นฐานได้แก่สมการการเคลื่อนที่ (Equation of Motion) สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation) จากสมการพื้นฐานดังกล่าวมีทอมที่ไม่เป็นเชิงเส้น



รูปที่ 2. แสดงการเกิดหัวค้อนน้ำในระบบท่อ

(Non linear) ทำให้คำตอบของสมการเหล่านี้ไม่สามารถเขียนให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์แบบปิด-เปิด (Close-Form) ได้

ดังนั้นวิธีการทางตัวเลข (Numerical) จึงได้รับการพัฒนามากมายในการแก้สมการวอเตอร์แฮมเมอร์ (Water hammer Equation) จากการคิดค้นของ Allievi กล่าวคือการวิเคราะห์หัวความดัน (Pressure Head) ที่จุดปลายทั้งสองด้านสามารถทราบค่าได้ตลอดเวลาซึ่งก็คือเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) และในทำนองเดียวกันการกระจายของความดันตลอดความยาวท่อสามารถกำหนดให้เป็นค่าเริ่มต้นในการคำนวณถ้าเราเริ่มจากเวลาเป็นศูนย์ ความดันที่กระจายตลอดความยาวท่อก็คือค่าเริ่มต้น (Initial Condition) ซึ่งปกติค่าเริ่มต้นสามารถเป็นค่าความดันที่สภาวะคงที่ (Steady state) ที่กระจายตลอดความยาวท่อนั่นเอง

ในกรณีที่ท่อเป็นเหล็กหล่อหรือท่อเหล็กเหนียวซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดเป็นเส้นตรงและของไหลในท่อเป็นน้ำเราสามารถวิเคราะห์การเกิดวอเตอร์แฮมเมอร์ได้จากสูตร

$$P = 1485 \rho V \sqrt{\frac{1}{1 + (Kd / Et)}} \quad 2.5$$

P = ความดันสูงสุดที่เพิ่มขึ้นจากระดับความดันเดิม, N/m^2

ρ = ความหนาแน่นของน้ำ, kg/m^3

V = ความเร็วของการไหลในท่อ, m/s

k = โมดูลัสของความยืดหยุ่นของน้ำ, N/m^2

d = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ, mm .

E = โมดูลัสของความยืดหยุ่นของวัสดุที่ใช้ทำท่อ N/m^2

t = ความหนาของผนังท่อ, mm .

คลื่นความดัน (Pressure Wave)

คลื่นความดัน (Pressure Wave) มีหน่วยเป็นเมตร/วินาที ที่เกิดขึ้นภายในท่อนำนวนโดยสูตร

$$a = 1485 \sqrt{\frac{1}{1 + (Kd / Et)}} \quad 2.6$$

เวลาสะท้อนกลับ (Reflection time)

เวลาสะท้อนกลับ (Reflection time) มีหน่วยเป็นวินาที คำนวณโดยสูตร

$$\text{Reflection time} = \frac{2L}{a} \quad 2.7$$

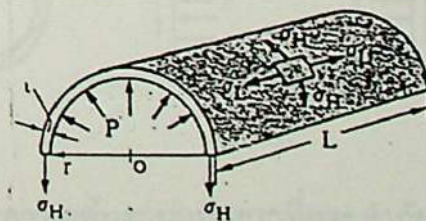
ภาวะอัดความดัน

รูปทรงกระบอกผนังบาง หมายถึงรูปทรงกระบอกกลวงที่มีความหนาของผนังน้อยมากเมื่อเทียบกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยทั่วไปโครงสร้างของงานประเภทนี้ ได้แก่ หม้อต้มน้ำขนาดใหญ่ ถังขนาดใหญ่ ท่อส่งน้ำ ท่อส่งน้ำมัน และถังแก๊ส เป็นต้น

ในการพิจารณาความเค้นที่เกิดขึ้นในรูปทรงกระบอกกลวงนั้น จะมีความเค้นเกิดขึ้นใน 2 แนวด้วยกันคือ

1. ความเค้นตามแนวเส้นรอบวง (hoop or circumferential stress)
2. ความเค้นตามแนวยาว (longitudinal stress)

ความเค้นตามแนวเส้นรอบวง ภาวะอัดความดันรูปทรงกระบอกเมื่อได้รับความดัน ความดันนี้จะทำให้เกิดความเค้นขึ้นในเนื้อวัสดุที่ใช้ทำภาชนะนั้น และเมื่อความเค้นที่เกิดขึ้นมีปริมาณมากสุดจนวัสดุนั้นไม่สามารถจะรับได้จะทำให้ภาชนะนั้นเกิดการเสียหาย ซึ่งจะมีผลกระทบต่อทรัพย์สินและสิ่งมีชีวิตได้ ฉะนั้นในการออกแบบใช้ภาชนะอัดความดันนั้นจึงเป็นสิ่งที่จะต้องพิจารณา ในการหาความเค้นนี้สามารถหาได้โดยการพิจารณาการสมดุลของครึ่งทรงกระบอกดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 แสดงความเค้นตามแนวเส้นรอบวงที่กระทำกับภาชนะครึ่งทรงกระบอก

- ถ้าให้
- t คือความหนาของผนัง
 - r คือรัศมีเฉลี่ยของทรงกระบอกกลวง
 - σ_H คือความเค้นตามแนวเส้นรอบวง
 - P คือความดันที่เกิดขึ้นในภาชนะอัดความดัน
 - L คือความยาวของทรงกระบอกกลวง

แรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากความดันภายใน = ความดัน $\times$ พื้นที่รับความดัน

$$F = P \times 2rL \quad 2.8$$

แรงต้านที่เกิดขึ้นเนื่องจากความเค้นตามแนวเส้นรอบวง

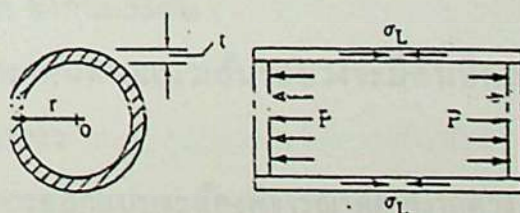
$$F = 2\sigma_H \times Lt \quad 2.9$$

ถ้าภาชนะยังคงรูปเดิมอยู่ได้ แรงที่เกิดขึ้นจะต้องเท่ากัน สมการ 2.8 = 2.9

$$\begin{aligned} P \times 2rL &= 2\sigma_H \times Lt \\ \therefore \sigma_H &= \frac{2PrL}{2Lt} \\ &= \frac{Pr}{t} \end{aligned}$$

$$\therefore \sigma_H = \frac{Pr}{t} \quad \text{หรือ} \quad \sigma_H = \frac{PD}{2t}$$

ความเค้นตามแนวยาว ในการหาความเค้นตามแนวยาว เราจะพิจารณาภาชนะทรงกระบอกกลวงผนังบางดังรูปที่ 4



รูปที่ 4. แสดงความเค้นตามแนวยาวที่กระทำกับภาชนะทรงกระบอก

ถ้าให้	σ_c	คือความเค้นตามแนวยาว
	P	คือความดันภายในทรงกระบอกกลวง
	r	คือรัศมีเฉลี่ยของทรงกระบอกกลวง
	t	คือความหนาของผนัง

แรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากความดันภายใน = ความดัน $\times$ พื้นที่รับความดัน

$$F = P \times \pi \times r^2 \quad 2.10$$

แรงต้านที่เกิดขึ้นเนื่องจากความเค้นตามแนวยาว

$$F = \sigma_c \times 2 \pi r t \quad 2.11$$

ภาชนะยังทรงรูปเดิมอยู่ได้ แรงที่เกิดขึ้นจะต้องเท่ากัน สมการ 2.10 = 2.11

$$P \times \pi r^2 = \sigma_c \times 2 \pi r t$$

$$\sigma_c = \frac{P \times \pi r^2}{2 \pi r t} = \frac{Pr}{2t}$$

$$\therefore \sigma_c = \frac{Pr}{2t} \quad \text{หรือ} \quad \sigma_c = \frac{PD}{4t}$$

- หมายเหตุ
1. แรงที่กระทำตามแนวความยาว จะทำให้ความเค้นตามแนวยาว (σ_c) เป็นแรงที่ทำให้กระบอกกลวงขาดตามเส้นรอบวงนั้น
 2. แรงที่ทำให้เกิดตามแนวเส้นรอบวงนั้นจะทำให้ความเค้นตามแนวเส้นรอบวงเป็นแรงที่ทำให้กระบอกกลวงขาดตามแนวความยาว
 3. ความเค้นตามแนวยาว และความเค้นตามแนวเส้นรอบวงกระทำตักฉาก ซึ่งกันและกัน
 4. ความเค้นตามแนวเส้นรอบวงจะมีค่าเป็นสองเท่าของความเค้นตามแนวยาว
 5. ในการออกแบบจะต้องพิจารณาคิขนาดต่าง ๆ จากความเค้นตามแนวเส้นรอบวง
 6. ถ้ามีตะเข็บจะต้องใช้ตะเข็บตามแนวยาว เพราะมีความแข็งแรงมากกว่าแนวอื่น

บทที่ 3

การคำนวณและการออกแบบ

การคำนวณและการออกแบบ

อุปกรณ์สาริตการเกิดหัวค้อนน้ำได้ทำการออกแบบตามรูปที่ 5 เพื่อทำการทดลองแสดงให้เห็นถึงการเกิดปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงของความดันที่กระทำต่อระบบเมื่อมีการปิดวาล์วควบคุมอย่างทันทีทันใด และเพื่อให้ง่ายต่อการสร้างและการจัดหาวัสดุที่มีอยู่ในท้องตลาดทั่วไป ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์สำคัญต่าง ๆ ดังนี้

1. ปั๊มหอยโข่งขนาด 1 แรงม้า 220 Volt / AC
2. ท่อเหล็กอบสังกะสี 1 x sch 40 (STD)
3. ถังวัดอัตราการไหล (Calibrate tank) ขนาด 400 x 400 x 600 มิลลิเมตร
4. ถังน้ำ (Water Tank) ขนาด 600 x 600 x 600 มิลลิเมตร
5. โซลินอยด์วาล์ว
6. ออสซิลโลสโคป
7. บอลวาล์ว
8. เกตวาล์ว
9. แอร์แชมเบอร์

การเลือกขนาดของปั๊ม สำหรับอุปกรณ์สาริตการเกิดหัวค้อนน้ำ จะกำหนดใช้ปั๊มหอยโข่งขนาด 1 แรงม้า 220 Volt / AC ซึ่งเป็นปั๊มที่มีขายอยู่ในท้องตลาดทั่วไป

ปริมาตรของน้ำที่อยู่ในระบบของอุปกรณ์สาริตการเกิดหัวค้อนน้ำ

ตามรูปที่ 5 จะให้ความยาวของท่อทั้งหมดโดยคิดตั้งแต่ทางออกของปั๊มไปจนถึงวาล์วปิด-เปิดที่ปลายท่อจะให้ความยาวทั้งหมดเท่ากับ 26 เมตรทำให้สามารถประมาณปริมาตรของน้ำที่อยู่ภายในระบบทั้งหมดได้จาก

$$V = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \times L$$

เมื่อ

V = ปริมาตรน้ำในระบบทั้งหมด

d = เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ

L = ความยาวท่อทั้งหมด

แทนค่าจะได้

$$\begin{aligned} V &= \frac{\pi \cdot (0.02664)^2}{4} \times 26 \\ &= 0.0145 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

จากการที่เราทราบปริมาตรน้ำที่อยู่ในระบบทั้งหมดทำให้เราสามารถกำหนดขนาดของถังพักน้ำได้ ซึ่งในที่นี้จะใช้ถังพักน้ำไม่น้อยกว่า 5 เท่า ของน้ำในระบบทั้งหมดในระบบคือ $0.0145 \times 5 = 0.0725 \text{ m}^3$ จึงเลือกใช้ถังขนาด $600 \times 600 \times 600$ มิลลิเมตร ซึ่งบรรจุน้ำไว้มีความลึกประมาณ 400 มิลลิเมตร ก็จะได้ปริมาตรที่บรรจุในถังจริงเท่ากับ $0.60 \times 0.60 \times 0.40 = 0.144 \text{ m}^3$

การกำหนดขนาดของท่อ

จากการเลือกขนาดของปั๊มทำให้เราทราบอัตราการไหลสูงสุด ถ้าเราเปิดวาล์วควบคุมจนสุดจะทำให้ได้อัตราการไหลสูงสุดภายในระบบทั้งหมดถ้าหากไม่คิดความสูญเสียเนื่องจากความเสียดหรือข้อต่อต่าง ๆ ก็จะได้อัตราการไหลสูงสุดภายในระบบได้เท่ากับ 100 ลิตร/นาที่ ดังนั้นเราสามารถหาความเร็วสูงสุดของน้ำที่ไหลภายในท่อได้จาก

$$Q = V \times A$$

Q คือ อัตราการไหลสูงสุดของระบบ

A คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อ

V คือ ความเร็วสูงสุดของน้ำที่ไหลภายในระบบ

แทนค่าจะได้

$$V = \frac{Q}{A}$$

$$V = \frac{0.100}{0.0005574}$$

$$= 179.40 \text{ m/min}$$

$$= 2.99 \text{ m/sec}$$

เมื่อทราบความเร็วสูงสุดของน้ำที่ไหลในระบบก็สามารถหาความดันสูงสุดที่เกิดขึ้นจากความดันเดิมเมื่อมีการบีบควาล้อย่างทันทีทันใดได้จากสมการที่ 2.5

$$P = 1485 \rho V \sqrt{\frac{1}{1+(Kd/Et)}}$$

ρ คือ ความหนาแน่นของน้ำ : 1000 kg/m^3

K คือ โมดูลัสของความยืดหยุ่นของน้ำ : $2.22 \times 10^9 \text{ N/m}^2$

E คือ โมดูลัสของความยืดหยุ่นของวัสดุที่ใช้ทำท่อ : $2.0 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$

d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ ; 0.02664 m

t คือ ความหนาของท่อ ; $3.38 \times 10^{-3} \text{ m}$

แทนค่า

$$P = 1485 \times 1000 \times 2.99 \sqrt{\frac{1}{1+[(2.22 \times 10^9 \times 0.02664)/(2.0 \times 10^{11} \times 3.38 \times 10^{-3})]}}$$

$$= 4.25 \text{ Mpa}$$

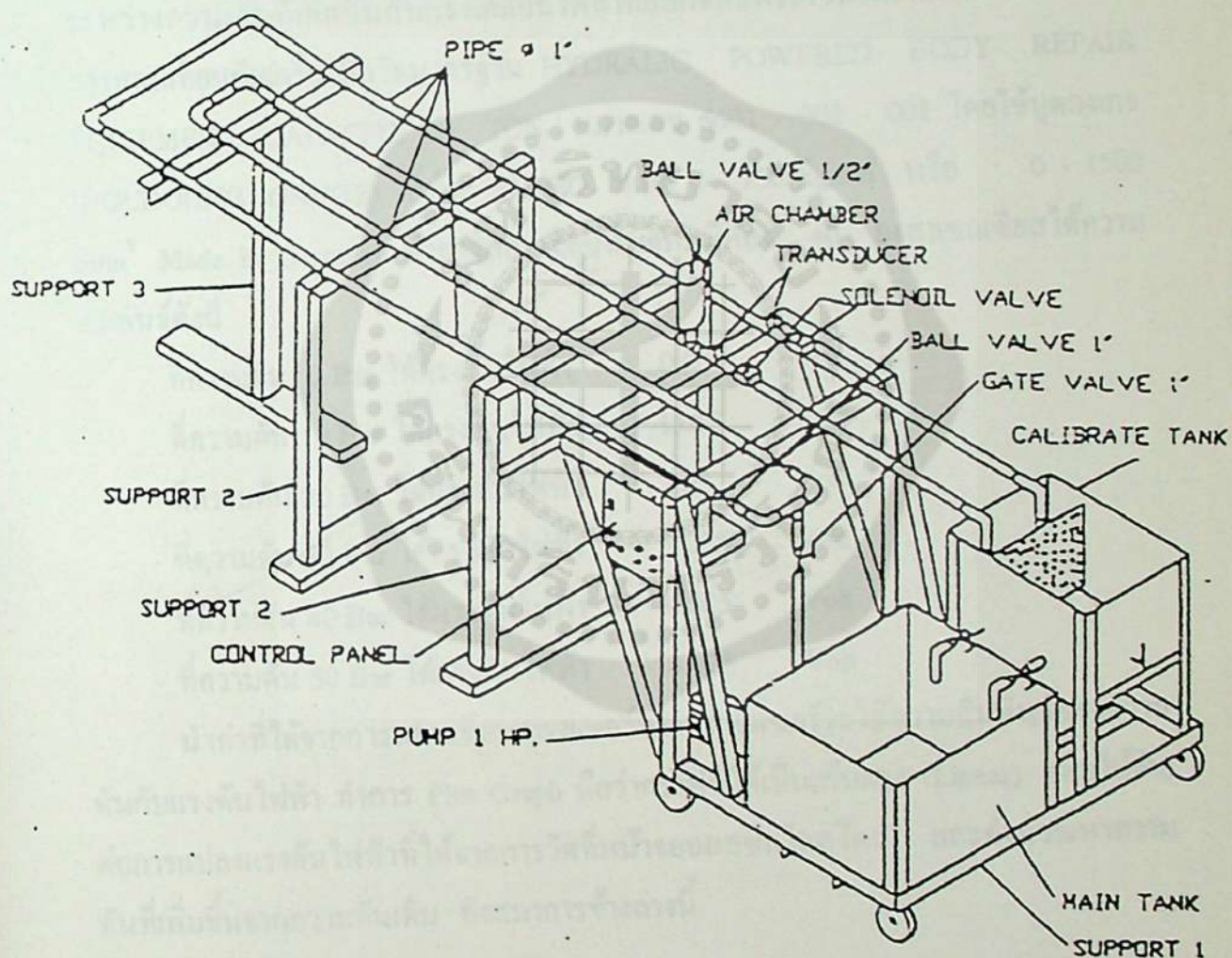
$\therefore$ ความดันที่เพิ่มขึ้นจากความดันเดิมคือ $4.25 \text{ Mpa} = 42.5 \text{ bar}$

เมื่อท่อได้รับความดันจะทำให้เกิดความเค้นขึ้นภายในท่อความดันนั้น 2 กรณี คือความเค้นในแนวยาว และความเค้นในแนวเส้นรอบวงจากสมการความเค้นทั้งสอง ถ้าเราพิจารณาจะเห็นว่าความเค้นที่เกิดขึ้นมากที่สุดที่จะทำให้ท่อเกิดความเสียหายจะเกิดขึ้นตามแนวโค้งดังนั้นในการออกแบบท่อของอุปกรณ์สาริตการเกิดหัวก้อนน้ำจึงกำหนดเฉพาะความเค้นตามแนวโค้ง

$$\therefore \sigma_H = \frac{4.25 \times 10^6 \times 0.02664}{2 \times 3.38 \times 10^{-3}}$$

$$= 16.74 \text{ MPa}$$

จากตารางภาคผนวก ข. สามารถเลือกท่อ 1 x sch 40 (STD) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 26.64 มิลลิเมตร ความหนา 3.38 ซึ่งสามารถรับความเค้นได้สูงสุด 41 MPa ซึ่งสามารถใช้ได้อย่างปลอดภัย



รูปที่ 5. แสดงอุปกรณ์สาริตการเกิดหัวก้อนน้ำ

บทที่ 4

วิธีการทดลองและผลการทดลอง

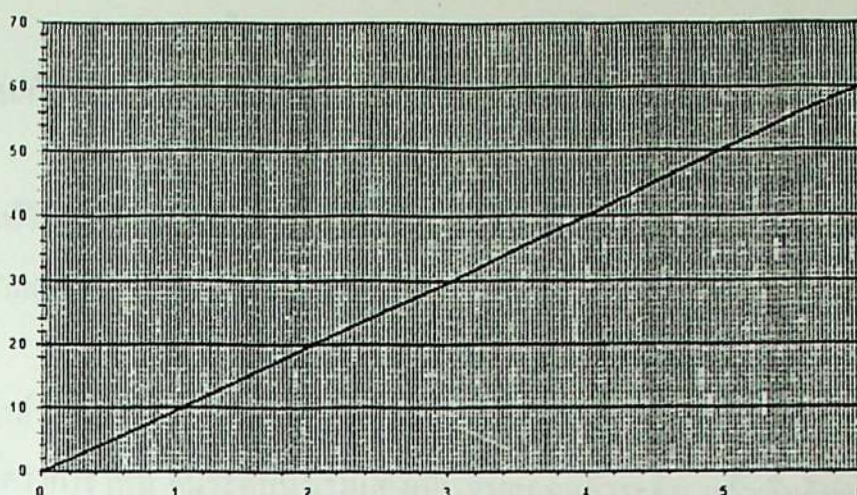
การสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงดันเพรสเซอร์ทรานสดิวเซอร์

การสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงดันเพรสเซอร์ทรานสดิวเซอร์ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันที่เกิดขึ้นกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ออกจากเพรสเซอร์ทรานสดิวเซอร์โดยทำการสอบเทียบกับเครื่องมือวัดมาตรฐาน HYDRALIC POWERED BODY REPAIR EQUIPMENT CAPACITY 4 TON หมายเลข 6601 - 002 - 001 โดยใช้บูดองเกจ (BOUDOUNG GAUGE) ยี่ห้อ EMPEO สเกล 0 - 100 kg/cm² หรือ 0 - 1500 lb/in² Made in Germany ทำการสอบเทียบที่อุณหภูมิห้อง 40 องศาเซลเซียสได้ความสัมพันธ์ดังนี้

ที่ความดัน 0 Bar ได้แรงดันไฟฟ้า	0.00	Volt
ที่ความดัน 10 Bar ได้แรงดันไฟฟ้า	1.05	Volt
ที่ความดัน 20 Bar ได้แรงดันไฟฟ้า	2.03	Volt
ที่ความดัน 30 Bar ได้แรงดันไฟฟ้า	3.035	Volt
ที่ความดัน 40 Bar ได้แรงดันไฟฟ้า	4.005	Volt
ที่ความดัน 50 Bar ได้แรงดันไฟฟ้า	4.975	Volt

นำค่าที่ได้จากการสอบเทียบเพรสเซอร์ทรานสดิวเซอร์จะหาความสัมพันธ์ของความดันกับแรงดันไฟฟ้า ทำการ Plot Graph ถือว่ากราฟที่ได้เป็นเส้นตรง (Linear) เพื่อให้ง่ายต่อการแปลงแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการวัดที่หน้าจอออสซิลโลสโคป และคำนวณหาความดันที่เพิ่มขึ้นจากความดันเดิม ดังสมการข้างล่างนี้

$$\text{ความดันที่เพิ่มขึ้นจากความดันเดิม} = \text{แรงเคลื่อนไฟฟ้า (Volt)} \times 10 \text{ bar / Volt} \quad 4.1$$



รูปที่ 6. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเพรสเซอร์ทรานสดิวเซอร์ รุ่น SL 635

การทดลอง

การทดลองหาค่าความดันที่เพิ่มขึ้นจากความดันเดิมจากอุปกรณ์สาธิตการเกิดหัวค้อนน้ำหาค่าตอบของความดันที่เพิ่มขึ้นจากความดันเดิม โดยใช้เครื่องมือวัดความดันเพรสเซอร์ทรานสดิวเซอร์ ทำการประมวลผลส่งสัญญาณผ่านออสซิลโลสโคป ที่ให้สัญญาณออกในรูปของแรงดันไฟฟ้าแล้วนำแรงดันไฟฟ้า จำนวนเป็นความดันที่เพิ่มขึ้นจากความดันเดิมโดยทำการทดลองที่อัตราการไหลต่าง ๆ ดังนี้

1. การทดลองที่อัตราการไหล 100 ลิตร/นาที
2. การทดลองที่อัตราการไหล 80 ลิตร/นาที
3. การทดลองที่อัตราการไหล 60 ลิตร/นาที
4. การทดลองที่อัตราการไหล 40 ลิตร/นาที

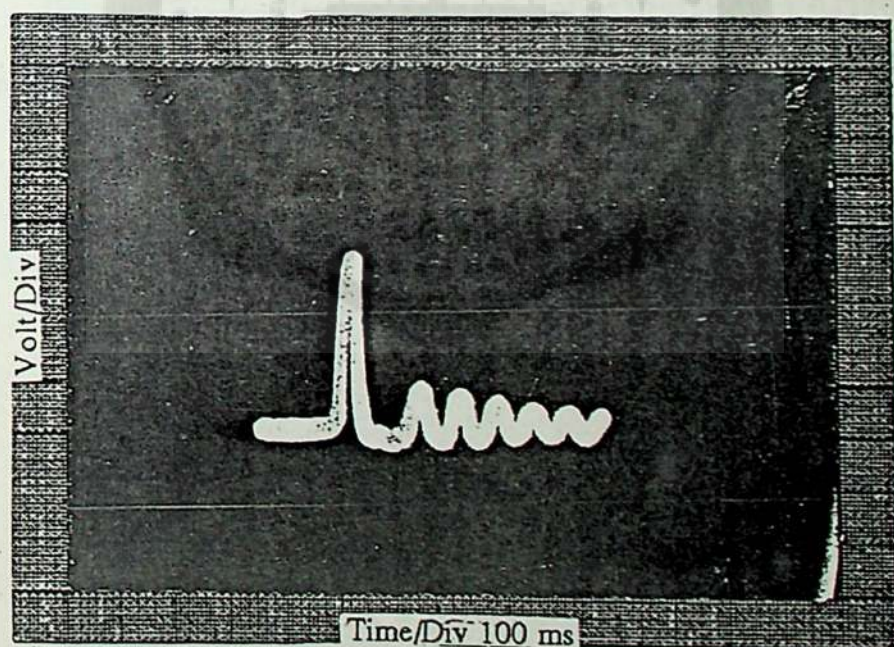
ขั้นตอนการทดลอง

1. เติมน้ำในถังพักให้ได้ระดับพอประมาณ
2. ปรับ เพาเวอร์ซัพพลาย (Power Supply) ที่ 12 Volt / DC ต่อขั้วบวกเข้ากับขั้ว 3 และขั้วลบต่อเข้ากับขั้ว 0 ของเพรสเซอร์ทรานสดิวเซอร์

3. ต่อสายสัญญาณ (Signal) ของออสซิลโลสโคป ต่อเข้ากับขั้ว 1 และกราวด์ ต่อกับขั้ว 0 ของ เพรสเซอร์ทรานสดิวเซอร์ หรือดูจากภาคผนวก ก.

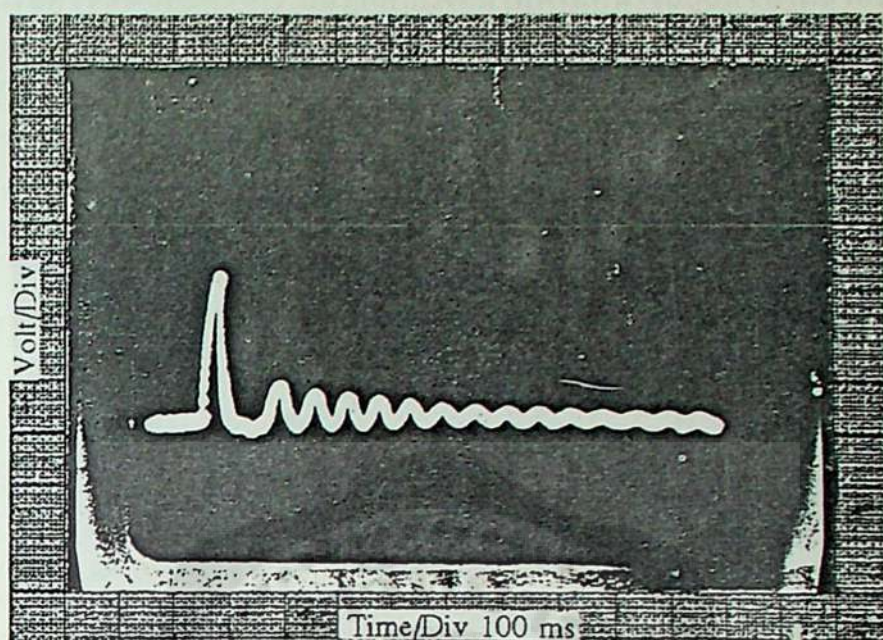
4. ปรับความสว่าง (Intensive) และ ความคม (Focus) ของออสซิลโลสโคป ให้ได้เส้นที่คมชัดที่สุด ปรับปุ่ม Volt / DIV ไปยังตำแหน่ง 1 Volt / DIV และปุ่ม Time/DIV ยังตำแหน่ง 100 ms

5. เปิดวาล์วปรับอัตราการไหล และเปิดโซลินอยด์วาล์ว I (โซลินอยด์ วาล์ว ปกติปิด) ทำการเปิดสวิตช์เดินปั๊มวัดอัตราการไหลโดยปล่อยให้ น้ำไหลลงถึงวัด อัตราการไหล จนระดับน้ำเริ่มมองเห็นที่หลอดแก้วระดับ แล้วเริ่มจับเวลาจนระดับน้ำได้ ตามที่ต้องการ นับเวลาที่ได้เปิดวาล์วปล่อยน้ำลงถึงพักคำนวณความเร็วของการไหล จากนั้นปล่อยให้ น้ำไหลในระบบสภาวะหนึ่งทำการปิดโซลินอยด์วาล์ว บันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าด้วยกล้องถ่ายรูปที่มีความไวสูงจากหน้าจอออสซิลโลสโคป ซึ่งจากผลการทดลองจะได้ดังรูป

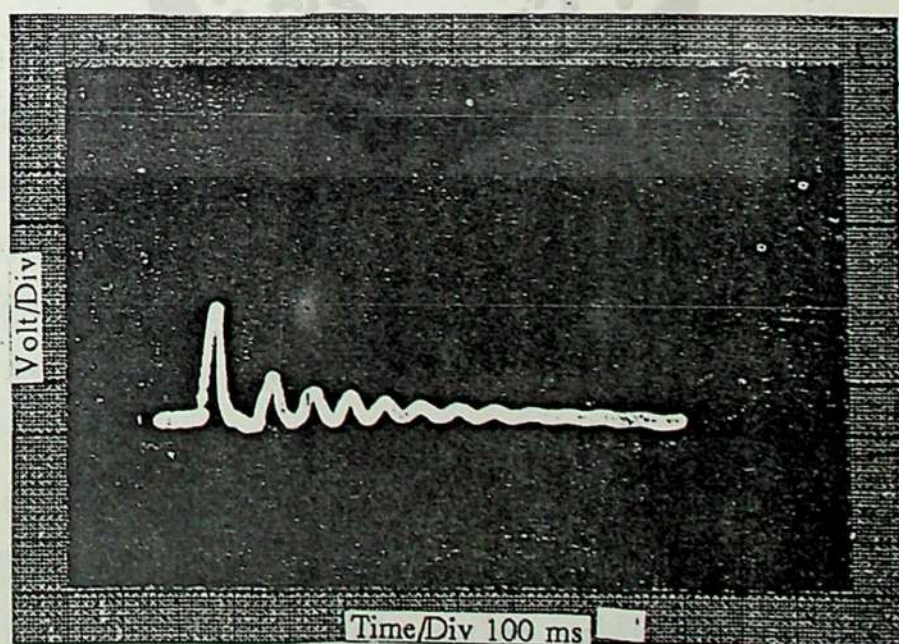


รูปที่ 7. แสดงการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าที่อัตราการไหล 100 ลิตร/นาทึ

-กระทำการเช่นเดียวกับข้างต้นแต่เปลี่ยนอัตราการไหลโดยการเปิดวาล์วที่อัตราไหล 80 ลิตร/นาทึ แล้วโซลินอยด์วาล์ว บันทึกค่าจากจอ ออสซิลโลสโคป จะได้ผลดังรูป

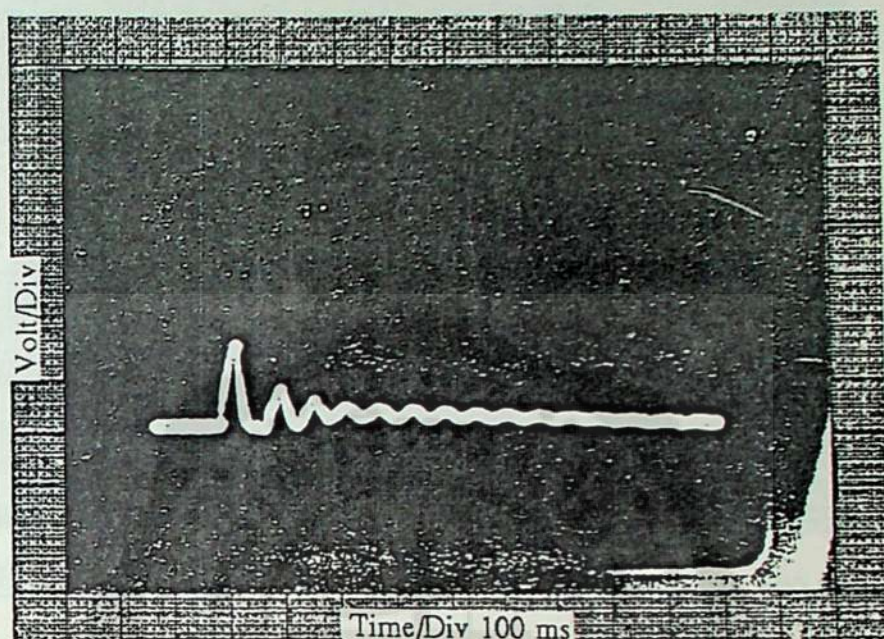


รูปที่ 8. แสดงการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าที่อัตราการไหล 80 ลิตร/นาที
 - การทดลองที่อัตราการไหล 60 ลิตร/นาที วัดอัตราการไหลจาก ถังวัดอัตราการไหล ทำการปิดโซลินอยด์แล้ว บันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าที่หน้าจอสวิตช์ไดโอดโกปจะได
 ดังรูป



รูปที่ 9. แสดงการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าที่อัตราการไหล 60 ลิตร/นาที

- การทดลองที่อัตราการไหล 40 ลิตร/นาที่ วัดอัตราการไหลจากถังวัดอัตราการไหล ทำการปิดโซลินอยด์วาล์ว บันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าที่หน้าจอออสซิลโลสโคปได้ผลดังรูป



รูปที่ 10. แสดงการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าที่อัตราการไหล 40 ลิตร/นาที่

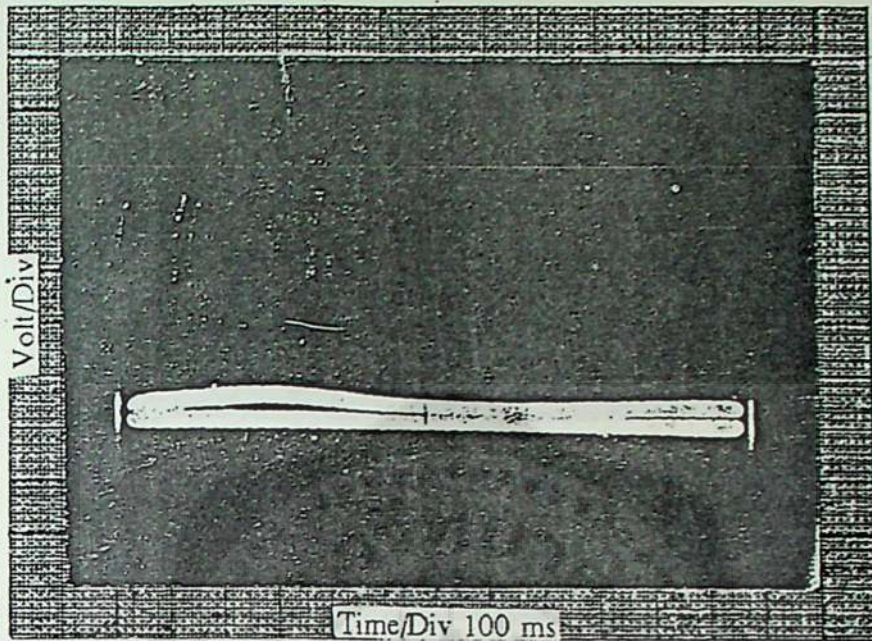
การทดลองโดยใช้แอร์แชมเบอร์ขนาด 100 x 150 มิลลิเมตร

การทดลองการเกิดหัวก้อนน้ำกับอุปกรณ์สาริตการเกิดหัวก้อนน้ำโดยติดตั้งอุปกรณ์ป้องกัน แอร์แชมเบอร์ ขนาด 100 x 150 มิลลิเมตร จำนวน 1 ตัว ที่ด้านหน้าของวาล์วควบคุม การทดลองจะทำการทดลองในสภาวะเดียวกันกับระบบที่ไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกัน โดยการแบ่งการปรับอัตราการไหลที่ต่าง ๆ กัน คือ 100 , 80, 60, และ 40 ลิตร/นาที่ ตามลำดับเช่นกัน

ขั้นตอนการทดลอง

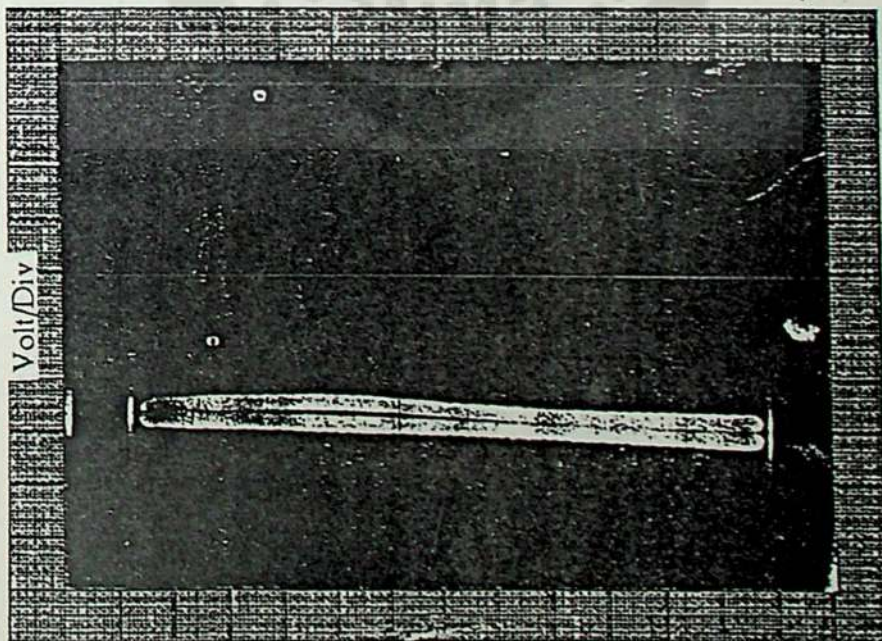
- เปิดวาล์วปรับอัตราการไหล เปิด โซลินอยด์วาล์ว II ปิด บอลวาล์ว I เปิด บอลวาล์ว II ป้อนน้ำปล่อยน้ำลงถังวัดอัตราการไหล จนได้ระดับหนึ่งเริ่มจับเวลาจนได้ระดับที่ต้องการนับเวลาที่ได้ เปิดวาล์วให้น้ำลงถังพักคำนวณหาความเร็วของการไหล

จากนั้นปล่อยให้หลอดในกระบอกสั่นหนึ่งทำการปิดสนิทนอยด์วาล์วบนที่ทำการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าจากจอยอสซิลโลสโคป จะได้ผลดังรูป



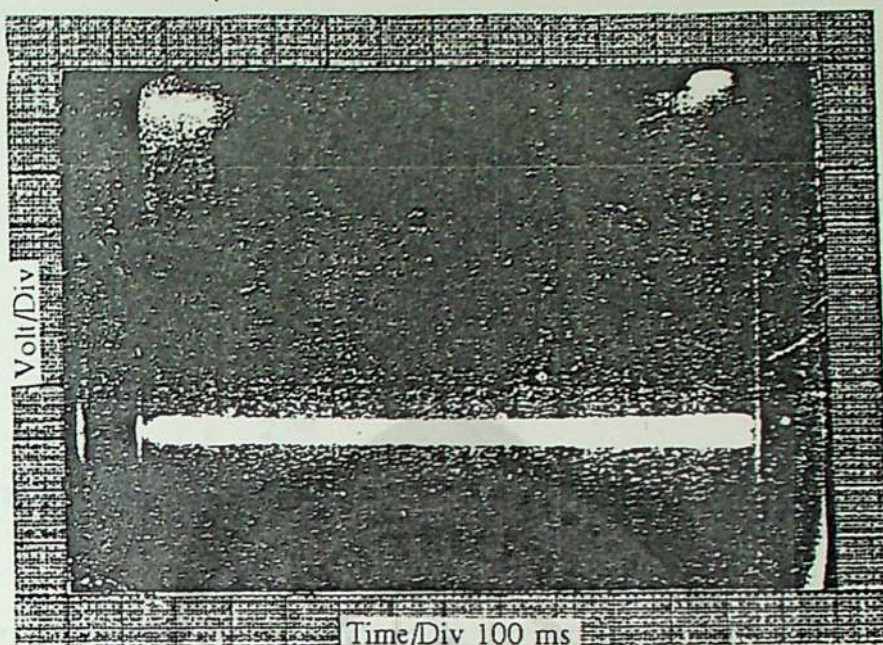
รูปที่ 11. แสดงการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าอัตราการไหล 100 ลิตร/นาที

- เปิดวาล์วปรับอัตราการไหลที่ 80 ลิตร/นาที ทำการปิดโซลินอยด์วาล์ว II บนที่ทำการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าจากจอยอสซิลโลสโคป ได้ผลดังรูป ..



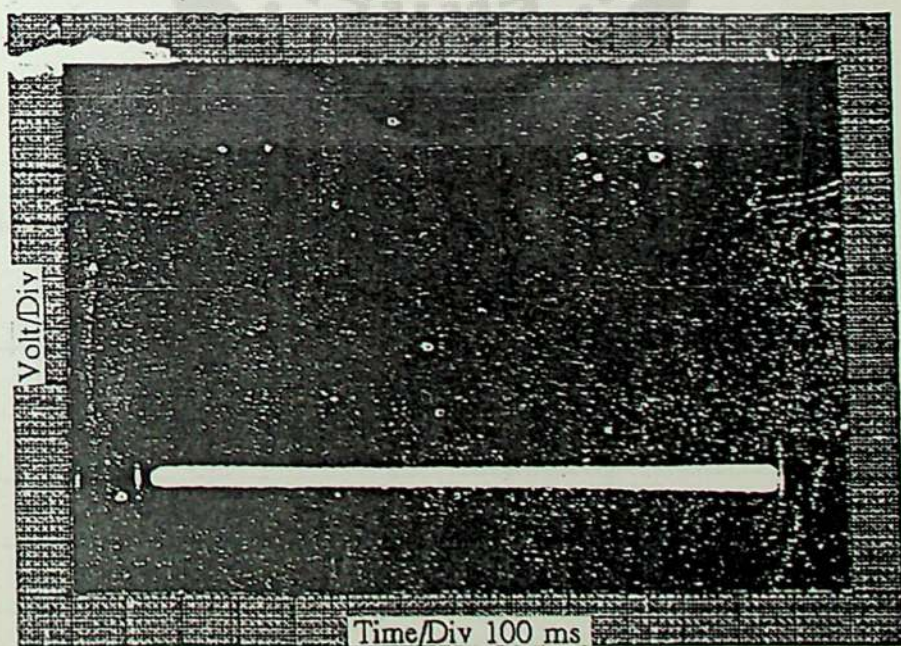
รูปที่ 12. แสดงการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าที่อัตราการไหล 80 ลิตร/นาที

- เปิดวาล์วปรับอัตราการไหลที่ 60 ลิตร/นาที ทำการปิดโซลินอยด์วาล์ว II บันทึกผลการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าจากจอยอสซิลโลสโคป ได้ผลดังรูป



รูปที่ 13. แสดงการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าที่อัตราการไหล 60 ลิตร/นาที

- เปิดวาล์วปรับอัตราการไหลที่ 40 ลิตร/นาทีทำการปิดโซลินอยด์วาล์ว II บันทึกการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าจากจอยอสซิลโลสโคป ได้ผลดังรูป



รูปที่ 14. แสดงการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าที่อัตราการไหล 40 ลิตร/นาที

การคำนวณตามทฤษฎี สามารถคำนวณได้จากสมการ 2.5

$$P = 1485 \rho v \sqrt{\frac{1}{1+(Kd/Et)}}$$

จากผลการทดลองที่อัตราการไหลเท่ากับ 100 ลิตร/นาที สามารถหาความเร็วได้จาก

$$\begin{aligned} Q &= V.A \\ \therefore V &= \frac{0.10}{557.4 \times 10^{-6} \times 60} \\ &= 2.99 \quad \text{m/sec} \end{aligned}$$

แทนค่าในสมการข้างต้นจะได้

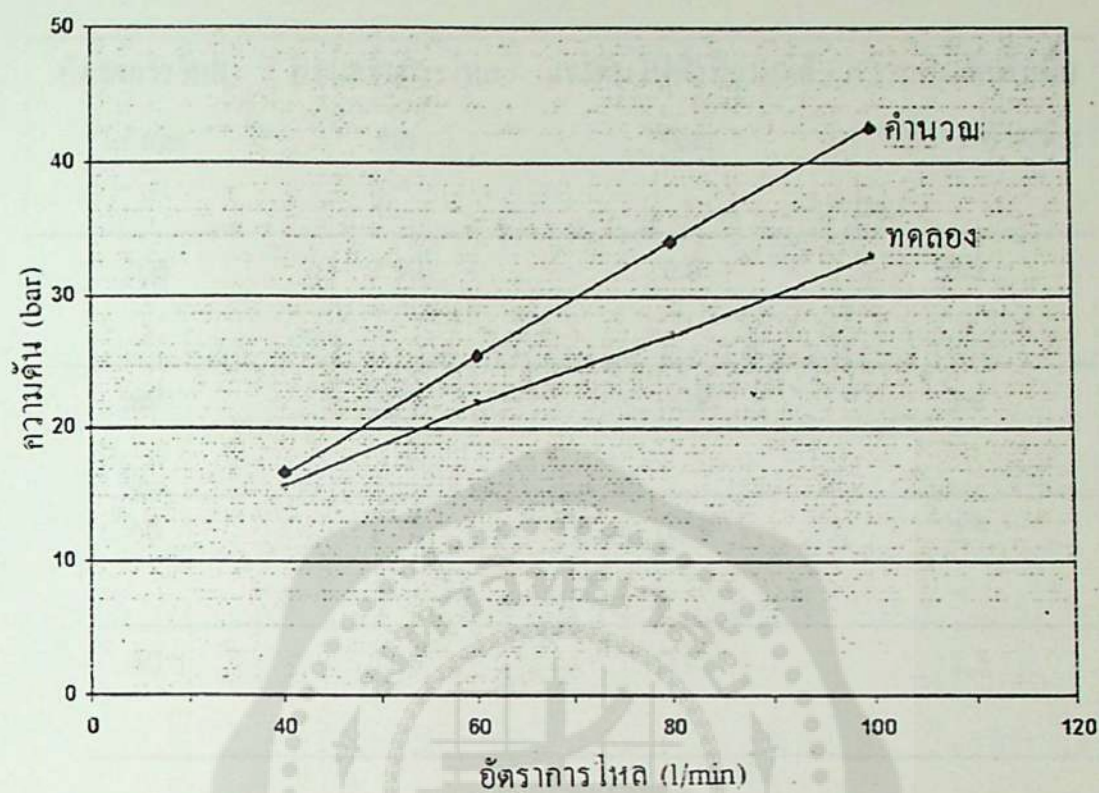
$$\begin{aligned} P &= 1485 \times 1000 \times 2.99 \sqrt{\frac{1}{1+[2.22 \times 10^9 \times 0.02664 / 2.0 \times 10^{11} \times 3.38 \times 10^{-3}]}} \\ &= 4.25 \text{ Mpa} = 42.5 \text{ bar} \end{aligned}$$

และที่อัตราการไหลต่าง ๆ กับสามารถคำนวณได้ดังตารางแสดงผลการทดลอง

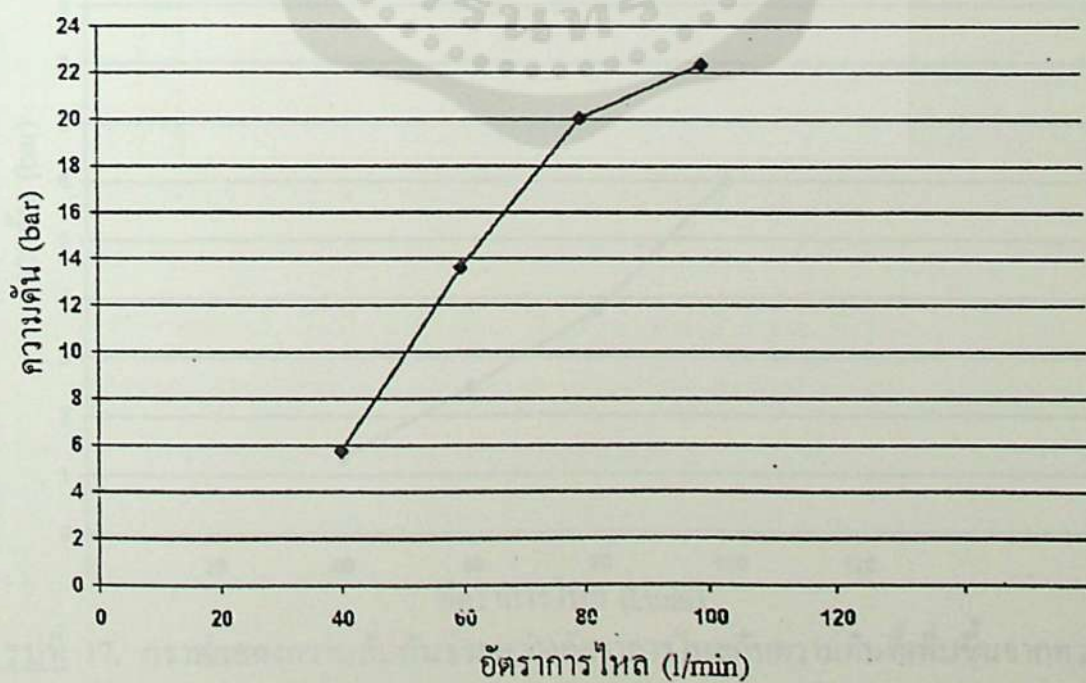
ตารางที่ 1. แสดงผลการทดลอง(ไม่มีแอร์แชมเบอร์)

อัตราการไหล l / min	ความเร็วการ ไหล m/s	แรงดันไฟฟ้าที่ อ่านได้ Volt	ความดันที่เพิ่มขึ้น จากความดันเดิม bar	ความดันจากการ คำนวณ bar	% error
100	2.99	3.30	33.00	42.50	22.35
80	2.39	2.71	27.10	34.03	20.03
60	1.79	2.0	20.00	25.48	13.65
40	1.19	1.57	15.70	16.66	5.76

นำค่าจากผลการทดลองมาเขียนกราฟจะได้ดังนี้



รูปที่ 15. แสดงความดันที่เพิ่มขึ้นจากความดันเดิมจากการทดลองและการคำนวณ

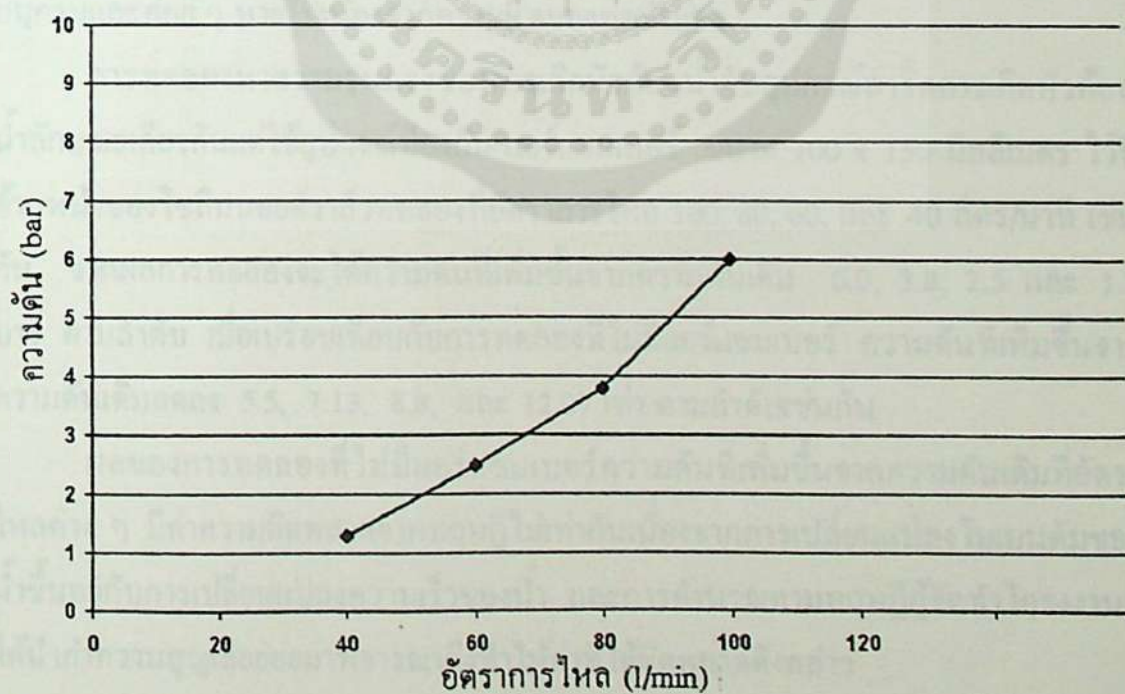


รูปที่ 16. กราฟแสดง % error ที่อัตราไหลต่าง ๆ

ตารางที่ 2. แสดงผลการทดลอง (มีแอร์แชมเบอร์)

อัตราการไหล l / min	ความเร็วการไหล m/s	แรงดันไฟฟ้าที่อ่านได้ Volt	ความดันที่เพิ่มขึ้น จากความดันเดิม (bar)
100	2.99	0.6	6.0
80	2.39	0.38	3.8
60	1.79	0.25	2.5
40	1.19	0.13	1.3

นำค่าจากตารางเขียนกราฟจะได้



รูปที่ 17. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับความดันที่เพิ่มขึ้นจากความดันเดิม (มีแอร์แชมเบอร์)

บทที่ 5

สรุปผล และข้อเสนอแนะ

สรุปผล

การทดลองหาความรุนแรงของการเกิดหัวค้อนน้ำจากอุปกรณ์สาริตการเกิดหัวค้อนน้ำ พบว่าผลการทดลองที่ได้จากการทดลองที่อัตราไหลของน้ำ 100, 80, 60, และ 40 ลิตร/นาที่ ได้ค่าความดันที่เพิ่มขึ้นจากความดันเดิม 33.0, 27.10, 22.00, และ 15.70 บาร์ ตามลำดับ ดังตารางแสดงผลการทดลองทำให้ทราบว่าความดันที่เพิ่มขึ้นจากความดันเดิมเป็นฟังก์ชันของอัตราไหลหรือความเร็วของการไหล คือ อัตราการไหลมาก เมื่อทำการปิดวาล์วอย่างทันทีทันใด ทำให้ความดันที่เพิ่มขึ้นจากความดันเดิมมาก การเปลี่ยนแปลงความดันที่เกิดขึ้นดังกล่าว เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมของน้ำ เป็นพลังงานสถิตอย่างทันทีทันใด ซึ่งคลื่นความดันที่เกิดขึ้นถ้าพิจารณาจากรูปที่ถ่ายจากผลการทดลองออกซิลโลสโคป จะเห็นว่าคลื่นความดันจะเกิดขึ้นในลักษณะขึ้น - ลง สลับกันไปเป็นอนุกรมและค่อย ๆ หายไปเนื่องจากความฝืดของท่อนั่นเอง

การทดลองหาความรุนแรงของการเกิดหัวค้อนน้ำกับอุปกรณ์สาริตการเกิดหัวค้อนน้ำลักษณะเดียวกันแต่ใช้อุปกรณ์ป้องกัน แอร์แชมเบอร์ ขนาด 100 x 150 มิลลิเมตร ไว้ที่ด้านหน้าของโซลินอยด์วาล์วทดลองที่อัตราการไหล 100, 80, 60, และ 40 ลิตร/นาที่ เช่นกัน จากผลการทดลองจะได้ความดันที่เพิ่มขึ้นจากความดันเดิม 6.0, 3.8, 2.5 และ 1.3 บาร์ ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ไม่มีแอร์แชมเบอร์ ความดันที่เพิ่มขึ้นจากความดันเดิมลดลง 5.5, 7.13, 8.8, และ 12.07 เท่า ตามลำดับเช่นกัน

ผลของการทดลองที่ไม่มีแอร์แชมเบอร์ความดันที่เพิ่มขึ้นจากความดันเดิมที่อัตราไหลต่าง ๆ มีค่าความผิดพลาดจากทฤษฎีไม่เท่ากันเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมของน้ำขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงความเร็วของน้ำ และการคำนวณตามทฤษฎีผู้จัดทำโครงการไม่ได้นำค่าความสูญเสียย่อยมาพิจารณาจึงทำให้ค่าที่ได้ผิดพลาดดังกล่าว

ข้อเสนอแนะ

1. การทดลองอุปกรณ์สาธิตการเกิดหวัค้อนน้ำควรกระทำซ้ำ ๆ กันหลาย ๆ ครั้งเพื่อให้ผลการทดลองที่ได้แม่นยำ เนื่องจากความดันที่เพิ่มขึ้นจากความดันเดิมเกิดขึ้นในระยะเวลาที่สั้นมาก
2. การขนส่งน้ำที่ใช้ระบบท่อ และใช้วาล์วควบคุม หากมีการปิด-เปิด ไม่ควรกระทำอย่างรวดเร็ว มิฉะนั้นทำให้เกิดความดันสูง อันเนื่องมาจากหวัค้อนน้ำ และจะก่อให้เกิดความเสียหายต่อระบบส่งน้ำได้
3. หากมีการออกแบบระบบส่งน้ำทางท่อควรจะมีอุปกรณ์ป้องกันที่สามารถกระทำได้ง่าย คือ แอร์แชมเบอร์ ติดตั้งตามจุดต่าง ๆ เพื่อช่วย ดูดกลืน กลืนความดันที่เกิดขึ้น
4. ควรทำการศึกษาผลของหวัค้อนน้ำ โดยทฤษฎีอื่นๆ ภายใต้งैื่อนใจของอุปกรณ์สาธิตการเกิดหวัค้อนน้ำเดียวกัน โดยการใช้เวลาในการปิด-เปิดวาล์วควบคุมที่เวลาต่าง ๆ กัน มาเปรียบเทียบกันหรือการทดลองใช้อุปกรณ์ดูดกลืน ขนาดต่าง ๆ กันมาเปรียบเทียบกัน
5. การคำนวณความดันที่เพิ่มขึ้นจากความดันเดิมควรนำค่าความสูญเสียย่อยมาพิจารณาด้วยเพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

1. รศ. ดร.วิบูลย์ บุญยธโรกุล ปั๊มและระบบสูบน้ำ กรุงเทพมหานคร, 2529.
2. ดร.วรวิทย์ อึ้งภากรณ์, ดร.พินัย สุขวรรณ กลศาสตร์วัสดุ กรุงเทพมหานคร, 2528.
3. Allievi, L. The Theory of water hammer. English Translation by E.Halmos. NEW YORK ; ASCE, 1925.
4. Lay, K.S. "Water Hammer Analysis" School of Engineering Report No.330 University of Auckland Private Bag Auckland New Zealand : February, 1984.
(อัดสำเนา)
5. Wylie, Benjamine., Streeter, Victor. Fluid Transients New York : McGraw - Hill Book Co., Inc, 1987.

ตารางคุณสมบัติของน้ำ (ต่อ)

Temp	Specific Weight	Density	Viscosity	Surface Tension	Vapor Pressure	Vapor Density	Thermal Conductivity
°C	kg/m ³	g/cm ³	poise	dyne/cm	mm Hg	kg/m ³	W/m°C
°F	lb/ft ³	g/cm ³	cp	dyn/cm	mm Hg	lb/ft ³	Btu/ft ² °F
0	999.8	0.9998	0.01792	75.6	0.00611	0.0006	0.562
10	999.7	0.9997	0.01734	74.2	0.01227	0.0012	0.561
20	998.2	0.9982	0.01702	72.7	0.02339	0.0023	0.561
30	995.7	0.9957	0.01695	71.2	0.04246	0.0042	0.561
40	992.2	0.9922	0.01682	69.6	0.07593	0.0076	0.561
50	988.0	0.9880	0.01672	67.9	0.1235	0.0123	0.561
60	982.9	0.9829	0.01664	66.1	0.2011	0.0201	0.561
70	977.0	0.9770	0.01658	64.2	0.3176	0.0318	0.561
80	970.3	0.9703	0.01654	62.2	0.4741	0.0474	0.561
90	962.9	0.9629	0.01652	60.1	0.6754	0.0675	0.561
100	954.7	0.9547	0.01652	57.9	1.013	0.1013	0.561

ภาคผนวก ก
คุณสมบัติของน้ำ

ตารางแสดงคุณสมบัติของน้ำ (SI Unit)

Tem- pera- ture °C	specific Weight γ kN/m ³	Density ρ kg/m ³	Viscosity $\mu \times 10^3$ m ² /s	Kinema- tic Viscosi- ty $\nu \times 10^6$ m ² /s	Surface tension σ N/m	Vapor pressure p_v kN/m ² ; abs	Vapor pressure head p_v/γ m	Bulk modulus of elasticity $K \times 10^5$ kN/m ²
0	9.805	999.8	1.784	1.788	0.0766	0.61	0.06	2.02
5	9.807	1000.0	1.518	1.519	0.0749	0.87	0.09	2.06
10	9.804	999.7	1.307	1.306	0.0742	1.23	0.12	2.10
15	9.798	999.1	1.139	1.139	0.0735	1.70	0.17	2.15
20	9.789	998.2	1.002	1.003	0.0728	2.34	0.25	2.18
25	9.777	997.0	0.890	0.893	0.0720	3.17	0.33	2.22
30	9.764	995.7	0.798	0.800	0.0712	4.24	0.44	2.25
40	9.760	992.2	0.653	0.658	0.0696	7.38	0.76	2.28
50	9.689	988.0	0.547	0.553	0.0679	12.33	1.26	2.29
60	9.642	983.2	0.466	0.474	0.0662	19.92	2.03	2.28
70	9.589	972.8	0.404	0.413	0.0644	31.16	30.20	2.25
80	9.530	971.8	0.354	0.364	0.0626	47.34	4.96	2.20
90	9.466	965.3	0.315	0.326	0.0608	70.10	7.18	2.14
100	9.399	958.4	0.282	0.294	0.0589	101.33	10.33	2.07

ตารางแสดงคุณสมบัติของท่อเหล็กกล้าและเหล็กหล่อเหนียว

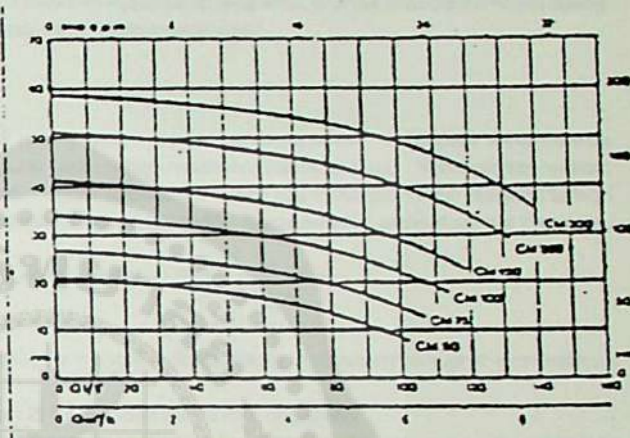
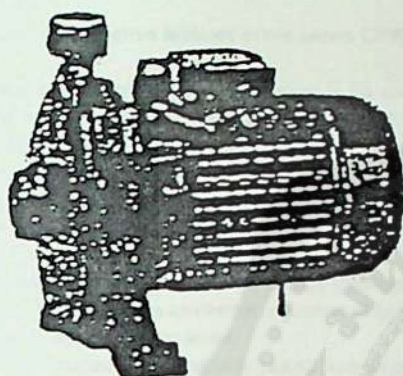
Pipe Size Inch	Outside diameter		Schedule	Wall thickness		Internal diameter		Flow area	
	In	mm.		In	mm	ft	mm	ft ²	mm ²
1/8	0.405	10.29	40 (STD)	0.068	1.73	0.02242	6.83	0.0003947	36.64
			80 (XS)	0.095	2.41	0.01792	5.47	0.0002522	23.50
1/4	0.540	13.72	40 (STD)	0.088	2.24	0.03033	9.24	0.0007227	67.06
			80 (XS)	0.119	3.02	0.02517	7.68	0.0004974	46.32
3/8	0.675	17.14	40 (STD)	0.091	2.31	0.04103	12.52	0.001326	123.3
			80 (XS)	0.126	3.20	0.03525	10.74	0.0009759	90.59
1/2	0.840	21.34	40 (STD)	0.109	2.77	0.05183	15.80	0.002110	196.1
			80 (XS)	0.147	3.74	0.04550	13.86	0.001626	150.8
			160	0.188	4.78	0.03867	11.78	0.001174	109.0
			(XYS)	0.294	7.47	0.02100	6.40	0.0003464	32.17
3/4	1.050	26.67	40 (STD)	0.113	2.87	0.06867	20.93	0.003703	344.1
			80 (XS)	0.154	3.92	0.06183	18.83	0.003003	278.5
			160	0.219	5.56	0.05100	15.55	0.002043	189.8
			(XYS)	0.308	7.82	0.03617	11.03	0.001027	95.55
1	1.315	33.40	40 (STD)	0.133	3.38	0.08742	26.64	0.006002	557.4
			80 (XS)	0.179	4.55	0.07975	24.30	0.004995	508.3
			160	0.250	6.35	0.06792	20.70	0.003623	336.5
			(XYS)	0.358	9.09	0.04992	15.22	0.001957	181.5
1 1/4	1.660	42.16	40 (STD)	0.140	3.56	0.1150	35.04	0.01039	964.3
			80 (XS)	0.191	4.85	0.1065	32.46	0.008908	827.5
			160	0.250	6.35	0.09667	29.46	0.007339	681.6
			(XYS)	0.382	9.70	0.07467	22.76	0.004379	406.9



ภาคผนวก ค

รายละเอียดอุปกรณ์ที่สำคัญ

OX:



Electropompe centrifughe 1 girante
Centrifugal electric pumps 1 impeller

Electropompes centrifuges 1 turbine
Kreisel-Elektropumpen 1 Laufrad

TIPO - TYPE		HP CV PS	Imp	AMPERE			Q - Portada - debit - capacity - Fördermenge										
Monophase Monophasic Singlephase Einsphasig	Triphase Triphasic Three-phase Dreiphasig			Monophase Monophasic Singlephase Einsphasig	Triphase Triphasic Three-phase Dreiphasig	Overphase	m³/h	0.6	1.2	1.8	2.7	3.6	4.5	5.4	6.3	7.2	8.4
220 V - 50 Hz	220/380 V - 50 Hz			220 V	220-V	380-V	1"	10	20	30	45	60	75	90	105	120	140
Pressions: manometrica, testa in m. c.a. Pression: manométrica, teste em m. c.a. Test: head in meters w.c. Förderhöhe in m.																	
OCM 50	OCM 50	0.5	0.37	3.4	1.8	1.0	20.5	20	19	17.5	16	14	11				
OCM 75	OCM 75	0.8	0.58	4.4	2.6	1.5	26.5	26	25	23.5	22	20	17.5	14			
OCM 100	OCM 100	1.0	0.74	6.0	4.5	2.6	33	32.5	31.5	30.5	29.5	27.5	25	21			
OCM 150	OCM 150	1.5	1.1	9.5	6.0	3.5	40.5	40	39	38	37	34.5	31	27.5			
	OCM 200	2.2	1.65		7.0	4.0	50.5	50	49	47.5	46	44.5	42	39	34		
	OCM 300	3.0	2.2		9.2	5.3	58.5	58	57	56	55	54	51	48	44	44	35

• for the industry • for the research

10 ÷ 1400 bar fs

EUROPE

APPLICATIONS AND CONSTRUCTIVE FEATURES

The pressure transducers of the Series LP 630 are used for static and dynamic, positive and negative (= vacuum) measurements in industrial applications, oleodynamics, for general or laboratory uses, wherever high accuracy, performance, mechanical ruggedness and reliability are requested.

The operating principle is based on the linear pressure deformation of a diaphragm and the consequent unbalance of a strain gauge bridge with 4 active arms. The strain gauges are of metal layer type and not semiconductor type, in order to ensure a high accuracy and insensitivity to thermal changes.

The measuring diaphragm is located inside the transducer, as suitable for industrial applications, to avoid possible damages during installation or use caused by fluid abrasion or undue overpressures or overtemperatures.

Some of constructive features of the series LP 630

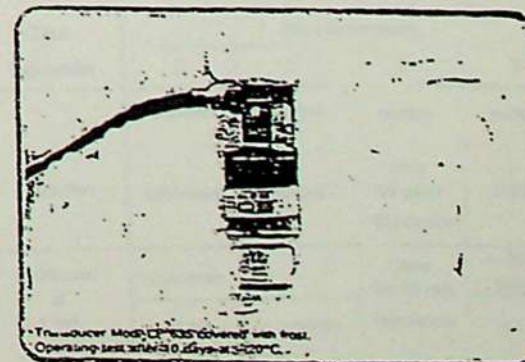
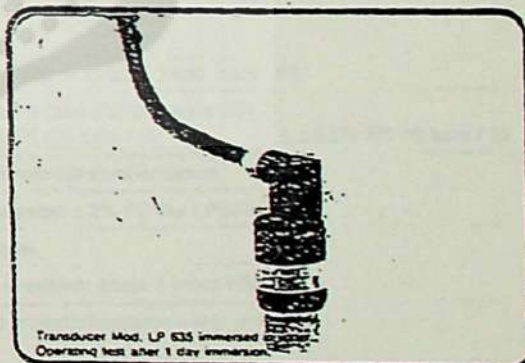
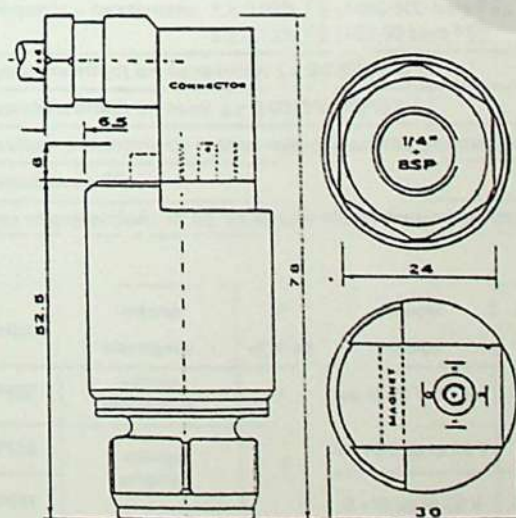
Electrical connection: by connector, sealed IP 65, complete of sealing rubber gasket and locking screw. Calibration: switchable by internal reed contact and external proximity magnet. Transducer body: in high resistance stainless steel. Hydraulic connection: 1/4" BSP (G1/4") for screw threads cylindrical or sealing conic. Upper enclosure in Doryl (Du Pont) glass filled, resistant to high temperatures and to chemical attacks. Dust tight and protected against water jets: IP 65. Same sizes for all the models of the series.

Some supplementary features for the amplified models: LP635 - LP631 - LP634

- All these models have an internal voltage stabilizer.
- All these models have an internal regulation of zero (or 4 mA) by a multiturn pot adjustable from outside through the central hole of the connector locking screw.
- All these models have a partially-sealed hole (in place of pin 2) for the span (or 20 mA) regulation.
- The models LP635-LP631 (voltage amplified) have an internal generator of negative voltage for the real zero (without any fix voltage pedestal).
- The models LP634 (4-20 mA) have current and voltage outputs (from pins: zero and 3= current output = 2 wires = 4-20 mA; from pins: 0 -1- 3= voltage output = 3 wires = 1- 5 V).

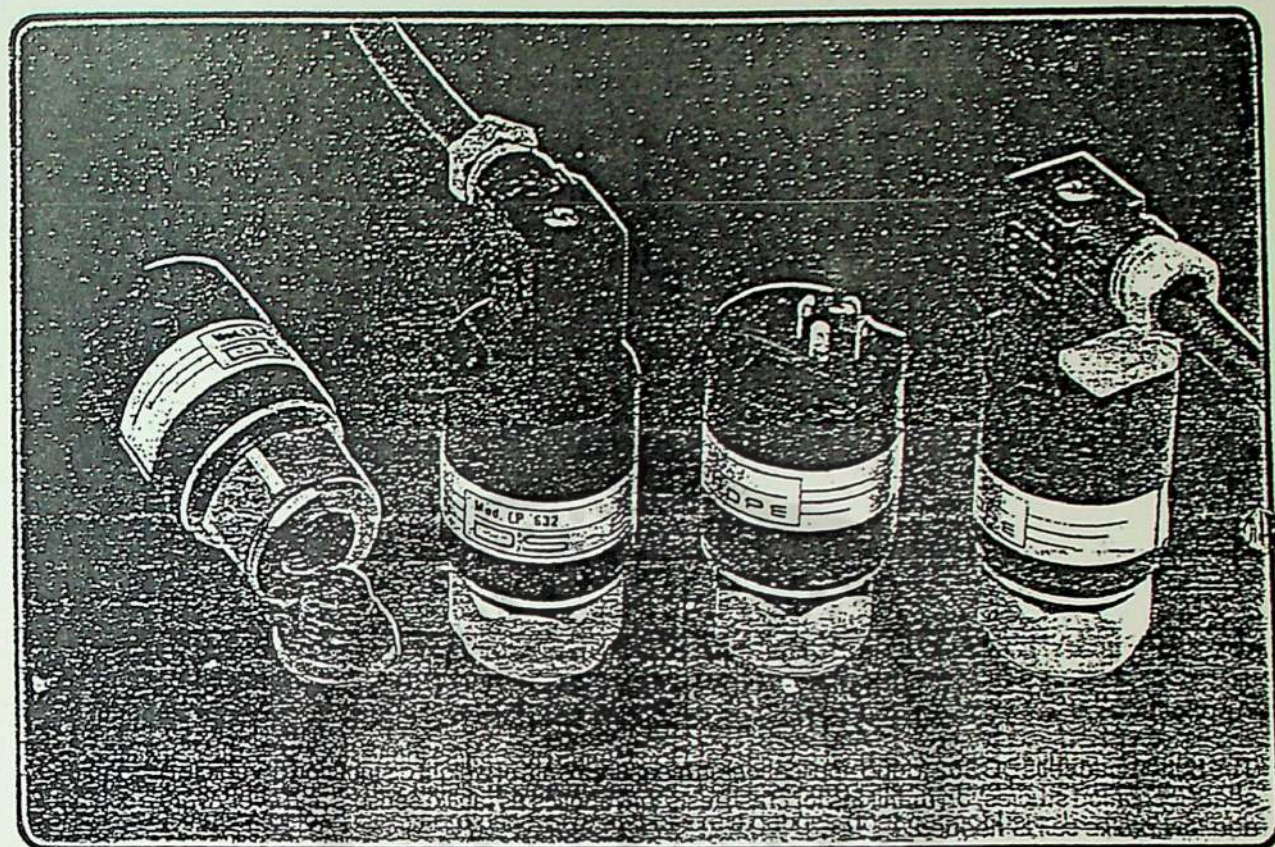
INTERNAL CALIBRATOR SWITCHED BY EXTERNAL MAGNET - SEALED IP 65

OVERALL DIMENSIONS



PRESSURE TRANSDUCERS

■ DS EUROPE ■ SELF-AMPLIFIED SERIES LP 630 ■



1-4-20 mA-0-10 V-0-5 V-1-5 V-2 mV/V-ZERO REGULATION FROM OUTSIDE

TECHNICAL SPECIFICATIONS

• FOR THE SERIES LP 630:

Measuring ranges: 0 - 10 - 20 - 50 - 100 - 200 - 250 - 350 - 500 - 700 - 1100 - 1400 bars FS

Non-linearity + hysteresis: $\leq \pm 0.05\%$ FS (1400-500 bars FS); $\leq \pm 0.1\%$ FS (350-250-200 bars FS);
 $\leq \pm 0.15\%$ FS (100-50 bars FS); $\leq \pm 0.3\%$ FS (20 bars FS); $\leq \pm 0.5\%$ FS (10 bars FS). bsl

Temperature effect on sensitivity: $\leq \pm 0.002\%$ FS/°C; double symmetrical compensation.

Temperature effect on zero: $\leq \pm 0.0015\%$ FS/°C; Zero unbalance: $\pm 2\%$ FS (for LP632).

Calibration: switchable by internal reed contact and external proximity magnet.

Overload: twice FS.

Ultimate overload: about 3 times FS.

Degree of protection: IP 65, as for DIN 40050 designation (dust tight and protection against water jets)

Model	Internal electronics	N° of wires	Supply voltage	Signal output	Zero regulation	Pin connections			
						0	1	2	3
LP632	without electronics	4	up to 20 V dc/ac	2 mV/V	$\pm 10\%$ min	supply	output	output	supply
LP635	voltage amplifier	3	0-10.5 up to 28 V	0-5 V		common	output	hole for span regulation	supply
LP631			0-18 up to 28 V	0-10 V					
LP634	current amplifier	2	0-12 up to 40 V	4-20 mA	$\pm 10\%$ min of 4 mA	common		hole for 20 mA regulation	4-20 mA supply
		3	0-17 up to 40 V	1-5 V		output	common	regulation	supply



SRINAKHARINWIROT UNIVERSITY

PROJECT: WATER HAMMER

DRAWING LIST: WATER HAMMER

DRAWN BY: S. J. J.

DATE: 20/04/95

SCALE: NONE



LIBRATE TANK

SRINAKARINWIROT UNIVERSITY

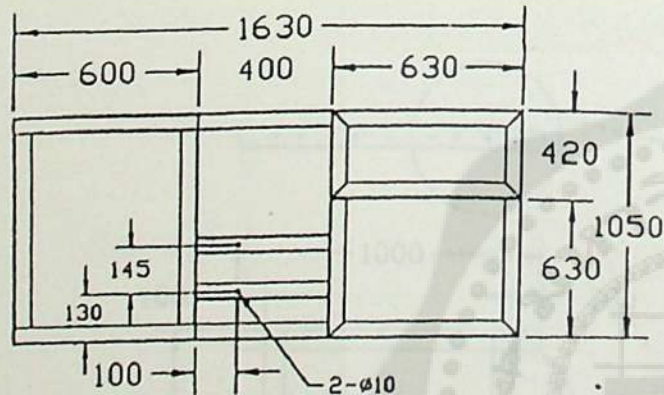
PROJECT: WATER HAMMER

DRAWING LIST: WATER HAMMER

DRAUGHTSMAN: S.Usa

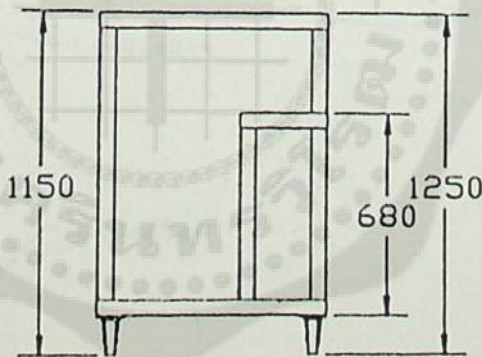
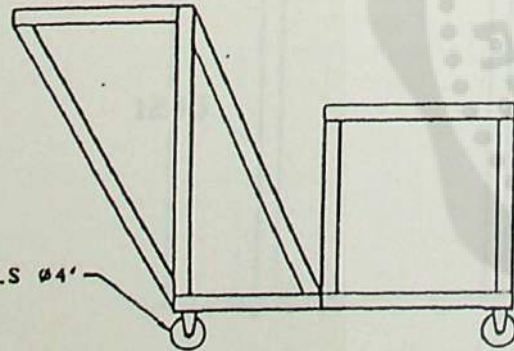
DATE: 20/04/95

SCALE: NONE

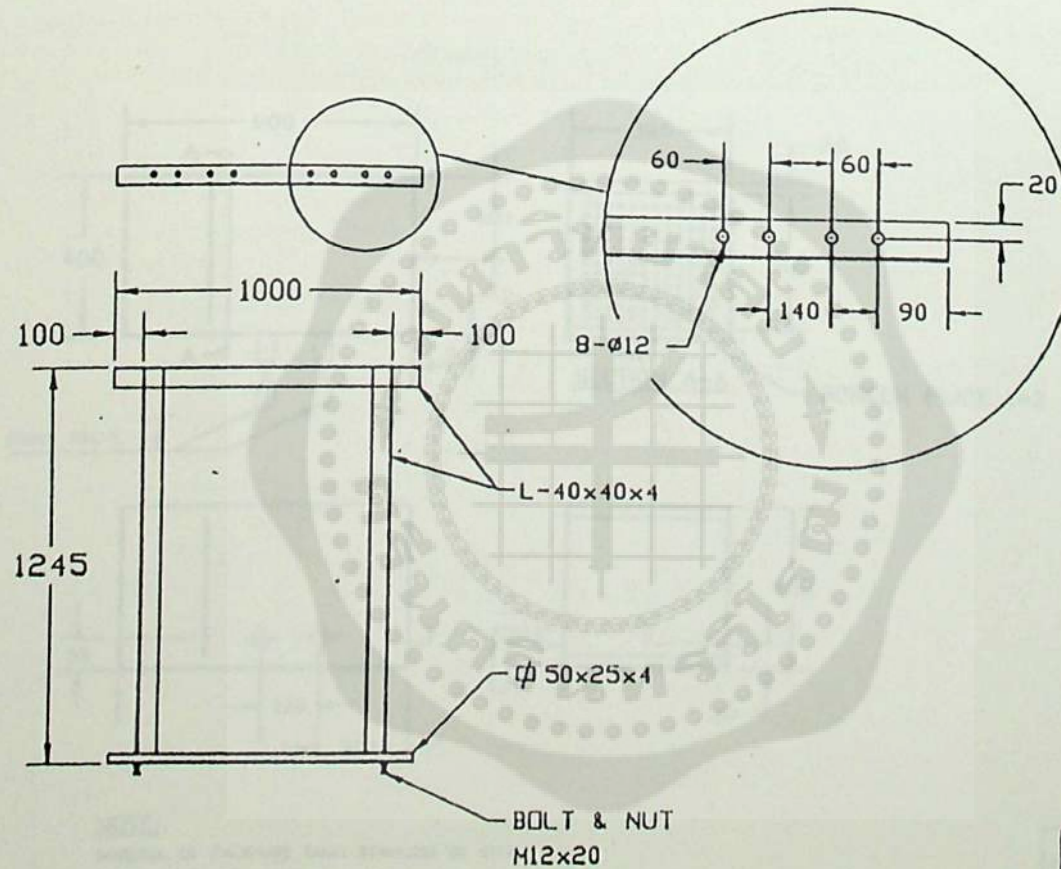


NOTE:

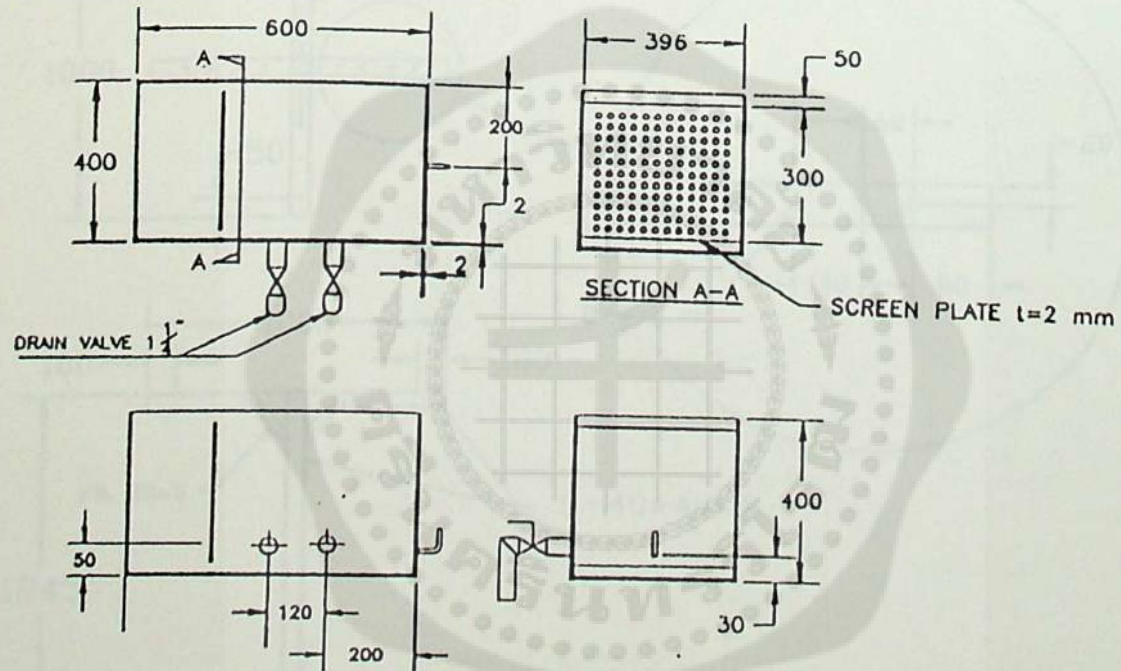
MATERIAL: ANGLE 40x40x4



SRINAKARINWIROT UNIVERSITY
PROJECT: WATER HAMMER
DRAWING LIST: SUPPORT 1
DRAUGHTSMAN: S.Usa
DATE: 20/04/95
SCALE: NONE



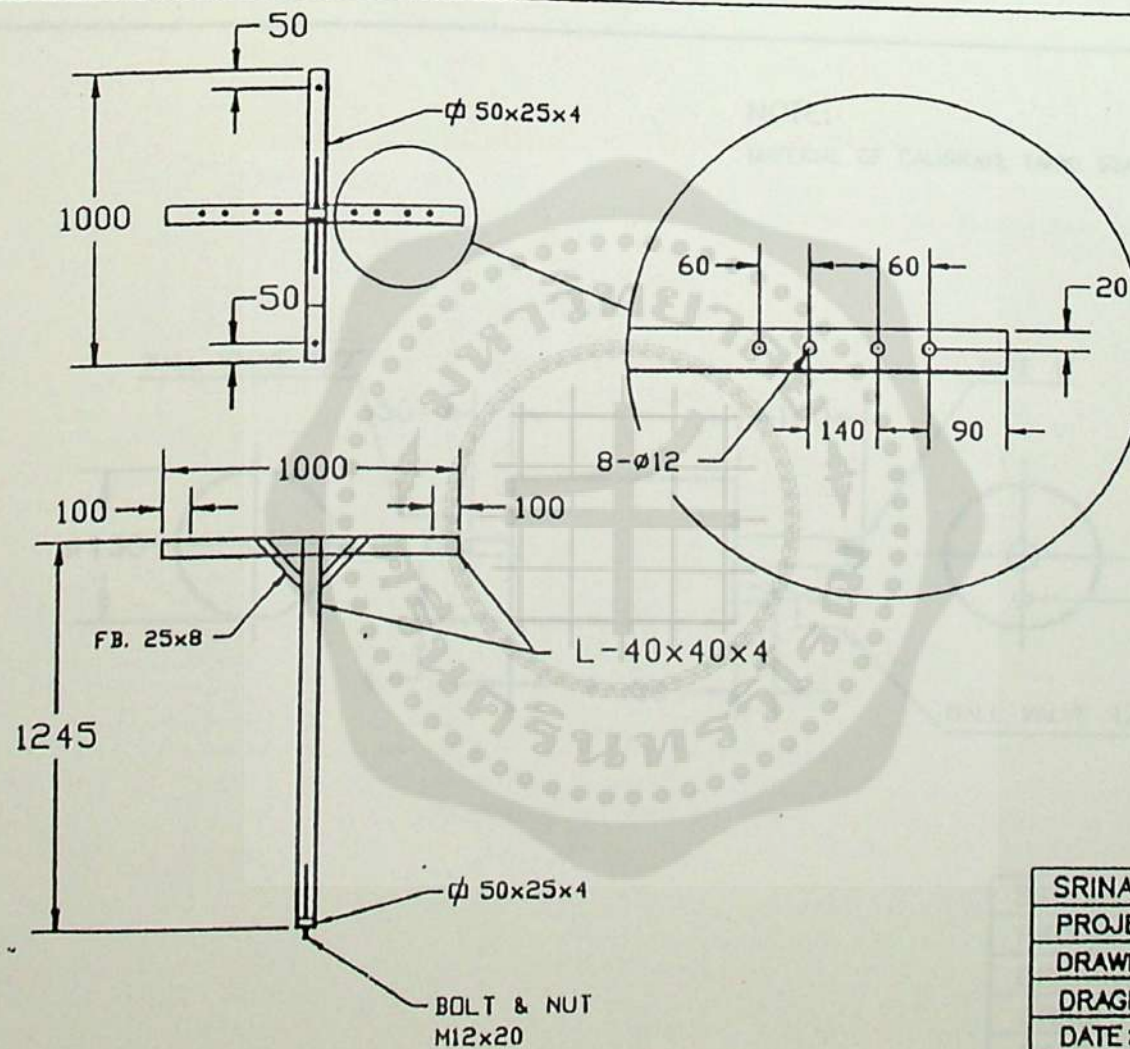
SRINAKARINWIROT UNIVERSITY
PROJECT: WATER HAMMER
DRAWING LIST: SUPPORT 2
DRAUGHTSMAN: S.Ued
DATE: 20/04/95
SCALE: NONE



NOTE:

MATERIAL OF CALIBRATE TANK: STAINLESS OF STEEL

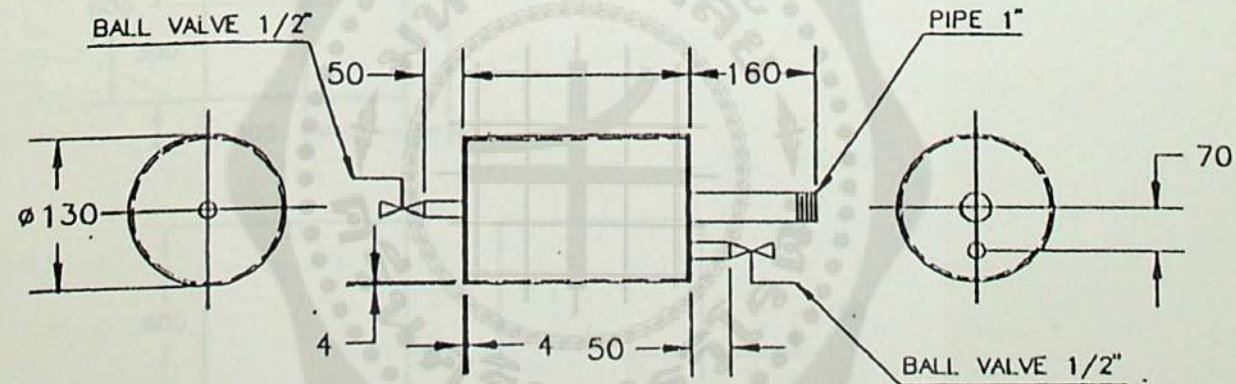
SRINAKARINWIROT UNIVERSITY
PROJECT: WATER HAMMER
DRAWING LIST: CALIBRATE TANK
DRAUGHTSMAN: S.Usa
DATE: 20/04/95
SCALE: NONE



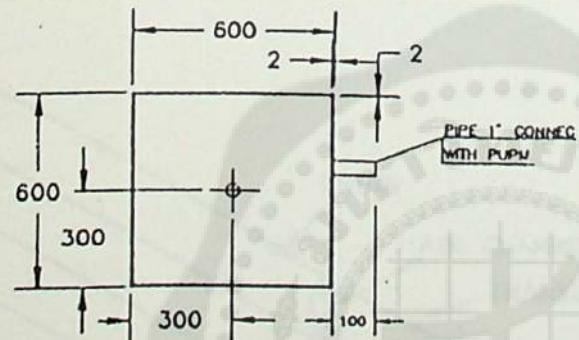
SRINAKARINWIROT UNIVERSITY
PROJECT: WATER HAMMER
DRAWING LIST: SUPPORT 3
DRAUGHTSMAN: S.Uso
DATE: 20/04/95
SCALE: NONE

NOTE:

MATERIAL OF CALIBRATE TANK: STAINLESS OF STEEL

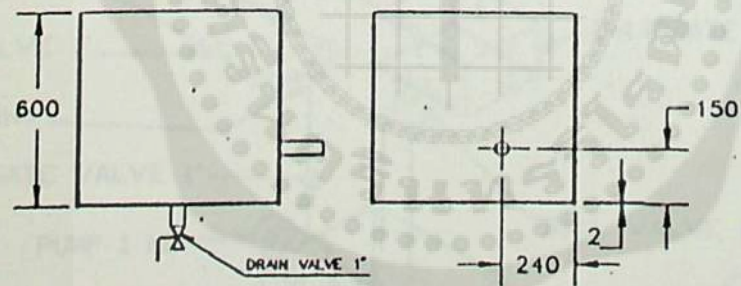


SRINAKARINWIROT UNIVERSITY
PROJECT: WATER HAMMER
DRAWING LIST: AIR CHAMBER
DRAUGHTSMAN: S.Usa
DATE: 20/04/95
SCALE: NONE

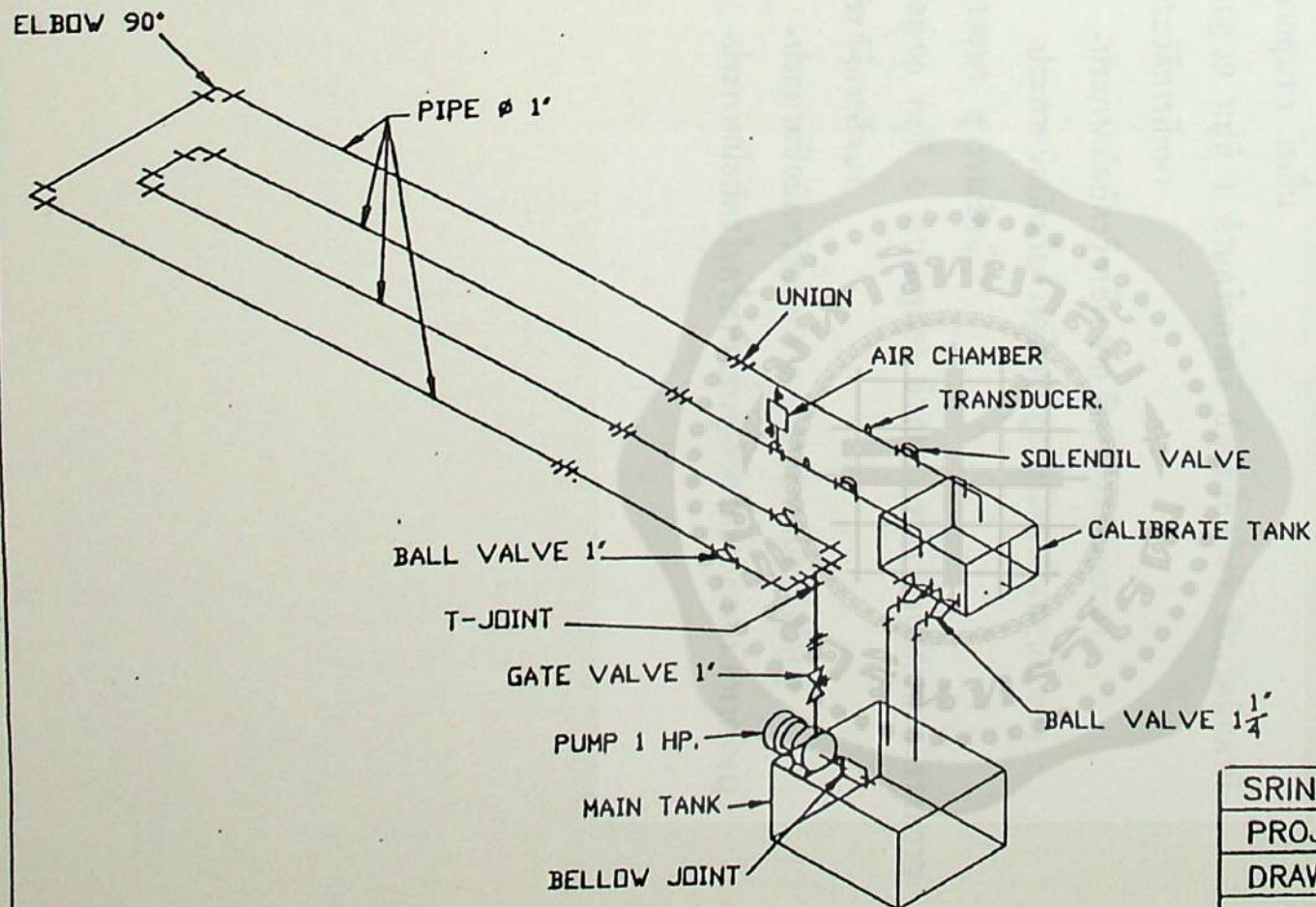


NOTE:

MATERIAL OF MAIN TANK: STAINLESS STEEL



SRINAKARINWIROT UNIVERSITY
PROJECT: WATER HAMMER
DRAWING LIST: MAIN TANK
DRAUGHTSMAN: S.Usa
DATE: 20/04/95
SCALE: NONE



SRINAKARINWIROT UNIVERSITY
PROJECT: WATER HAMMER
DRAWING LIST: PIPING
DRAUGHTSMAN: S.Usa
DATE: 20/04/95
SCALE: NONE

ประวัติผู้จัดทำ

1. นายสถิตย์ สุวรรณชนะ

ที่อยู่ 100/2 หมู่ที่ 2 ตำบลบ้านใหม่ อำเภอรอนดง จังหวัดสงขลา
ประวัติการศึกษา

- ประกาศนียบัตรวิชาชีพ จาก โรงเรียนช่างกลภาคใต้
- ประกาศนียบัตร โยควิชาชีพชั้นสูงจากวิทยาเขตเทคนิคภาคใต้

2. นายสุนทร ใจเย็น

ที่อยู่ 39 หมู่ที่ 1 ตำบลโคกโพธิ์ อำเภอโคกโพธิ์ จังหวัดปัตตานี
ประวัติการศึกษา

- ประกาศนียบัตรวิชาชีพ จาก วิทยาลัยเทคนิคยะลา
- ประกาศนียบัตร โยควิชาชีพชั้นสูงจากวิทยาลัยเทคนิคยะลา

3. นายอุษา สุวรรณรัตน์

ที่อยู่ 96 หมู่ที่ 6 ตำบลหูล่อง อำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช
ประวัติการศึกษา

- ประกาศนียบัตรวิชาชีพ จาก วิทยาลัยเทคนิคหาดใหญ่
- ประกาศนียบัตร โยควิชาชีพชั้นสูงจากวิทยาลัยเทคนิคหาดใหญ่