



TUGAS AKHIR - TM184835

STUDI EKSPERIMEN DAN ANALISA RESPON GETARAN TRANSLASI SISTEM PERPIPAAN SERTA HASIL VOLTASE BANGKITAN DARI MEKANISME CANTILEVER PIEZOELECTRIC

Barelvi Ghazy Daffa
NRP 021115400195

Dosen Pembimbing
Dr. Wiwiek Hendrowati, ST, MT.

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI DAN REKAYASA SISTEM
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA, 2020



TUGAS AKHIR - TM184835

**STUDI EKSPERIMEN DAN ANALISA RESPON
GETARAN TRANSLASI SISTEM PERPIPAAN
SERTA HASIL VOLTASE BANGKITAN DARI
MEKANISME CANTILEVER PIEZOELECTRIC**

Barelvi Ghazy Daffa
0211154000195

Dosen Pembimbing
Dr. Wiwiek Hendrowati, ST, MT.

PROGRAM SARJANA
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI DAN REKAYASA SISTEM
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA, 2020



FINAL PROJECT - TM184835

***EXPERIMENTAL STUDY AND ANALYSIS OF
VIBRATION RESPONSE OF PIPING SYSTEM
AND THE RESULT OF VOLTAGE
HARVESTING FROM CANTILEVER
PIEZOELECTRIC MECHANISM***

Barelvi Ghazy Daffa
0211154000195

Advisory Lecturer
Dr. Wiwiek Hendrowati, ST, MT.

UNDERGRADUATE PROGRAM
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY AND SYSTEM ENGINEERING
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA, 2020

**STUDI EKSPERIMEN DAN ANALISA RESPON
GETARAN TRANSLASI SISTEM PERPIPAAN SERTA
HASIL VOLTASE BANGKITAN DARI MEKANISME
CANTILEVER PIEZOELECTRIC**

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

Barelvi Ghazy Daffa

NRP. 02111540000195

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Dr. Wiwiek Hendrowati, S.T., M.T. (Pembimbing)
NIP. 197004121997032005
2. Dr. Eng. Harus Laksana Guntur, S.T., M.Eng. (Penguji I)
NIP. 197505111999031001
3. Aida Annisa Amin Daman, S.T., M.T. (Penguji II)
NIP. 198907052015042005
4. Ir Julendra B. Ariatedja, S.T., M.T. (Penguji III)
NIP. 198607061999031004

**SURABAYA
JANUARI, 2020**

ABSTRAK

**STUDI EKSPERIMEN DAN ANALISA RESPON
GETARAN TRANSLASI SISTEM PERPIPAAN SERTA
HASIL VOLTASE BANGKITAN DARI MEKANISME
*CANTILEVER PIEZOELECTRIC***

Nama Mahasiswa : Barelvi Ghazy Daffa
NRP : 02111540000195
Departemen : Teknik Mesin FTIRS-ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Wiwiek Hendrowati, S.T., M.T.

ABSTRAK

Sistem perpipaan banyak dibutuhkan penggunaannya salah satunya dibidang industri oil and gas. Sistem perpipaan di perindustrian mengalirkan fluida dengan tekanan yang tinggi sehingga menyebabkan terjadinya getaran yang disebabkan oleh aliran fluida yang turbulen. Tekanan fluktuasi pada pipa memiliki potensi untuk menghasilkan energi getaran yang dapat diambil dengan menggunakan teknik energy harvesting. Media untuk melakukan teknik energy harvesting salah satunya yaitu cantilever piezoelectric strip.

Dalam penelitian tugas akhir ini dilakukan studi eksperimental dan permodelan dinamis mekanisme cantilever piezoelectric clamp. Sistem cantilever piezoelectric clamp terdiri dari sebuah clamp yang merupakan dudukan untuk PCB dan piezoelectric yang nantinya diletakkan pada pipa lurus dan elbow 90. cantilever piezoelectric clamp didesain untuk mendapatkan energy harvesting dari getaran pada pipa yang dialiri fluida secara fleksibel. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan penelitian dengan studi eksperimen. Adapun variasi yang diberikan, yaitu variasi debit aliran fluida dan variasi posisi peletakkan piezoelectric terhadap pipa.

Eksperimen pada tugas akhir ini dilakukan dengan dua kondisi, yaitu sistem utama tanpa penambahan mekanisme cantilever piezoelectric dan sistem utama dengan penambahan cantilever piezoelectric. Didapatkan hasil berupa respon percepatan getaran dan voltase bangkitan yang dihasilkan. Energi bangkitan optimum didapatkan dari eksperimen sistem utama dengan piezoelectric pada variasi debit aliran 35 liter/menit di posisi peletakkan piezoelectric elbow bend yaitu sebesar $8.49E-04$ Volt. Sedangkan untuk voltase bangkitan minimum terjadi pada variasi peletakkan posisi piezoelectric di pipa lurus pada debit aliran 15 liter/menit sebesar $1.53E-04$ Volt.

Kata kunci: Cantilever Piezoelectric Clamp, Variasi peletakan piezoelectric, Variasi debit aliran fluida, Voltase bangkitan, Eksperimen.

ABSTRACT

**EXPERIMENTAL STUDY AND ANALYSIS OF
VIBRATION RESPONSE OF PIPING SYSTEM AND
THE RESULT OF VOLTAGE HARVESTING FROM
CANTILEVER PIEZOELECTRIC MECHANISM**

Name : Barelvi Ghazy Daffa
NRP : 0211154000183
Departement : Mechanical Engineering FTIRS-ITS
Adviser : Dr. Wiwiek Hendrowati, S.T., M.T.

ABSTRACT

The usage of a piping system is much needed for many industries such as the oil and gas industry. Piping installation systems drain fluid with high pressure, causing vibration which caused by turbulent fluid flow. Pressure fluctuations in pipes have potential uses to produce vibration energy that can be obtained using energy harvesting techniques. One of devices to do energy techniques harvesting is cantilever piezoelectric strip.

In the study of this final project conducted experimental studies and dynamic modelling of the cantilever piezoelectric clamp mechanism. The cantilever piezoelectric clamp system consists of a clamp that is the base for the PCB and piezoelectric which is placed on the straight pipe and elbow 90. Cantilever Piezoelectric clamp is designed to gain energy harvesting from vibrations on a fluid-flowing pipe flexibly. The research aim is to conduct the research with experimental studies. The variations of this research are the fluid flow discharge and the position of a piezoelectric on pipe.

Experiments on this final project were conducted in two conditions, the main system without the addition of a piezoelectric cantilever mechanism and the main system with the addition of the cantilever piezoelectric. The results are vibration acceleration

response and voltage harvesting. The optimum voltage obtained from the main system experiments with piezoelectric on variations of flow discharge 35 liter/min in the position of laying piezoelectric on elbow bend with value of 8.49 E-04 Volt. As for the minimum voltage occurs in variations of the piezoelectric position on the straight pipe in the flow discharge 15 liters/minute of 1.53E-04 Volt.

Keyword : Cantilever piezoelectric clamp, Variations position of piezoelectric, Variations discharge, Voltage Harvesting, Experiments.

KATA PENGANTAR

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis sampaikan kepada Allah SWT Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan rahmat-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul “Studi Eksperimen dan Analisa Respon Getaran Translasi Sistem Perpipaan serta Hasil Voltase Bangkitan dari Mekanisme *Cantilever Piezoelectric*”. Penyusunan Tugas Akhir ini merupakan persyaratan akademis pada mata kuliah “Tugas Akhir” pada tahun ajaran 2019-2020, program studi S1 (Strata 1) Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Tersusunnya Tugas Akhir ini juga karena bantuan dan dukungan dari berbagai pihak terkait yang terlibat baik secara langsung maupun tidak langsung. Oleh sebab itu penulis sangat mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu dalam proses penyelesaian Tugas Akhir ini, antara lain:

1. Keluarga penulis, Bapak Erry Septianto dan Ibu Effiawati Puji Rahayu, serta saudara kandung penulis Tazkia Fastabicha Sasadara yang selalu mendoakan dan memberikan dukungan baik moril dan materil kepada penulis.
2. Ibu Dr. Wiwiek Hendrowati, ST., MT. selaku dosen pembimbing yang memberikan bimbingan dan pengarahan kepada penulis selama menyusun Tugas Akhir.
3. Bapak Dr. Harus Laksana Guntur, S.T., M.Eng., Ibu Aida Annisa Amin Daman, S.T., M.T., dan Ibu Dinny Harnany, S.T., M.Sc., selaku dosen penguji yang telah memberikan saran untuk Tugas Akhir ini
4. Bapak Tris, serta teman-teman eksperimen Tugas Akhir Laboratorium Vibrasi dan Sistem Dinamis Teknik Mesin FTI-ITS yang telah memberikan saran dan bantuan pada proses pembuatan alat eksperimen Tugas Akhir ini.

5. Kevin Harris, selaku partner pengerjaan Tugas Akhir yang selalu membantu dan menyemangati selama menyusun Tugas Akhir.
6. Muhammad Rizky Ramadhan, Ivan Ramadhan Arifin, dan Hilda Mailil Haq, selaku teman-teman yang menemani dan membantu penulis mengerjakan Tugas Akhir.
7. Teman-teman penulis satu kelompok Tugas Akhir yaitu Freidy, Ammar, Disa, Sla, Cia dan Gerald. Teman laboratorium vibrasi yaitu Muti, Cem, Ely, Sakti dan Deasy, yang telah berjuang bersama-sama dan saling membantu dalam penyelesaian tugas akhir ini.
8. Seluruh pihak yang telah banyak membantu penulis yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.

Penulis menyadari bahwa penulisan Tugas Akhir ini masih memiliki banyak kesalahan dan kekurangan hingga jauh dari kata sempurna, sehingga kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan. Guna penambahan wawasan serta keperluan studi lainnya untuk pengembangan yang lebih lanjut, semoga Tugas Akhir ini dapat memberikan pengetahuan, dan dapat bermanfaat bagi siapapun yang membacanya.

Surabaya, 26 Januari 2020

Penulis

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI

ABSTRAK	iv
ABSTRACT	vi
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR GAMBAR	xvi
DAFTAR TABEL	xxiv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Manfaat Penelitian	4
BAB II DASAR TEORI DAN TINJAUAN PUSTAKA ..	5
2.1 Sistem Perpipaan.....	5
2.1.1 Komponen pada Pipa	5
2.1.2 Bahan Pipa Secara Umum	7
2.2 Fluida.....	7
2.2.1 Aliran Turbulen dan Laminar	7
2.2.2 Kapasitas Aliran Fluida	8
2.2.3 Head loss	8
2.3 Dasar Teori Mekanika Getaran	9
2.3.1 Derajat Kebebasan (<i>Degree of Freedom</i>)....	9
2.3.2 Base Motion Vibration	11

2.4	<i>Piezoelectric</i>	13
2.4.1	<i>Cantilever Piezoelectric</i>	15
2.4.2	<i>Piezoelectric Voltage Constant</i>	16
2.4.3	<i>Analisa Material Piezoelectric</i>	16
2.5	Penelitian Terdahulu	18
2.5.1	<i>“Energy Harvesting of Gas Pipeline Vibration”</i> oleh M.Arafa	18
2.5.2	<i>“Experimental and Simulation Study of flow Induced Vibration Through Straight Pipes”</i> Oleh S. M. Khot	21
2.5.3	<i>“Power Generation in Pipeline: Report”</i> Oleh Dipen N. Sinha	26
2.5.4	<i>“Experimental Investigation on the Vibration Induced by Slug Flow in Horizontal Pipe”</i> oleh Zahid I. Al-Hashimy	29
2.5.5	<i>“Experimental Investigation of Piezoelectric Energy Harvesting with Turbulent Flow”</i> oleh Sanchita Abrol & Deepak Chhabra	32
BAB III METODOLOGI PENELITIAN		39
3.1	<i>Flowchart Penelitian</i>	39
3.2	Penjelasan <i>Flowchart</i> Penelitian	40
3.2.1	Studi Literatur	41
3.2.2	Identifikasi Masalah	41
3.2.3	Perancangan Mekanisme Sistem Utama dan <i>Piezoelectric</i>	41
3.2.3.1	Perancangan Mekanisme Sistem Utama	41

3.2.3.2	Pemodelan Kelistrikan <i>Piezoelectric</i> ..	43
3.2.4	Pemodelan Sistem Dinamis	45
3.2.4.1	Pemodelan Sistem Dinamis Pipa Lurus.	45
3.2.4.2	Pemodelan Sistem Dinamis Pipa <i>Elbow</i>	46
3.2.5	Penurunan Persamaan Gerak.....	47
3.2.5.1	Sistem Utama Tanpa <i>Piezoelectric</i>	48
A.	Pipa lurus	48
B.	Pipa <i>elbow</i>	49
3.2.5.2	Sistem Utama dengan <i>Piezoelectric</i>	50
A.	Sistem Utama Pipa Lurus dengan <i>Piezoelectric</i>	50
B.	Sistem Utama Pipa <i>Elbow</i> dengan <i>Piezoelectric</i> di Posisi <i>Outlet</i>	52
C.	Sistem Utama Pipa <i>Elbow</i> dengan <i>Piezoelectric</i> di Posisi <i>Bend</i>	54
3.2.6	Pemodelan Kelistrikan <i>Piezoelectric</i>	57
3.3	Penentuan Parameter Penelitian	58
3.3.1	Menentukan Massa Utama (M_0).....	59
A.	Massa <i>elbow</i>	59
B.	Massa Pipa Lurus.....	59
3.3.2	Analisa Defleksi	60
3.3.2.1	Analisa Perhitungan Defleksi pada Pipa Lurus.....	60

3.3.2.2	Analisa Perhitungan Defleksi pada Pipa <i>Elbow</i>	68
3.3.3	Menentukan Frekuensi Natural.....	73
3.3.4	Menentukan Konstanta Kekakuan Pegas dari <i>Cantilever Piezoelectric</i>	74
3.3.5	Menentukan Frekuensi Operasi (ω_f)	76
3.3.6	Parameter Penelitian.....	79
3.4	Eksperimen.....	82
3.4.1	<i>Flowchart</i> Eksperimen	82
3.4.2	Skema Pengujian.....	83
3.4.3	Pengambilan Data Eksperimen	84
3.5	Analisa Data dan Pembahasan	85
3.6	Kesimpulan.....	86
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN		87
4.1	Peralatan dan Pelaksanaan Eksperimen.....	87
4.1.1	Sistem Utama.....	88
4.1.2	<i>Piezoelectric Cantilever dan Clamp</i>	91
4.1.3	<i>Piezoelectric Cantilever dan Clamp</i>	93
4.2	Analisa Eksperimen	96
4.2.1	Sistem Utama Tanpa <i>Piezoelectric</i>	97
4.2.2	Sistem Utama dengan <i>Piezoelectric</i>	100
4.3	Analisa dan Pembahasan Data Eksperimen	103
4.3.1	Analisa dan Pembahasan Sistem Utama Tanpa <i>Piezoelectric</i>	103

4.3.2	Analisa dan Pembahasan Sistem Utama dengan <i>Piezoelectric</i>	105
4.3.3	Analisa Respon Voltase dengan Variasi Debit Aliran dan Variasi Peletakkan <i>Piezoelectric</i> 107	
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....		109
5.1	Kesimpulan.....	109
5.2	Saran.....	110
DAFTAR PUSTAKA		111
LAMPIRAN.....		113
BIODATA PENULIS		127

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR GAMBAR

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 <i>Fitting</i> dalam Sistem Perpipaan. (Surya, 2017)	6
Gambar 2. 2 Macam-macam <i>Fitting</i> Perpipaan (Surya, 2017) ...	6
Gambar 2. 3 <i>Fitting Elbow</i> 90°, 45°, dan 180° (Putranto, 2018) .	7
Gambar 2. 4 Sistem <i>Undamped</i> dengan 3 DOF (Rao & Singiresu , 2011)	10
Gambar 2. 5 Skema <i>Base Motion Vibration</i> (Rao & Singiresu , 2011)	11
Gambar 2. 6 Grafik Hubungan (a) Amplitudo <i>Ratio</i> dengan <i>Frequency Ratio</i> , (b) <i>Phase Angle</i> dengan <i>Frequency Ratio</i> (Rao & Singiresu , 2011).....	13
Gambar 2. 7 <i>Cantilever Piezoelectric</i> (Efendy, 2017)	15
Gambar 2. 8 <i>Free Body Diagram Cantilever Piezoelectric</i> (Efendy, 2017).....	16
Gambar 2. 9 Model Pemanen Energi Kinetik Menggunakan <i>Cantilever Piezoelectric</i> (Efendy, 2017).....	17
Gambar 2. 10 Rangkaian Listrik Pemanen Energi Kinetik (Efendy, 2017).....	17
Gambar 2. 11 Pengaturan Eksperimen (Arafa.M, Akl. W, Majeed. M, Al-Hussain. K, & Baz. A, 2010).....	19
Gambar 2. 12 <i>Piezoelectric strip® harvester</i> . (Arafa.M, Akl. W, Majeed. M, Al-Hussain. K, & Baz. A, 2010).....	19
Gambar 2. 13 Akselerasi Dinding Pipa Ditempat Terpasangnya <i>harvester</i> (Arafa.M, Akl. W, Majeed. M, Al-Hussain. K, & Baz. A, 2010)	20
Gambar 2. 14 (a) Grafik Hubungan <i>Output Voltage</i> dengan Domain Waktu, (b) Grafik Hubungan <i>Output Voltage</i> dengan Domain Frekuensi (Arafa.M, Akl. W, Majeed. M, Al-Hussain. K, & Baz. A, 2010).....	21
Gambar 2. 15 Pipa yang Dialiri Fluida dengan Dijepit di Kedua Ujungnya (Khot, Khaire, & Naik, 2017).....	22

Gambar 2. 16 Skema <i>Loop</i> Aliran Fluida Pada Pipa (Khot, Khaire, & Naik, 2017)	23
Gambar 2. 17 Eksperimen Getaran pada Pipa (Khot, Khaire, & Naik, 2017).....	23
Gambar 2. 18 Grafik Frekuensi untuk Diameter 24mm, Ketebalan 2.4mm, dan <i>Discharge</i> 90 lpm (a) <i>Experimental</i> (b) <i>Simulation</i> (Khot, Khaire, & Naik, 2017)	24
Gambar 2. 19 Grafik Frekuensi untuk Diameter 24mm, Ketebalan 2.4mm, dan <i>Discharge</i> 120 lpm (a) <i>Experimental</i> (b) <i>Simulation</i> (Khot, Khaire, & Naik, 2017)	24
Gambar 2. 20 Grafik Frekuensi untuk Diameter 24mm, Ketebalan 2.4mm, dan <i>Discharge</i> 150 lpm (a) <i>Experimental</i> (b) <i>Simulation</i> (Khot, Khaire, & Naik, 2017)	25
Gambar 2. 21 Eksperimen Getaran pada Pipa <i>Plexiglas</i> Menggunakan Fluida Gas Nitrogen (Sinha, 2005)	26
Gambar 2. 22 Dua <i>Piezoelectric</i> Silinder yang Berbeda Sebagai Variasi Penelitian (Sinha, 2005).....	27
Gambar 2. 23 Grafik Hubungan Amplitudo dengan Waktu (a) dan (c), Grafik Hubungan <i>FfT</i> Amplitudo dengan Frekuensi (b) dan (d), Grafik dengan Data yang Sama dengan Variasi Ukuran <i>Piezoelectric</i> Silinder (Sinha, 2005)	28
Gambar 2. 24 Diagram Skematik dari Fasilitas Tes untuk Eksperimen (Al-Hashimy, Al-Kayiem, & Time, 2016).....	30
Gambar 2. 25 Pengaturan Eksperimen Getaran pada Pipa untuk Sistem <i>Vibration Data Acquisition and Analysis</i> (VDAA) (Al-Hashimy, Al-Kayiem, & Time, 2016)	30
Gambar 2. 26 Grafik Hubungan Perpindahan Getaran Arah Y Terhadap Waktu dengan Variasi Kecepatan Rendah Fluida (Al-Hashimy, Al-Kayiem, & Time, 2016)	31
Gambar 2. 27 <i>PZT Piezo-patch</i> (Abrol & Chhabra, 2018)	33
Gambar 2. 28 (a): <i>PZT Patch with Full Bridge Rectifier Circuit</i> (b): <i>PZT Patch with Voltage Doubler Circuit</i> (Abrol & Chhabra, 2018).....	33

Gambar 2. 29 (a): <i>Working Model of the Energy Harvester</i> (b) <i>Housing of Piezoelectric Patches</i> di Dalam <i>Flange Coupling</i> (Abrol & Chhabra, 2018)	34
Gambar 2. 30 Sistem Pengukuran Aliran Air (Abrol & Chhabra, 2018)	35
Gambar 2. 31 Perbandingan dari Voltase yang Dihasilkan dari PZT Menggunakan <i>Single</i> dan <i>Double Patches</i> untuk <i>Full Bridge Rectifier Circuit</i> (Abrol & Chhabra, 2018)	35
Gambar 2. 32 Perbandingan dari Voltase yang Dihasilkan dari PZT Menggunakan <i>Single</i> dan <i>Double Patches</i> untuk <i>Voltage Doubler Circuit</i> (Abrol & Chhabra, 2018).....	36
Gambar 2. 33 Perbandingan dari Voltase yang Dihasilkan dari PZT Menggunakan <i>Single Piezo Patch</i> (Abrol & Chhabra, 2018)	36
Gambar 2. 34 Perbandingan dari Voltase yang Dihasilkan dari PZT Menggunakan <i>Double Piezo Patch (Parallel Connection)</i> (Abrol & Chhabra, 2018).....	37
Gambar 3. 1 <i>Flowchart</i> Penelitian.....	40
Gambar 3. 2 Rangkaian Sistem Perpipaan dan Bagian yang Ditinjau (a) Tampak Isometrik (b) Tampak Atas	42
Gambar 3. 3 <i>Piezoelectric</i>	43
Gambar 3. 4 Diagram Sirkuit Elektromagnetik <i>Cantilever Piezoelectric</i>	43
Gambar 3. 5 Model <i>Clamp</i> dan <i>Piezoelectric</i>	44
Gambar 3. 6 Sistem Utama Tampak Atas yang Telah Dipasang <i>Piezoelectric</i> (a) Pipa Lurus, (b) <i>Elbow 90</i> Posisi <i>Outlet</i> dan (c) <i>Elbow 90</i> Posisi <i>Bend</i>	44
Gambar 3. 7 Model Dinamis Pipa Lurus (a) Tanpa <i>Piezoelectric</i> (b) Dengan <i>Piezoelectric</i>	45
Gambar 3. 8 Model Dinamis Pipa <i>Elbow</i> (a) Tanpa <i>piezoelectric</i> (b) Dengan <i>Piezoelectric</i> Di Posisi <i>Outlet</i> (c) Dengan <i>Piezoelectric</i> Di Posisi <i>Bend</i>	47

Gambar 3. 9	<i>Free Body Diagram</i> Massa Pipa Lurus	48
Gambar 3. 10	<i>Free Body Diagram</i> Massa Pipa Elbow	49
Gambar 3. 11	<i>Free Body Diagram</i> Massa Pipa (m_0).....	50
Gambar 3. 12	<i>Free Body Diagram</i> Massa Piezoelectric	51
Gambar 3. 13	<i>Free Body Diagram</i> Massa Sistem Utama (m_0)..	52
Gambar 3. 14	<i>Free Body Diagram</i> Massa Piezoelectric	53
Gambar 3. 15	<i>Free body Diagram</i> Massa Sistem Utama (m_0) <i>Elbow Posisi Bend</i>	54
Gambar 3. 16	<i>Free Body Diagram</i> Massa Piezoelectric	56
Gambar 3. 17	Diagram Sirkuit Elektromagnetik <i>Cantilever</i> <i>Piezoelectric</i>	57
Gambar 3. 18	<i>Free Body Diagram</i> Pipa Lurus	60
Gambar 3. 19	Posisi Berat Pipa Lurus.....	60
Gambar 3. 20	Posisi Gaya Arah Y pada Titik B	61
Gambar 3. 21	Momen Posisi B	61
Gambar 3. 22	Momen A dan Momen B Pipa Lurus.....	63
Gambar 3. 23	Potongan Pipa Lurus 1.....	63
Gambar 3. 24	Potongan Pipa Lurus 2.....	63
Gambar 3. 25	<i>Diagram Shear</i> dan <i>Diagram Momen</i> Pipa Lurus	67
Gambar 3. 26	Skema Pembebanan oleh Eksitasi Fluida pada <i>Elbow</i>	68
Gambar 3. 27	<i>Free Body Diagram</i> Potongan <i>Elbow</i>	69
Gambar 3. 28	Potongan 1 Pipa <i>Elbow</i>	69
Gambar 3. 29	Potongan 2 Pipa <i>Elbow</i>	70
Gambar 3. 30	<i>Diagram Shear</i> dan <i>Diagram Momen</i> Pipa Lurus	70
Gambar 3. 31	<i>Piezoelectric</i> Minisense 100 <i>Vibration Sensor</i> ...	75
Gambar 3. 32	Dimensi Material <i>Piezoelectric</i> yang Digunakan	75
Gambar 3. 33	Frekuensi Operasi Tanpa <i>Piezoelectric</i> Pipa Lurus	76
Gambar 3. 34	Frekuensi Operasi Tanpa <i>Piezoelectric</i> Pipa <i>Elbow</i> <i>Outlet</i>	77

Gambar 3. 35 Frekuensi Operasi Tanpa <i>Piezoelectric</i> Pipa <i>Elbow Bend</i>	77
Gambar 3. 36 Frekuensi Operasi Menggunakan <i>Piezoelectric</i> Pada Pipa Lurus	78
Gambar 3. 37 Frekuensi Operasi Menggunakan <i>Piezoelectric</i> Pada <i>Elbow Outlet</i>	78
Gambar 3. 38 Frekuensi Operasi Menggunakan <i>Piezoelectric</i> Pada <i>Elbow Bend</i>	79
Gambar 3. 39 Flowchart Ekserimen	83
Gambar 3. 40 Skema Pengujian (a) Pipa Lurus dan (b) <i>Fitting</i> Pipa <i>Elbow</i> 90 Tampak Atas	84
Gambar 4. 1 Alat Eksperimen (a) <i>Oscilloscope</i> , (b) <i>Adaptor</i> , (c) Kabel Penghubung <i>Adaptor</i> dengan <i>Oscilloscope</i> , (d) <i>Probe Accelerometer</i> , dan (e) <i>Probe</i> Tegangan, dan (f) <i>Flowmeter</i>	88
Gambar 4. 2 Sistem Utama (a) Pipa Lurus (b) <i>Elbow</i> 90 (c) Gabungan Pipa lurus dan <i>Elbow</i> 90 (d) Katup Pengatur Debit (e) Rangkaian Sistem Utama Keseluruhan	90
Gambar 4. 3 (a) Rangkaian <i>Piezoelectric</i> dan <i>Clamp</i> (b) <i>Piezoelectric</i> , (c) <i>Clamp</i> , (d) PCB, (e) Kabel <i>Jumper Male</i>	91
Gambar 4. 4 Variasi Posisi Peletakkan <i>Piezoelectric</i> (a) Pipa Lurus, (b) <i>Elbow</i> Posisi <i>Outlet</i> , (c) <i>Elbow</i> Posisi <i>Bend</i>	93
Gambar 4. 5 Pelaksanaan Eksperimen Sistem Utama (a) <i>Elbow Outlet</i> Tanpa <i>Piezoelectric</i> (b) <i>Elbow Outlet</i> Dengan <i>Piezoelectric</i> (c) <i>Elbow Bend</i> Tanpa <i>Piezoelectric</i> (d) <i>Elbow Bend</i> Dengan <i>Piezoelectric</i> (e) Pipa Lurus Tanpa <i>Piezoelectric</i> (f) Pipa Lurus Dengan <i>Piezoelectric</i> (g) Eksperimen Keseluruhan	94
Gambar 4. 6 Hasil Pembacaan <i>Oscilloscope</i> Eksperimen Sistem Utama Tanpa <i>Piezoelectric</i> pada <i>Elbow</i> Posisi <i>Bend</i> dengan Debit Aliran (a) 15 liter/menit, (b) 25 liter/menit, dan (c) 35 liter/menit	98
Gambar 4. 7 Hasil <i>Filtering</i> dan <i>Smoothing</i> Eksperimen Sistem Utama Tanpa <i>Piezoelectric</i> pada <i>Elbow</i> Posisi <i>Bend</i> dengan Debit	

Aliran (a) 15 liter/menit, (b) 25 liter/menit, dan (c) 35 liter/menit	99
Gambar 4. 8 Hasil Pembacaan <i>Oscilloscope</i> Eksperimen Sistem Utama dengan <i>Piezoelectric</i> pada <i>Elbow</i> Posisi <i>Outlet</i> dengan Debit Aliran (a) 15 liter/menit, (b) 25 liter/menit, dan (c) 35 liter/menit	101
Gambar 4. 9 Perbandingan Hasil <i>Filtering</i> dan <i>Smoothing</i> Eksperimen Sistem Utama Tanpa <i>Piezoelectric</i> dan Penambahan <i>Piezoelectric</i> pada Debit Aliran 25 liter/menit dengan Variasi Peletakkan Posisi <i>Piezoelectric</i> pada (a) Pipa Lurus, (b) <i>Elbow</i> Posisi <i>Outlet</i> , dan (c) <i>Elbow</i> Posisi <i>Bend</i>	102
Gambar 4. 10 Grafik RMS Percepatan Sistem Utama Tanpa Penambahan <i>Piezoelectric</i>	104
Gambar 4. 11 Grafik RMS Percepatan Sistem Utama Tanpa <i>Piezoelectric</i> dan Penambahan <i>Piezoelectric</i>	106
Gambar 4. 12 Grafik RMS Voltase Sistem Utama dengan Variasi Peletakkan <i>Piezoelectric</i> pada Sistem Utama dan Variasi Debit Aliran	108

Gambar 1 Hasil <i>Filtering</i> dan <i>Smoothing</i> Sistem Utama Tanpa <i>Piezoelectric</i> pada Posisi Pengujian Pipa Lurus dengan Debit Aliran (a) 15 liter/menit; (b) 25 liter/menit; (c) 35 liter/menit.	114
Gambar 2 Hasil <i>Filtering</i> dan <i>Smoothing</i> Sistem Utama Tanpa <i>Piezoelectric</i> pada Posisi Pengujian <i>Elbow</i> Posisi <i>Outlet</i> dengan Debit Aliran (a) 15 liter/menit; (b) 25 liter/menit; (c) 35 liter/menit.	115
Gambar 3 Hasil <i>Filtering</i> dan <i>Smoothing</i> Sistem Utama Tanpa <i>Piezoelectric</i> pada Posisi Pengujian <i>Elbow</i> Posisi <i>Bend</i> dengan Debit Aliran (a) 15 liter/menit; (b) 25 liter/menit; (c) 35 liter/menit.	117

Gambar 4 Hasil <i>Filtering</i> dan <i>Smoothing</i> Sistem Utama dengan <i>Piezoelectric</i> pada Posisi Pengujian Pipa Lurus dengan Debit Aliran 15 liter/menit (a) Translasi; (b) Voltase.	118
Gambar 5 Hasil <i>Filtering</i> dan <i>Smoothing</i> Sistem Utama dengan <i>Piezoelectric</i> pada Posisi Pengujian Pipa Lurus dengan Debit Aliran 25 liter/menit (a) Translasi; (b) Voltase.	119
Gambar 6 Hasil <i>Filtering</i> dan <i>Smoothing</i> Sistem Utama dengan <i>Piezoelectric</i> pada Posisi Pengujian Pipa Lurus dengan Debit Aliran 35 liter/menit (a) Translasi; (b) Voltase.	120
Gambar 7 Hasil <i>Filtering</i> dan <i>Smoothing</i> Sistem Utama dengan <i>Piezoelectric</i> pada Posisi Pengujian <i>Elbow Outlet</i> dengan Debit Aliran 15 liter/menit (a) Translasi; (b) Voltase.	121
Gambar 8 Hasil <i>Filtering</i> dan <i>Smoothing</i> Sistem Utama dengan <i>Piezoelectric</i> pada Posisi Pengujian <i>Elbow Outlet</i> dengan Debit Aliran 25 liter/menit (a) Translasi; (b) Voltase.	122
Gambar 9 Hasil <i>Filtering</i> dan <i>Smoothing</i> Sistem Utama dengan <i>Piezoelectric</i> pada Posisi Pengujian <i>Elbow Outlet</i> dengan Debit Aliran 35 liter/menit (a) Translasi; (b) Voltase.	123
Gambar 10 Hasil <i>Filtering</i> dan <i>Smoothing</i> Sistem Utama dengan <i>Piezoelectric</i> pada Posisi Pengujian <i>Elbow Bend</i> dengan Debit Aliran 15 liter/menit (a) Translasi; (b) Voltase.	124
Gambar 11 Hasil <i>Filtering</i> dan <i>Smoothing</i> Sistem Utama dengan <i>Piezoelectric</i> pada Posisi Pengujian <i>Elbow Bend</i> dengan Debit Aliran 25 liter/menit (a) Translasi; (b) Voltase.	125
Gambar 12 Hasil <i>Filtering</i> dan <i>Smoothing</i> Sistem Utama dengan <i>Piezoelectric</i> pada Posisi Pengujian <i>Elbow Bend</i> dengan Debit Aliran 35 liter/menit (a) Translasi; (b) Voltase.	126

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR TABEL

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Voltase Bangkitan, <i>Displacement</i> dan Kapasitansi pada Material <i>Piezoelectric</i> (Efendy, 2017).....	14
Tabel 2. 2 Sifat Mekanik Beberapa Material <i>Piezoelectric</i> (Efendy, 2017).....	15
Tabel 3. 1 Parameter Sistem Utama	79
Tabel 3. 2 Parameter Material <i>Piezoelectric</i>	80
Tabel 3. 3 Parameter Fluida.....	81
Tabel 3. 4 Pengambilan Data Eksperimen.....	85
Tabel 4. 1 Spesifikasi <i>Clamp Piezoelectric</i>	92
Tabel 4. 2 Nilai RMS Percepatan Hasil Eksperimen Sistem Utama Tanpa <i>Piezoelectric</i>	103
Tabel 4. 3 Perbandingan Nilai RMS Percepatan Hasil Eksperimen Sistem Utama Tanpa <i>Piezoelectric</i> dan Dengan Menggunakan <i>Piezoelectric</i>	106
Tabel 4. 4 Nilai RMS Voltase Bangkitan Sistem <i>Piezoelectric</i> Variasi Debit Aliran dan Peletakkan <i>Piezoelectric</i>	107

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB I PENDAHULUAN

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sistem perpipaan banyak dibutuhkan penggunaannya salah satunya dibidang industri *oil and gas*. Sistem perpipaan di perindustrian mengalirkan fluida dengan tekanan yang tinggi sehingga menyebabkan terjadinya getaran yang terbuang. Getaran terbuang disebabkan oleh aliran yang mengalami turbulen sehingga menimbulkan terkanan fluktuasi yang memiliki potensi untuk menghasilkan energi menggunakan teknik *energy harvesting*. Teknik *energy harvesting* bertujuan untuk menggunakan hasil getaran sebagai sumber energi baru untuk memenuhi sumber listrik dengan skala yang kecil. Media untuk melakukan teknik *energy harvesting* salah satunya yaitu *piezoelectric strip* dimana alat ini cocok untuk digunakan sebagai *platform* energi tanam karena sensitivitas yang baik, dan memiliki ukuran dan berat yang ringan sehingga tidak mempengaruhi instalasi pipa.

Penelitian penggunaan *piezoelectric strip* untuk menanam energi suatu getaran di perpipaan sudah pernah dilakukan sebelumnya, salah satunya oleh M. Arafa. Pada penelitian tersebut, analisa *energy harvesting* dilakukan menggunakan pipa kuningan yang dialiri udara sebagai sistem utama. Pipa kuningan yang digunakan ditumpu oleh dua buah karet gelang fleksibel kemudian diberi gaya eksitasi oleh blower udara yang diisolasi dengan karet kopling fleksibel sehingga gaya eksitasi hanya berasal dari fluida udara. Pada penelitian ini faktor utama dalam terjadinya getaran pada pipa adalah tekanan di dalam pipa. Penelitian lain yang sudah dilakukan sebelumnya yaitu oleh S.M.Khot. Penelitian ini menggunakan metode eksperimen serta simulasi menggunakan *software* ANSYS dengan skema pengujian sistem perpipaan *loop*, dan fluida air beliau menganalisa faktor-faktor yang mempengaruhi amplitudo getaran yang terjadi pada pipa. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa faktor yang paling dominan

yang mempengaruhi amplitudo getaran yaitu debit aliran faktor diameter pipa, dan ketebalan pipa. Melihat kedua penelitian tersebut masih memiliki kekurangan yaitu pada penelitian keduanya belum menguji perbandingan getaran pada posisi pipa lurus dan *elbow*. Oleh karena itu perlu adanya penelitian lebih lanjut mengenai studi eksperimental mekanisme *piezoelectric cantilever*.

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka dilakukan analisa teknik *energy harvesting* menggunakan *piezoelectric* tipe *cantilever* yang dipasangkan pada *elbow* pada sistem perpipaan. Analisa ini dilakukan dengan melakukan sebuah percobaan sistem perpipaan tersebut. Proses teknik *energy harvesting* dilakukan ketika sistem perpipaan dialiri fluida sepanjang pipa dari pompa berlangsung. Ketika terjadi getaran saat fluida mengalir didalam pipa, getaran tersebut terdistribusi pada *piezoelectric* yang terpasang pada bagian permukaan luar sistem pipa, sehingga getaran pada mesin dapat ditangkap dan dikonversikan menjadi energi listrik. Variasi yang digunakan dalam eksperimen ini adalah debit aliran fluida, dan peletakan *piezoelectric* pada pipa. Variasi peletakan *piezoelectric* dilakukan di tiga titik yang berbeda yaitu pada pipa lurus, *elbow bend* dan ujung *elbow outlet* untuk mengetahui posisi optimal terjadinya getaran yang terbuang. Pada penelitian ini juga digunakan variasi debit aliran fluida untuk mendapat nilai bilangan Reynold yang turbulen sehingga mampu menciptakan getaran pada pipa.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang ada, didapatkan rumusan masalah penelitian adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang bangun sistem perpipaan sebagai sistem utama yang merupakan sistem massa dengan sumber getaran dari aliran fluida?
2. Bagaimana pengaruh variasi debit aliran fluida di dalam pipa terhadap karakteristik respon?
3. Bagaimana pengaruh variasi peletakan *piezoelectric* terhadap karakteristik respon?

4. Bagaimana pengaruh variasi debit aliran fluida di dalam pipa terhadap karakteristik tegangan bangkitan?
5. Bagaimana pengaruh variasi peletakan *piezoelectric* terhadap karakteristik tegangan bangkitan?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang ada, didapatkan tujuan dari penelitian adalah sebagai berikut:

1. Merancang bangun sistem perpipaan sebagai sistem utama yang merupakan sistem massa dengan sumber getaran dari aliran fluida.
2. Mengetahui pengaruh variasi debit aliran fluida di dalam pipa terhadap karakteristik respon.
3. Mengetahui pengaruh variasi peletakan *piezoelectric* terhadap karakteristik respon
4. Mengetahui pengaruh variasi debit aliran fluida di dalam pipa terhadap karakteristik tegangan bangkitan.
5. Mengetahui pengaruh variasi peletakan *piezoelectric* terhadap karakteristik tegangan bangkitan.

1.4 Batasan Masalah

1. Penelitian dititikberatkan pada alat *energy harvesting* getaran.
2. Gaya eksitasi oleh pompa dan semua getaran yang terjadi pada sistem hanya translasi arah transversal.
3. Konstanta redaman pipa dan *cantilever piezoelectric* diabaikan.
4. Getaran dari luar mekanisme diabaikan.
5. Gaya tekan yang terjadi dianggap gaya terdistribusi pada *piezoelectric*.
6. Aliran di dalam pipa *steady flow*, yaitu *properties* di setiap titik pada medan aliran tidak berubah terhadap fungsi waktu.
7. Aliran di dalam pipa *Incompressible flow*, densitasnya diasumsikan tidak berubah.

8. Percobaan dilakukan pada suhu kamar 26°C agar variasi densitas dan properti fluidanya tetap.
9. *Fully developed flow*, yaitu profil kecepatan aliran suatu fluida telah berkembang penuh dan konstan sepanjang L .
10. *Fouling factor* diabaikan, *factor* pengganggu yang menyebabkan kerugian yang dialami tiap aliran sehingga menyebabkan pengecilan diameter.
11. Aliran yang melintas pada sistem perpipaan adalah turbulen.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang dapat diperoleh dari kegiatan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Sebagai referensi dan literatur untuk penelitian *energy harvesting* pada sistem perpipaan sebagai penghasil energi listrik selanjutnya.
2. Sebagai inovasi dalam bidang *energy harvesting* dari getaran mekanik pada sistem perpipaan dan untuk pengembangan dalam skala yang lebih besar.
3. Mengetahui karakteristik energi yang dihasilkan mekanisme vibrasi *energy harvesting* untuk variasi peletakan *piezoelectric* pada pipa.
4. Mengetahui karakteristik energi yang dihasilkan mekanisme vibrasi *energy harvesting* untuk variasi debit aliran fluida didalam pipa.

BAB II

DASAR TEORI DAN TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Perpipaan

Sistem perpipaan adalah suatu sistem yang digunakan Untuk mengalirkan fluida *liquid* maupun fluida *gas* dari suatu titik ke titik lainnya. Sistem perpipaan meliputi semua komponen dari lokasi awal hingga lokasi tujuan.

2.1.1 Komponen pada Pipa

Dalam sistem perpipaan banyak sekali komponen untuk menunjang instalasi pada perpipaan, adapun komponen-komponen tersebut secara garis besar adalah sebagai berikut:

a. Pipa

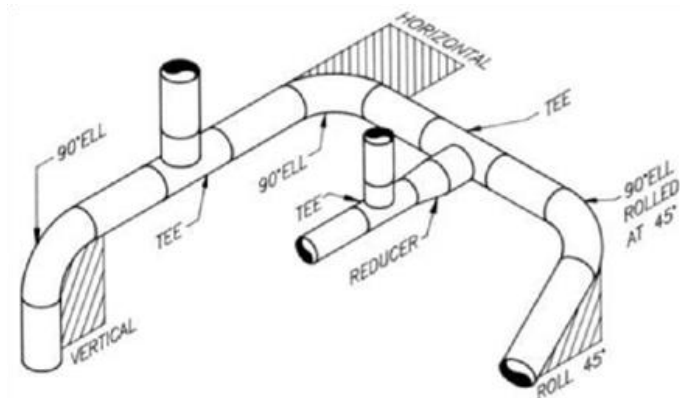
Pipa merupakan komponen utama dalam sistem perpipaan. Beberapa aspek yang perlu diperhatikan dalam proses pemilihan pipa diantaranya adalah kecepatan aliran, tekanan fluida, pemasangan sistem perpipaan, fungsi sistem perpipaan, dan sebagainya.

b. *Valve*

Valve merupakan komponen pendukung pada sistem perpipaan. Adapun fungsi dari *valve* adalah mengatur debit aliran dalam sebuah pipa, menutup atau membuka aliran, mencegah aliran balik (*one way valve*), dan mengatur tekanan.

c. *Fitting*

Fitting adalah elemen yang mempunyai bentuk dasar pipa dengan bentuk yang bermacam-macam. *Fitting* dapat berbentuk siku (*elbow*), pipa bercabang (*tee*), pipa yang berbeda ukuran antara ujungnya (*reducer*), dan lain-lain. Penggunaan berbagai *fitting* dalam sistem perpipaan dimodelkan dalam gambar 2.1.



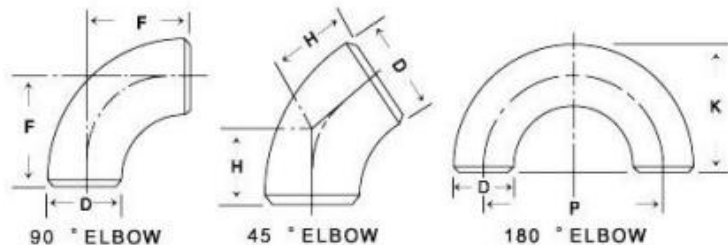
Gambar 2. 1 *Fitting* dalam Sistem Perpipaan. (Surya, 2017)

Untuk sambungan dengan pipa, *fitting* dapat dibagi menjadi jenis las (*welding end*), dan jenis uliran (*threaded end*). Beberapa *fitting* perpipaan yang umum digunakan di dalam sistem perpipaan ditunjukkan oleh gambar 2.2.



Gambar 2. 2 Macam-macam *Fitting* Perpipaan (Surya, 2017)

Sambungan siku (*Elbow*) adalah jenis *fitting* yang merupakan komponen perpipaan yang berfungsi untuk merubah arah aliran fluida. *Elbow* terdiri dari 3 jenis yang paling umum digunakan yaitu *elbow* 90, 45, dan 180 sesuai dengan kebutuhan arah belok. Berikut adalah contoh gambar *elbow* pada gambar 2.3.



Gambar 2. 3 *Fitting Elbow 90°, 45°, dan 180°* (Putranto, 2018)

2.1.2 Bahan Pipa Secara Umum

Bahan-bahan pipa yang dimaksud disini adalah struktur bahan baru pipa tersebut atau material yang digunakan pada saat pembuatan awal pipa dan dapat dibagi secara umum sebagai berikut:

1. Baja Karboon (*carbon steel*)
2. Molibdenum karbon (*carbon moly*)
3. *Galvanees*
4. Ferro nikel
5. *Stainlees steel*
6. PVC (*polyvinyl chloride*)
7. *Chrome moly*

2.2 Fluida

2.2.1 Aliran Turbulen dan Laminar

Aliran turbulen merupakan aliran dimana partikel dari fluida bercampur dengan cepat ketika bergerak bersamaan karena fluktuasi kecepatan tiga dimensi yang bergerak acak. Parameter kecepatan dan ketebalan menentukan apakah aliran tersebut dapat dikatakan aliran laminar atau aliran turbulen. Berdasarkan parameter tersebut, kondisi aliran laminar dan aliran turbulen dapat dinyatakan dalam bilangan tak berdimensi yaitu *Reynold Number*. Namun pendekatan tersebut hanya berlaku pada aliran *incompressible*. Bilangan reynolds merupakan rasio antara gaya

inersia terhadap gaya geser. Dilihat dari kecepatan aliran, menurut (Mr. Reynolds) diasumsikan/ dikategorikan laminar bila aliran tersebut mempunyai bilangan Re kurang dari 2300, Untuk aliran transisi berada pada pada bilangan Re 2300 dan 4000 biasa juga disebut sebagai bilangan Reynolds kritis, sedangkan aliran turbulen mempunyai bilangan Re lebih dari 4000. Bilangan Reynolds dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$Re_{Dh} = \frac{\rho \cdot U_{ref} \cdot D_h}{\mu} \quad (2.1)$$

Dimana :

- Re_{Dh} adalah bilangan reynolds
- ρ adalah densitas fluida
- U_{ref} adalah kecepatan aliran fluida (m/s)
- D_h adalah diameter dalam saluran (m)
- μ adalah viskositas kinematik fluida (N.m/s²)

2.2.2 Kapasitas Aliran Fluida

Kapasitas aliran yang mengalir di sejumlah titik pada suatu penampang membantu menentukan besarnya kecepatan yang mengalir pada penampang tersebut. Besarnya kecepatan fluida dapat ditentukan dengan membagi kapasitas aliran (Q) tersebut dengan luas penampang, seperti yang dirumuskan pada persamaan (2.2):

$$V = Q/A \quad (2.2)$$

dimana :

Q = debit aliran volumetrik, (m³/det)

A = luas penampang aliran, (m²)

V = kecepatan aliran fluida, (m/det)

2.2.3 Head loss

Head loss merupakan kerugian energi per satuan berat fluida dalam pengairan cairan dalam sistem perpipaan atau disebut juga sebagai kerugian *head (head loss)*. Ada beberapa faktor yang menyebabkan terjadinya *head loss*, berdasarkan faktor

penyebabnya headloss dibagi menjadi dua jenis yaitu *head loss* mayor dan minor. *Head loss* mayor dapat terjadi karena adanya gesekan atau friksi antara aliran fluida yang mengalir dengan dinding pipa. Pada umumnya kerugian ini dipengaruhi oleh panjang pipa. *Head loss* minor dapat terjadi karena adanya sambungan pipa (*fittings*) seperti katup (*valve*), belokan (*elbow*), saringan (*strainer*), percabangan (*tee*), *losses* pada bagian *entrance*, *losses* pada bagian *exit*, pembesaran pipa (*expansion*), pengecilan pipa (*contraction*), dan sebagainya. (Malau & Sitepu, 2012)

2.3 Dasar Teori Mekanika Getaran

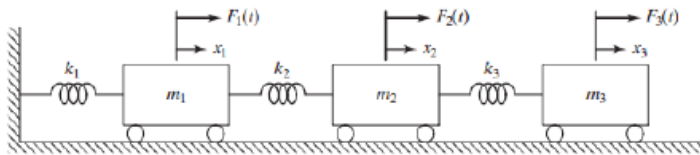
Getaran dapat didefinisikan sebagai gerakan bolak-balik suatu benda dari posisi awal melalui titik keseimbangan dengan periode, amplitudo dan frekuensi tertentu. Getaran dapat terjadi jika terdapat massa, pegas, dan peredam dalam suatu sistem. Respon getaran dari suatu sistem dipengaruhi oleh frekuensi natural yang dimiliki oleh semua benda yang memiliki massa dan konstanta pegas. Teori mekanika getaran yang digunakan sebagai landasan dan literatur pada penelitian ini mengenai Derajat Kebebasan (*Degree of Freedom*), dan *Base-Motion Vibration*. (Rao & Singiresu , 2011)

2.3.1 Derajat Kebebasan (*Degree of Freedom*)

Derajat kebebasan adalah jumlah koordinat bebas (*Independent Coordinates*) yang dibutuhkan untuk menggambarkan posisi dari sistem secara lengkap terhadap suatu referensi yang dianggap diam (Rao & Singiresu , 2011). Secara garis besar derajat kebebasan dapat dibagi menjadi dua, yaitu satu derajat kebebasan (*Single of Freedom*) untuk sistem yang gerakannya dapat digambarkan dengan satu koordinat dan multi derajat kebebasan (*Multi Degree of Freedom*) untuk sistem yang gerakannya digambarkan oleh lebih dari satu koordinat.

Pada sistem mekanik multi *degree of freedom* sering menggunakan Hukum Newton Kedua untuk membuat persamaan

gerak. Selain getaran alami dari sistem, sistem juga dapat menerima getaran paksa yang disebabkan oleh adanya gaya eksternal yang mengenai sistem, dan dinamakan *forced vibration*. Getaran mekanik paksa pada multi *degree of freedom* dimana terdapat gaya eksternal yang mengenai sistem tersebut disebut dengan *forced multi dof vibration*. Jumlah derajat kebebasan yang semakin banyak memiliki penyelesaian aljabar yang kompleks. Sehingga perlu diselesaikan dalam bentuk matriks. Pemodelan sistem MdoF dengan tiga derajat kebebasan dan tiga gaya eksitasi diilustrasikan pada gambar 2.4 sebagai berikut:



Gambar 2. 4 Sistem *Undamped* dengan 3 DOF (Rao & Singiresu, 2011)

Dari gambar 2.4 didapatkan matriks dari persamaan gerak dengan menggunakan Hukum Newton kedua yang diberikan untuk setiap massa.

$$m_i \ddot{x}_i + k_i x_i = \sum_i F_i \quad (2.3)$$

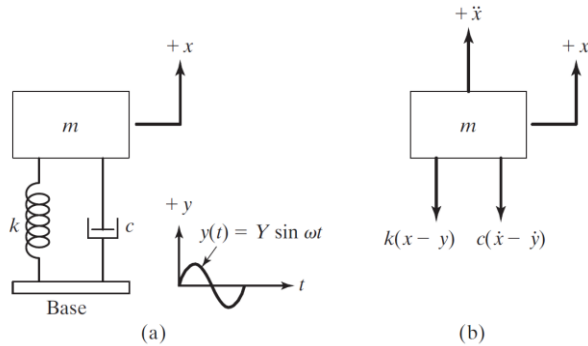
Persamaan 2.1 terdiri dari $i=1$, $i=2$ dan $i=3$ sehingga dapat ditulis dalam bentuk matriks:

$$[m] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix}; [k] = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 \\ 0 & -k_3 & k_3 \end{bmatrix}; [F] = \begin{Bmatrix} F_1(t) \\ F_2(t) \\ F_3(t) \end{Bmatrix} \quad (2.4)$$

Sehingga didapatkan persamaan matriks yang dituliskan pada persamaan (2.23) sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_3 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 \\ 0 & -k_3 & k_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1(t) \\ F_2(t) \\ F_3(t) \end{Bmatrix} \quad (2.5)$$

2.3.2 Base Motion Vibration



Gambar 2. 5 Skema *Base Motion Vibration* (Rao & Singiresu , 2011)

Gerak harmonik merupakan gerakan berulang dari sebuah sistem yang terdiri dari massa, pegas, dan peredam. Sedangkan *base motion vibration* adalah getaran pada *base* sistem utama yang bergerak secara harmonis dimana mempengaruhi massa peredam di atasnya, maka *harmonic motion of the base* merupakan pergerakan massa secara berulang terhadap *base* yang didukung oleh pegas dan peredam dalam suatu interval waktu. Gambar 2.5 mengilustrasikan pergerakan tersebut, dimana $y(t)$ merupakan simpangan dari *base* dan $x(t)$ yaitu simpangan dari massa pada posisi *static equilibrium* saat waktu t . Maka total simpangan dari pegas adalah $x - y$ dan kecepatan relatif dari damper adalah $\dot{x} - \dot{y}$ (Rao & Singiresu , 2011). Dari *free body diagram* pada gambar 2.5, didapatkan persamaan gerak sebagai berikut:

$$m\ddot{x} + c(\dot{x} - \dot{y}) + k(x - y) = 0 \quad (2.6)$$

Jika:

$$y(t) = Y \sin \omega t$$

maka persamaan (2.6) menjadi:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = c\dot{y} + ky$$

$$\begin{aligned}
 &= kY \sin \omega t + c\omega Y \cos \omega t \\
 &= A \sin(\omega t - \alpha)
 \end{aligned} \tag{2.7}$$

Dimana $A = Y\sqrt{k^2 + (c\omega)^2}$ dan $\alpha = \tan^{-1} \left[-\frac{c\omega}{k} \right]$ maka respon dari massa, $x_p(t)$ menjadi:

$$x_p(t) = \frac{Y\sqrt{k^2+(c\omega)^2}}{\sqrt{(k-m\omega^2)^2+(c\omega)^2}} \sin(\omega t - \phi_1 - \alpha) \tag{2.8}$$

$$\phi_1 = \tan^{-1} \left(-\frac{c\omega}{k-m\omega^2} \right) \tag{2.9}$$

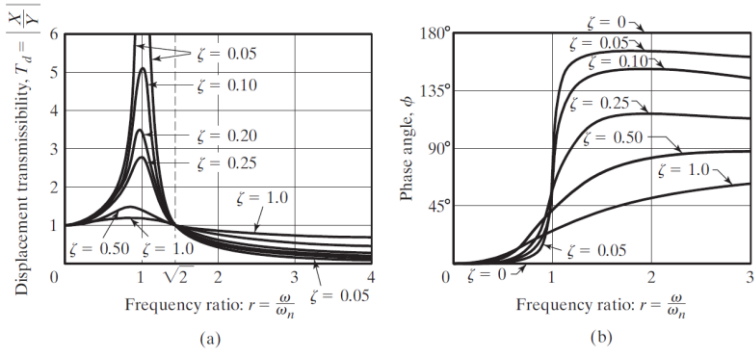
Dengan menggunakan identitas trigonometri, maka persamaan di atas dapat ditulis sebagai berikut:

$$x_p(t) = X \sin(\omega t - \phi) \tag{2.10}$$

Dimana nilai X dan ϕ didapat dari:

$$\frac{X}{Y} = \frac{\sqrt{k^2+(c\omega)^2}}{\sqrt{(k-m\omega^2)^2+(c\omega)^2}} \text{ dan } \phi = \tan^{-1} \left(\frac{mc\omega^2}{k(k-m\omega^2)-(c\omega)^2} \right) \tag{2.11}$$

Dimana $\frac{X}{Y}$ merupakan *displacement transmissibility*. Gambar 2.6 di bawah merupakan grafik hubungan *displacement transmissibility* dan sudut fase dengan rasio frekuensi pada sistem *base motion vibration*.




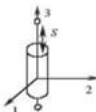



Gambar 2. 6 Grafik Hubungan (a) Amplitudo *Ratio* dengan *Frequency Ratio*, (b) *Phase Angle* dengan *Frequency Ratio* (Rao & Singiresu , 2011)

2.4 *Piezoelectric*

Piezoelectric adalah suatu alat dengan material yang mampu merubah energi mekanik yang berasal dari tekanan atau gaya dari luar menghasilkan medan listrik. Hal ini terjadi akibat adanya muatan yang berbeda antar partikel dalam *piezoelectric*. Untuk memanfaatkan energi mekanik dari suatu susunan alat *piezoelectric* harus tersambung dengan struktur utama yang bergerak, sehingga energi mekanik dapat berpindah dengan efektif. Material *piezoelectric* yang dikenai gaya eksternal atau mengalami defleksi, menyebabkan jarak antar partikel tersebut berubah. Perubahan jarak antar partikel tersebut menyebabkan terjadinya beda tegangan yang disebut dengan *Pull-in Voltage*. Karakteristik energi bangkitan dari material *piezoelectric* dapat dilihat di dalam Tabel 2.1.

Tabel 2. 1 Voltase Bangkitan, *Displacement* dan Kapasitansi pada Material *Piezoelectric* (Efendy, 2017)

Action Mode (L , length; W , width; T , thickness; D , diameter)	Generated Voltage, V	Displacement, ΔL (ΔT)	Capacitance, C
Transverse length mode: $L > 3W > 3T$	$V = \frac{g_{31}}{W} F$	$\Delta L = \frac{d_{31} L}{T} V$	$C = \frac{\epsilon_1^T L W}{T}$
			
Thickness extension mode: $D > 5T$	$V = \frac{4Tg_{33}}{\pi D^2} F$	$\Delta T = d_{33} V$	$C = \frac{\pi \epsilon_3^T D^2}{4T}$
			
Radial mode: $D > 5T$	Not applied	$\Delta D = \frac{d_{31} D}{T} V$	$C = \frac{\pi K_1^T \epsilon_0 D^2}{4}$
			
Longitudinal mode: $L > 3D$	$V = \frac{4L}{\pi D^2} g_{33} F$	$\Delta L = d_{33} V$	$C = \frac{\pi D^2}{4L} K_1^T \epsilon_0$
			
Thickness shear mode: $W > 5T, L > 5T$	$V = \frac{g_{15}}{W} F$	$\Delta x = d_{15} V$	$C = \frac{LW}{T} K_1^T \epsilon_0$
			

Note: F is the force and ϵ_3^T is dielectric permittivity of the material at constant stress in direction 3, K_1^T is relative dielectric constant ($K_1^T = \epsilon_1^T / \epsilon_0$), and ϵ_0 is dielectric permittivity in vacuum.

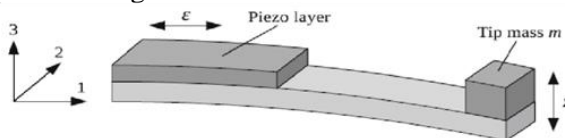
Energi bangkitan berbeda tergantung dari bentuk *piezoelectric*, besarnya energi bangkitan tersebut dipengaruhi oleh sifat mekanik dari *piezoelectric* yang dipilih. Energi bangkitan juga dipengaruhi oleh energi atau usaha mekanik yang diterima oleh material *piezoelectric*. Berikut merupakan tabel yang menunjukkan sifat mekanik untuk beberapa material *piezoelectric*.

Tabel 2. 2 Sifat Mekanik Beberapa Material *Piezoelectric*
(Efendy, 2017)

Property	Units	PVDF Film	PZT	BaTiO3
<i>Density</i>	103 kg/m ³	1.78	7.5	5.7
<i>Relative Permittivity</i>	ϵ/ϵ_0	12	1200	1700
d_{31} Constant	(10 ⁻¹²) C/N	23	110	78
g_{31} Constant	(10 ⁻³) Vm/N	216	10	5
k_{31} Constant	% at 1 KHz	12	30	21
<i>Acoustic Impedance</i>	(10 ⁶) kg/m ³ .sec	2.7	30	30

2.4.1 Cantilever Piezoelectric

Cantilever piezoelectric adalah *piezoelectric* yang berbentuk *cantilever* dengan bagian atas dan bawah *cantilever* terdapat material *piezoelectric transducer* (PZT). Material *cantilever piezoelectric* dapat dimodelkan sebagai sebagai pegas dengan bentuk *cantilever beam* yang dilengkapi dengan massa pada ujungnya. Defleksi yang terjadi adalah arah tiga searah dengan sumbu z, dan regangan yang terjadi adalah arah satu searah sumbu x, sedangkan gaya yang diterima oleh *piezoelectric* adalah pada arah tiga searah arah sumbu z.



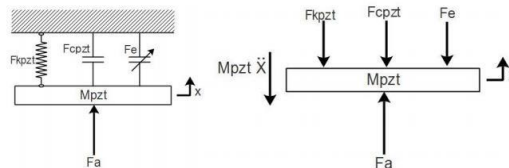
Gambar 2. 7 *Cantilever Piezoelectric* (Efendy, 2017)

2.4.2 *Piezoelectric Voltage Constant*

Electromechanical coupling factor, k , merupakan indikator efektifitas material *piezoelectric* dalam mengubah energi listrik ke energi mekanik atau mengubah energi mekanik ke energi listrik. *Electromechanical coupling factor*, k , disertai dua buah subscript, dimana dalam hal direct effect subscript pertama menunjukkan arah energi listrik yang dihasilkan dan subscript kedua menunjukkan arah dari energi mekanik yang diberikan. Nilai k tergantung pada spesifikasi yang diberikan oleh *supplier* keramik, yang merupakan nilai maksimum secara teoritis. Pada frekuensi rendah, elemen *piezoelectric* keramik tertentu dapat mengubah 30% - 75% dari energi yang diberikan padanya ke bentuk lain tergantung pada komposisi material *piezoelectric* dan arah pembebanan yang diberikan. Nilai k tinggi mencerminkan efisiensi konversi energi, pada umumnya tidak memperhitungkan *dielectric losses* atau *mechanical losses*. Ketelitian pengukuran efisiensi ditentukan berdasar pada rasio konversi energi (rasio energi yang dihasilkan dengan energi yang diterima). Berdasar pada pengukuran tersebut, elemen *piezoelectric* dengan desain sistem yang baik dapat menghasilkan efisiensi mencapai 90%. (Efendy, 2017)

2.4.3 *Analisa Material Piezoelectric*

Ketika material *piezoelectric* diberikan suatu gaya maka *piezoelectric* tersebut mengalami defleksi. Untuk mendapatkan persamaan gerak dari material *piezoelectric* maka perlu dianalisa *Free Body Diagram* seperti ditunjukkan pada gambar 2.8.



Gambar 2. 8 *Free Body Diagram Cantilever Piezoelectric*
(Efendy, 2017)

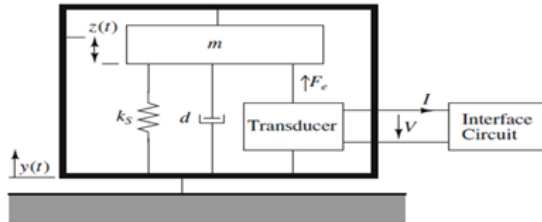
Keseimbangan gaya:

$$\begin{aligned}
 Fa &= Mpzt \cdot \ddot{x} + Fcpzt + Fkpzt + Fe \\
 Fa(t) &= Mpzt \ddot{x}(t) + Cpzt \dot{x}(t) + kpzt x(t) + \Theta Vp(t)
 \end{aligned}
 \tag{2.12}$$

Keterangan:

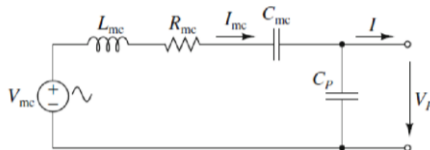
- Fa = gaya eksitasi (N)
- Mpzt = massa *piezoelectric* (kg)
- Cpzt = *damping* dari *cantilever beam* (N.s/m)
- kpzt = konstanta pegas *piezoelectric* (N/m)
- Θ = *coupling factor*

Untuk model dinamis pemanen energi kinetik dari *cantilever piezoelectric* dapat dimodelkan sebagai susunan massa pegas yang diberikan gaya harmonis. Susunan massa pegas tersebut dilengkapi dengan rangkaian elektrik *energy harvesting*. Model tersebut dapat dilihat pada gambar 2.9. (Efendy, 2017)



Gambar 2. 9 Model Pemanen Energi Kinetik Menggunakan *Cantilever Piezoelectric* (Efendy, 2017)

Dari gambar 2.9 di atas maka didapatkan rangkaian listrik ekuivalen yang sesuai. Rangkaian listrik tersebut dapat dilihat pada gambar 2.10



Gambar 2. 10 Rangkaian Listrik Pemanen Energi Kinetik (Efendy, 2017)

Persamaan rangkaian listrik ekuivalen pada gambar 2.10 di atas dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$V_{mc} = L_{mc} \frac{dI_{mc}}{dt} + R_{mc} I_{mc} + \frac{1}{C_{mc}} \int I_{mc} dt + V_p \quad (2.13)$$

dengan:

$$\begin{aligned} V_{mc} &= \frac{F_i}{\Gamma} & L_{mc} &= \frac{M}{\Gamma^2} \\ \Gamma &= \sqrt{k_{31} k_p C_p} & R_{mc} &= \frac{d_p}{\Gamma^2} & C_{mc} &= \frac{\Gamma^2}{k_p} \end{aligned}$$

dimana :

- Fi = Gaya lendutan dari eksitasi (N)
- M = Massa (Kg)
- dp = Konstanta *damping* ekuivalen *piezoelectric* (Ns/m)
- kp = Konstanta pegas ekuivalen *piezoelectric* (N/m)
- Cp = Kapasitansi *piezoelectric* (Farad)
- Fe = Gaya elektromekanik
- n = Jumlah *Piezoelectric*
- Γ = *electromechanical factor piezoelectric*

2.5 Penelitian Terdahulu

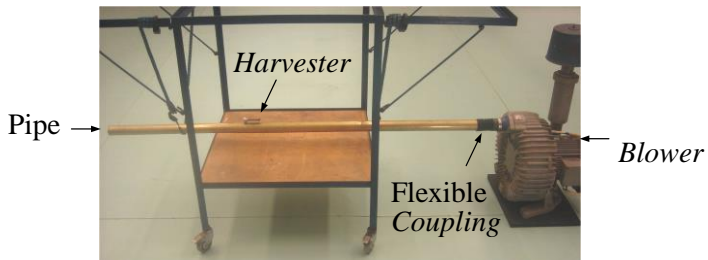
Penelitian terdahulu yang digunakan sebagai referensi diantaranya penelitian mengenai getaran pada sistem perpipaan, dan *cantilever piezoelectric*.

2.5.1 “Energy Harvesting of Gas Pipeline Vibration” oleh M.Arafa

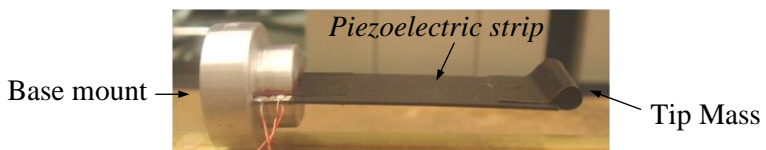
Penelitian tentang *energy harvesting* pada pipa sebelumnya yaitu pada tahun 2010 oleh M. Arafaa, W. Akhb, M. Majeedc, K. Al-Hussaind dan A. Bazle berjudul “*Energy Harvesting of Gas Pipeline Vibration*” (Arafa.M, Akl. W, Majeed. M, Al-Hussain. K, & Baz. A, 2010). Penelitian tersebut bertujuan untuk mengetahui desain optimal yang dapat memberi nilai *output* maksimum pada *piezoelectric*. Metodologi penelitian dilakukan perancangan sistem, simulasi dengan *software*, dan eksperimen.

Pada perancangan distem, dijelaskan bahwa *piezoelectric* (PZT) *cantilever* dipasang pada pipa yang dialiri fluida gas dari blower.

Simulasi sistem dinamis dilakukan dengan finite element menggunakan *software* ANSYS untuk menentukan simulasi numerik distribusi tekanan pada struktur antarmuka fluida pada pipa untuk menghasilkan aliran yang turbulen, dan simulasi menggunakan fluida didalam pipa dimodelkan menggunakan LES (*Large Eddy Simulation*) model turbulen. Eksperimen dilakukan menggunakan *blower* udara, dan pipa kuningan. Pipa diisolasi dari getaran *blower* dengan cara dipasangkan kopling karet yang fleksibel.



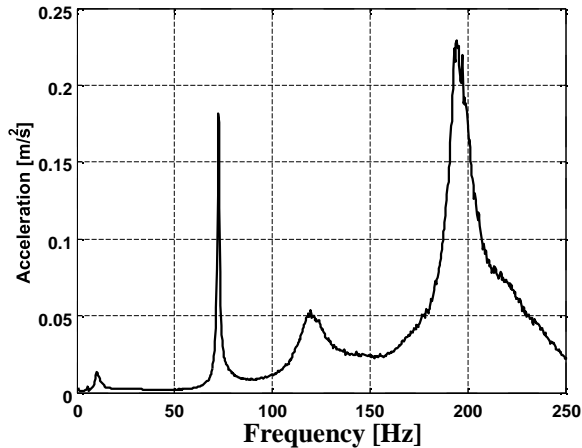
Gambar 2. 11 Pengaturan Eksperimen (Arafa.M, Akl. W, Majeed. M, Al-Hussain. K, & Baz. A, 2010)



Gambar 2. 12 *Piezoelectric strip*® harvester. (Arafa.M, Akl. W, Majeed. M, Al-Hussain. K, & Baz. A, 2010)

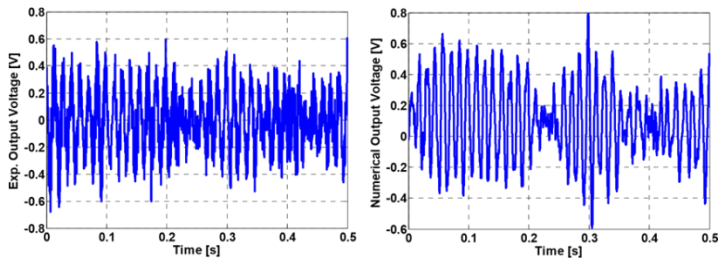
Hasil pengamatan dari eksperimen didapatkan pada bagian pipa yang diletakkan *piezoelectric harvester* kemudian didapatkan grafik untuk mengetahui besaran percepatan dan tegangan keluaran yang dihasilkan oleh getaran pada pipa.

Diantaranya grafik hubungan akselerasi terhadap frekuensi yang dapat dilihat pada gambar 2.13 di bawah, grafik hubungan voltase bangkitan terhadap frekuensi getaran yang dapat dilihat pada gambar 2.14 (a) di bawah, grafik hubungan voltase *output* terhadap domain waktu dan grafik hubungan *output voltage* dengan domain frekuensi (b) di bawah.

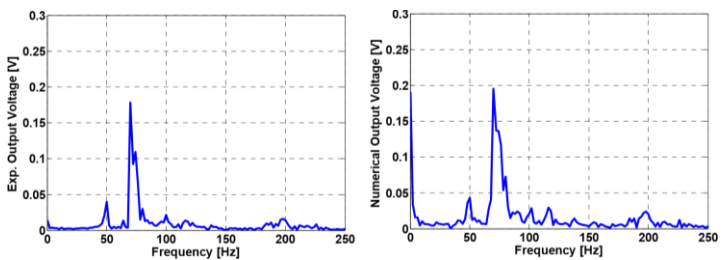


Gambar 2.13 Akselerasi Dinding Pipa Ditempat Terpasangnya *harvester* (Arafa.M, Akl. W, Majeed. M, Al-Hussain. K, & Baz. A, 2010)

Pada gambar 2.13 dapat diketahui bahwa pengaruh penambahan frekuensi getaran dapat memberi efek yang berbeda terhadap akselerasi getaran pada pipa yang diukur menggunakan *accelerometer*. Hal ini untuk mengidentifikasi aliran yang menyebabkan getaran secara natural. Akselerasi dinding pipa yang diukur dilakukan ditempat terpasangnya *harvester*.



(a)



(b)

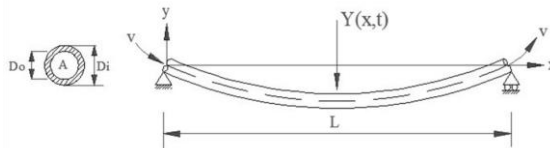
Gambar 2. 14 (a) Grafik Hubungan *Output Voltage* dengan Domain Waktu, (b) Grafik Hubungan *Output Voltage* dengan Domain Frekuensi (Arafa.M, Akl. W, Majeed. M, Al-Hussain. K, & Baz. A, 2010)

Gambar 2.14 di atas menunjukkan perbandingan eksperimen dan numerik dari *output* voltase terhadap domain waktu dan frekuensi secara urut. Dari hasil diatas dapat diindikasikan bahwa hasil eksperimen sudah hampir sesuai dengan prediksi numeriknya. Dari hasil dapat dilihat bahwa terdapat puncak yang jelas pada natural frekuensi pertama. Kontribusi yang kecil diamati dari frekuensi natural yang lebih tinggi dispektrum dari voltase bangkitan.

2.5.2 “*Experimental and Simulation Study of flow Induced Vibration Through Straight Pipes*” Oleh S. M. Khot

Penelitian tentang *energy harvesting* pada pipa terdahulu selanjutnya yaitu pada tahun 2017 oleh S. M. Khot, Pallavi Khaire,

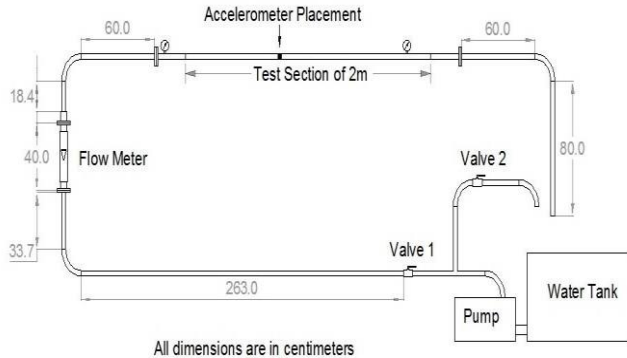
dan Abhishek S. Naik Bazle berjudul “*Experimental and Simulation Study of flow Induced Vibration Through Straight Pipes*” (Khot, Khaire, & Naik, 2017). Penelitian tersebut bertujuan untuk mempelajari efek dari faktor-faktor yang berkontribusi dalam terjadinya getaran pada pipa menggunakan teori, eksperimen, dan teknik simulasi dengan analisa getaran. Metodologi penelitian dilakukan perancangan sistem, simulasi dengan *software*, dan eksperimen. Pada perancangan sistem dijelaskan sifat dari fluida yang mengalir melalui pipa. Iyan Grant menjelaskan bahwa fluida yang mengalir pada tekanan tertentu, dan memiliki massa jenis pada kecepatan konstan yang melewati luas potong sebuah pipa yang terdefleksi menyebabkan terjadinya akselerasi sentrifugal karena adanya perubahan lengkungan pada pipa yang terdeformasi. Akselerasi ini berlawanan dengan komponen vertikal dari tekanan fluida yang diberikan ke elemen fluida dan gaya tekanan F per panjang unit yang diterapkan pada elemen fluida dari dinding pipa. Gambar 2.15 menunjukkan pipa dengan defleksi transversal $Y(x,t)$ dari posisi ekuilibriumnya.



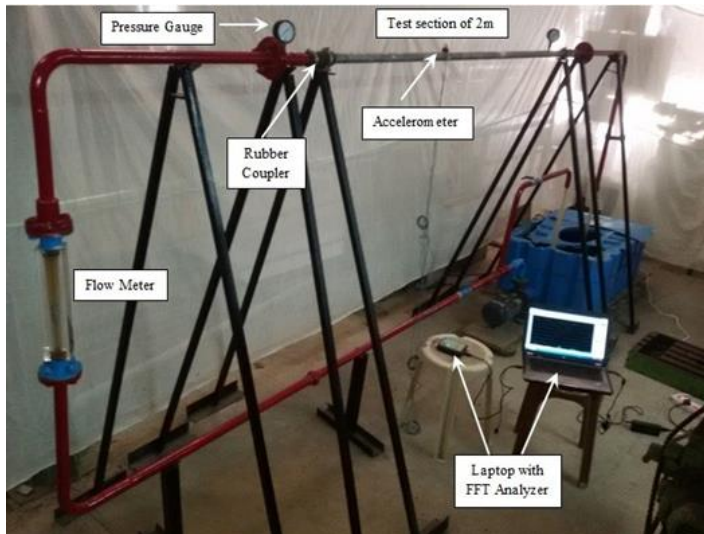
Gambar 2. 15 Pipa yang Dialiri Fluida dengan Dijepit di Kedua Ujungnya (Khot, Khaire, & Naik, 2017)

Simulasi sistem getaran dilakukan menggunakan *software* ANSYS. Analisa sistem getaran dinamis terdiri dari analisa modal dan harmonik. Analisa modal bertujuan untuk mendapatkan frekuensi natural sistem dari getaran. Analisa model matematika untuk aliran fluida diselesaikan menggunakan MATLAB untuk mendapatkan nilai amplitudo dari getaran. Jangkauan frekuensi sekisar 0-700 Hz. Analisa harmonik bertujuan untuk mendapatkan plot frekuensi-amplitudo. Eksperimen dilakukan sesuai dengan perencanaan dengan memvariasikan beberapa komponen yaitu

diameter, ketebalan, dan *discharge*. Skema eksperimen aliran fluida dan komponen dapat dilihat pada gambar 2.16 dan 2.17.

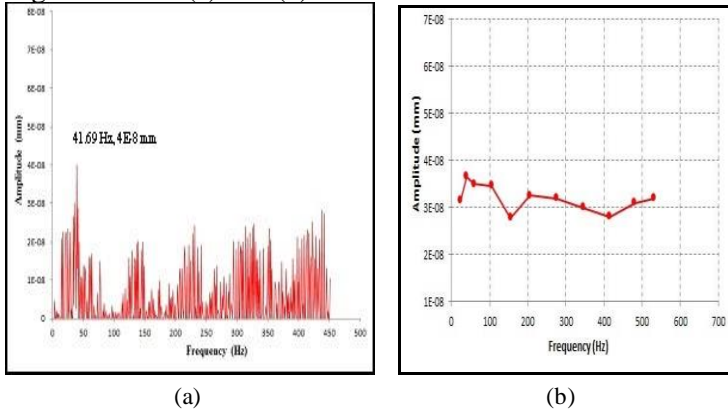


Gambar 2. 16 Skema *Loop* Aliran Fluida Pada Pipa (Khot, Khaire, & Naik, 2017)

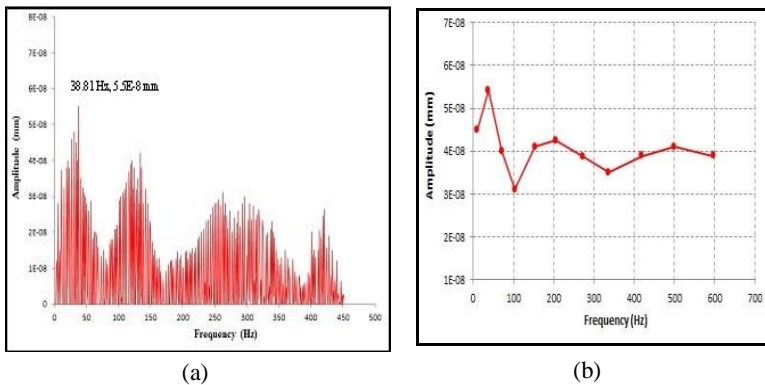


Gambar 2. 17 Eksperimen Getaran pada Pipa (Khot, Khaire, & Naik, 2017)

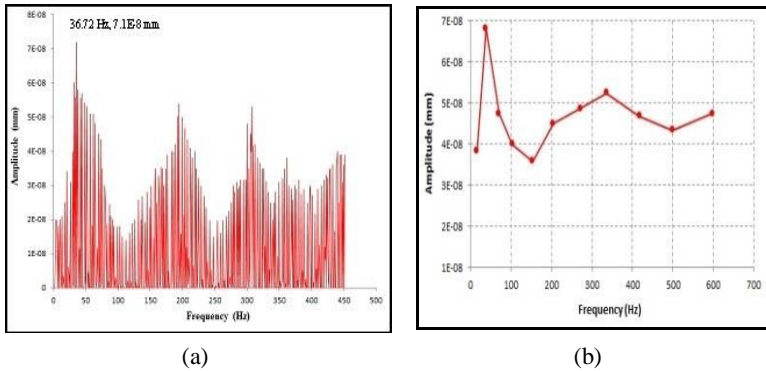
Hasil dari perbandingan eksperimen dan simulasi dengan variasi beberapa nilai parameter dibentuk kedalam grafik. Diantaranya grafik hubungan amplitudo terhadap frekuensi dengan variasi *discharge* pada gambar 2.18 (a) dan (b), 2.19 (a) dan (b), dan gambar 2.20 (a) dan (b).



Gambar 2. 18 Grafik Frekuensi untuk Diameter 24mm, Ketebalan 2.4mm, dan *Discharge* 90 lpm (a) *Experimental* (b) *Simulation* (Khot, Khaire, & Naik, 2017)



Gambar 2. 19 Grafik Frekuensi untuk Diameter 24mm, Ketebalan 2.4mm, dan *Discharge* 120 lpm (a) *Experimental* (b) *Simulation* (Khot, Khaire, & Naik, 2017)



Gambar 2. 20 Grafik Frekuensi untuk Diameter 24mm, Ketebalan 2.4mm, dan *Discharge* 150 lpm (a) *Experimental* (b) *Simulation* (Khot, Khaire, & Naik, 2017)

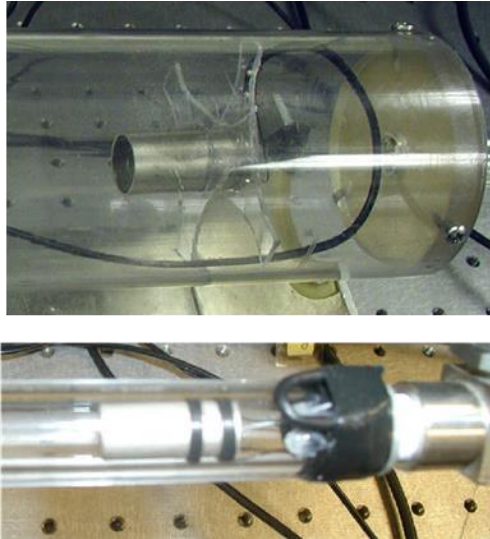
Gambar 2.18 (a), 2.19 (a) dan 2.20 (a) menunjukkan grafik eksperimen dan gambar 2.18 (b), 2.19 (b) dan 2.20 (b) menunjukkan grafik simulasi untuk diameter 24 mm, ketebalan 2.4 mm pada *discharge* 90 lpm, 120 lpm dan 150 lpm secara berurutan. Dari grafik dapat dilihat bahwa amplitudo getaran pada pipa yang dialiri fluida meningkat berbanding lurus dengan meningkatnya laju aliran volumetrik untuk jangkauan aliran tertentu, meningkatnya diameter pada pipa berbanding terbalik dengan peningkatan amplitudo untuk nilai *discharge* tertentu, dan peningkatan ketebalan berbanding terbalik dengan peningkatan amplitudo getaran pada nilai *discharge* tertentu. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa faktor yang paling dominan yang mempengaruhi amplitudo getaran yaitu *discharge* pada aliran sebesar 87.305%, diikuti faktor diameter yang berkontribusi sebesar 9.63%, dan ketebalan sebagai kontribusi paling kecil yang mempengaruhi amplitudo sebesar 2.32%.

2.5.3 “Power Generation in Pipeline: Report” Oleh Dipen N. Sinha

Penelitian tentang *energy harvesting* pada pipa terdahulu selanjutnya yaitu pada tahun 2005 oleh Dipen N. Sinha berjudul “*Power Generation in Pipeline: Report*” (Sinha, 2005). Penelitian tersebut bertujuan untuk mengeksplorasi kemungkinan dari tenaga bangkitan pada *pipeline natural gas* yang dialiri fluida gas didalam pipa yang memproduksi getaran menggunakan teori, dan eksperimen dengan analisa getaran. Metodologi penelitian dilakukan perancangan sistem dan eksperimen. Pada perancangan sistem dijelaskan bahwa *piezoelectric* (PZT) silinder dipasang didalam suatu tabung. *Piezoelectric* silinder yang digunakan penelitian ini terdiri dari dua jenis yaitu pertama terbuat dari PZT material dan yang kedua dari *piezofilm* yang bekerja cukup efisien dan menghasilkan sinyal *output* 10 kali mV meskipun pada kondisi aliran yang rendah. Eksperimen dilakukan sesuai dengan perencanaan dengan memvariasikan ukuran *piezoelectric* silinder.

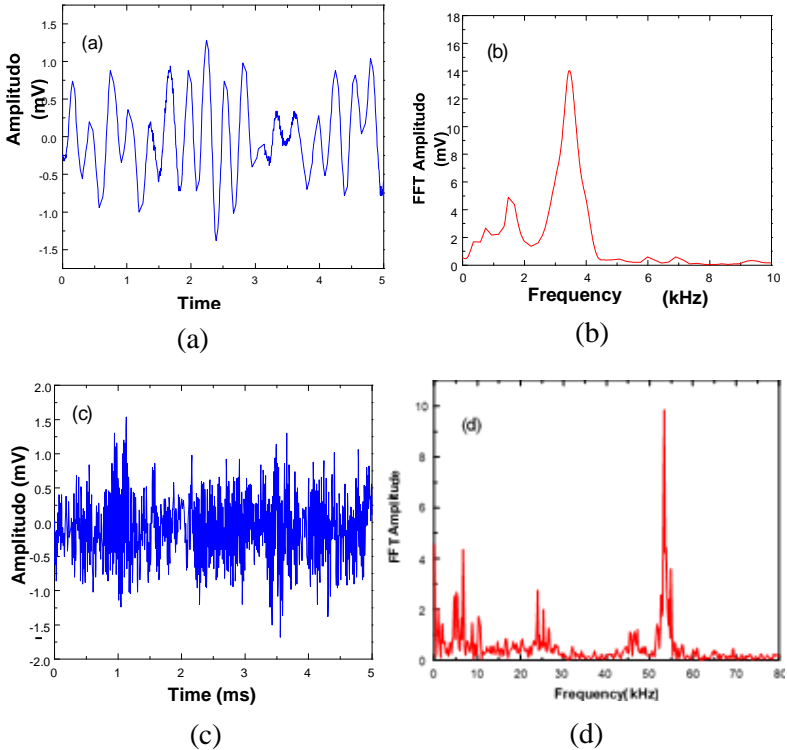


Gambar 2. 21 Eksperimen Getaran pada Pipa *Plexiglas* Menggunakan Fluida Gas Nitrogen (Sinha, 2005)



Gambar 2. 22 Dua *Piezoelectric* Silinder yang Berbeda Sebagai Variasi Penelitian (Sinha, 2005)

Variasi penelitian ini yaitu *piezoelectric* silinder, yang pertama pada gambar 2.22 atas dengan diameter 2-cm dan panjang 4 cm sedangkan pada gambar di bawahnya yaitu pada diameter 1 cm dan panjang 2.5 cm. Hasil dari eksperimen dengan variasi beberapa nilai parameter dibentuk kedalam grafik. Diantaranya grafik hubungan amplitudo dengan waktu pada gambar 2.23 (a) yang menunjukkan sinyal elektrik yang diproduksi dengan menggunakan *piezoelectric* silinder dengan diameter 2 cm, dan hubungan *fourier transform* amplitudo terhadap frekuensi pada gambar 2.23 (b), sedangkan pada gambar 2.23 (c) dan (d) data yang sama dengan variasi ukuran silinder yang lebih kecil yang terbuat dari *piezofilm*.



Gambar 2. 23 Grafik Hubungan Amplitudo dengan Waktu (a) dan (c), Grafik Hubungan FfT Amplitudo dengan Frekuensi (b) dan (d), Grafik dengan Data yang Sama dengan Variasi Ukuran *Piezoelectric* Silinder (Sinha, 2005)

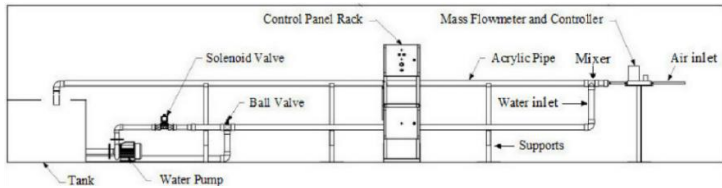
Dari grafik diatas kita dapat mengetahui karakteristik getaran pada aliran fluida pada tabung. Grafik diatas menunjukkan bahwa pada gambar 2.23 (b) dan (d) merepresentasikan frekuensi resonansi pada tabung. Data-data ini didapatkan dari Fourier transform pada data waktu. Sedangkan pada gambar 2.23 (a) dan (c) menunjukkan hubungan amplitudo getaran terhadap waktu. Dari grafik diatas dapat disimpulkan bahwa semakin besar ukuran

piezoelectric silinder yang digunakan dalam eksperimen maka menghasilkan amplitudo yang lebih tinggi.

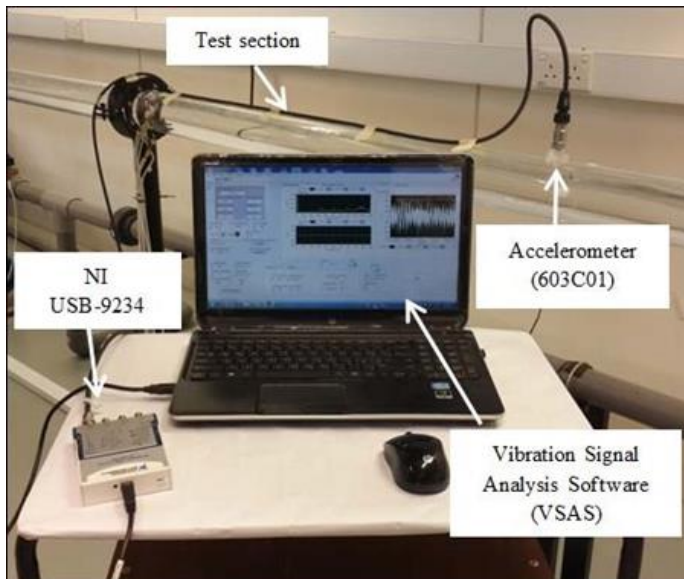
Sinyal voltase yang diproduksi dari masing-masing tabung dicatat langsung pada *oscilloscope* digital tanpa ada amplifikasi. Nilai keluaran voltase meningkat secara linier dengan peningkatan aliran fluida. Pada debit aliran yang tinggi aliran mengandung spektrum yang lebih luas dengan mode getaran yang bermacam-macam. Menurut peneliti untuk menghasilkan voltase menggunakan alat piezomaterial yang memiliki ukuran kecil (3 x 3) sangat lah memungkinkan, diperkirakan piezomaterial dapat memproduksi 10 mV untuk aliran dengan perbedaan tekanan dibawah 30 psi. (Sinha, 2005)

2.5.4 “Experimental Investigation on the Vibration Induced by Slug Flow in Horizontal Pipe” oleh Zahid I. Al-Hashimy

Penelitian tentang *energy harvesting* pada pipa terdahulu selanjutnya yaitu pada tahun 2016 oleh Dipen N. Sinha berjudul “*Experimental Investigation on the Vibration Induced by Slug Flow in Horizontal Pipe*” (Al-Hashimy, Al-Kayiem, & Time, 2016). Penelitian tersebut bertujuan untuk meningkatkan pemahaman getaran pada pipa horizontal dengan debit aliran yang rendah dan dalam jangkauan frekuensi yang rendah dan untuk mengusulkan metode pendekatan analisa untuk mayoritas sistem perpipaan menggunakan teori dan eksperimen dengan analisa getaran. Metodologi penelitian dilakukan perancangan sistem dan eksperimen. Eksperimen dilakukan untuk menginvestigasi interaksi struktur fluida dengan mengukur getaran yang dihasilkan pada segmen pipa yang dialiri fluida dengan sistem loop. Air diinjeksikan ke aliran dengan sistem *loop* dengan debit aliran yang bervariasi. Pengaruh dari kecepatan air yang rendah pada saluran pipa nantinya dianalisa, dan amplitudo serta frekuensi pada saluran pipa dihitung. Eksperimen dilakukan sesuai dengan perencanaan dengan memvariasikan kecepatan fluida.

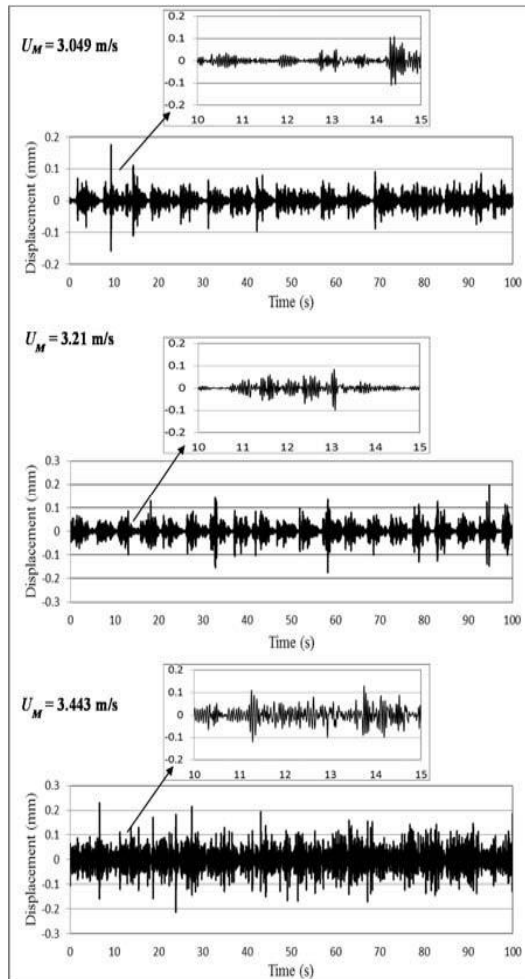


Gambar 2. 24 Diagram Skematik dari Fasilitas Tes untuk Eksperimen (Al-Hashimy, Al-Kayiem, & Time, 2016)



Gambar 2. 25 Pengaturan Eksperimen Getaran pada Pipa untuk Sistem *Vibration Data Acquisition and Analysis (VDAA)* (Al-Hashimy, Al-Kayiem, & Time, 2016)

Hasil dari eksperimen dengan variasi beberapa nilai parameter dibentuk kedalam grafik. Diantaranya grafik hubungan perpindahan getaran arah Y terhadap waktu dengan variasi kecepatan aliran yang rendah yang dapat dilihat pada gambar 2.26.



Gambar 2. 26 Grafik Hubungan Perpindahan Getaran Arah Y Terhadap Waktu dengan Variasi Kecepatan Rendah Fluida (Al-Hashimy, Al-Kayiem, & Time, 2016)

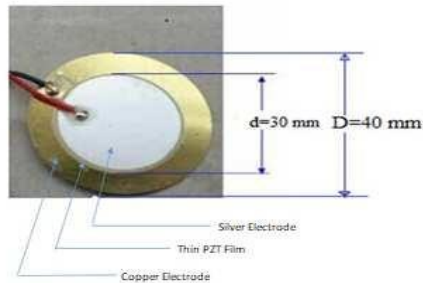
Grafik diatas menunjukkan hasil getaran diukur dengan sistem VDAA yang dikembangkan. Kecepatan rendah campuran

U_M pada grafik diatas dihasilkan dari penjumlahan kecepatan rendah dari air U_{SW} dan kecepatan rendah dari udara U_{SG} , sehingga nilai U_M selalu lebih besar dari kecepatan rendah dari air dan udara. Grafik diatas menunjukkan bahwa getaran pada pipa memiliki karakteristik yang acak, namun seiring dengan meningkatnya kecepatan rendah campuran mengakibatkan meningkatnya perpindahan getaran arah Y pada pipa.

2.5.5 “*Experimental Investigation of Piezoelectric Energy Harvesting with Turbulent Flow*” oleh Sanchita Abrol & Deepak Chhabra

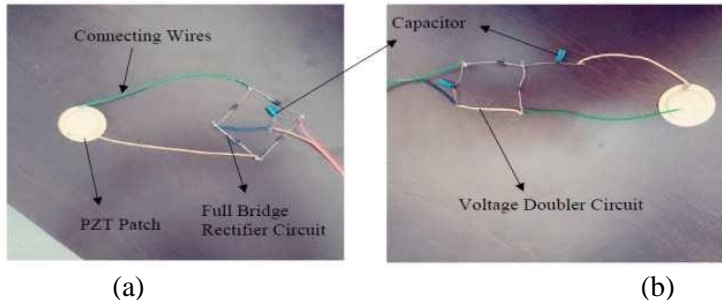
Penelitian tentang *energy harvesting* pada pipa terdahulu yang terakhir yaitu pada tahun 2018 oleh Sanchita Abrol & Deepak Chhabra berjudul “*Experimental Investigation of Piezoelectric Energy Harvesting with Turbulent Flow*”. Penelitian tersebut bertujuan untuk meningkatkan pemahaman getaran pada pipa horizontal dengan debit aliran yang rendah dan dalam jangkauan frekuensi yang rendah dan untuk mengusulkan metode pendekatan analisa untuk mayoritas dari sistem perpipaan menggunakan teori dan eksperimen dengan analisa getaran. Metodologi penelitian dilakukan perancangan sistem dan eksperimen.

Eksperimen dilakukan untuk menginvestigasi interaksi struktur fluida dengan mengukur getaran yang dihasilkan pada segmen pipa yang dialiri fluida dengan sistem loop. Air diinjeksikan ke aliran dengan sistem loop pada debit aliran yang bervariasi. Pengaruh dari kecepatan air yang rendah pada saluran pipa nantinya dianalisa dan amplitudo serta frekuensi pada saluran pipa dihitung. Eksperimen dilakukan sesuai dengan perencanaan dengan memvariasikan kecepatan fluida. Variasi dalam percobaan pada penelitian ini adalah jenis sirkuit yang digunakan (*Full-bridge rectifiers* dan *Voltage doubler circuits*) dan jumlah *piezoelectric* disetiap sirkuit. *PZT piezo-patch* dapat dilihat dari gambar 2.27.



Gambar 2. 27 PZT Piezo-patch (Abrol & Chhabra, 2018)

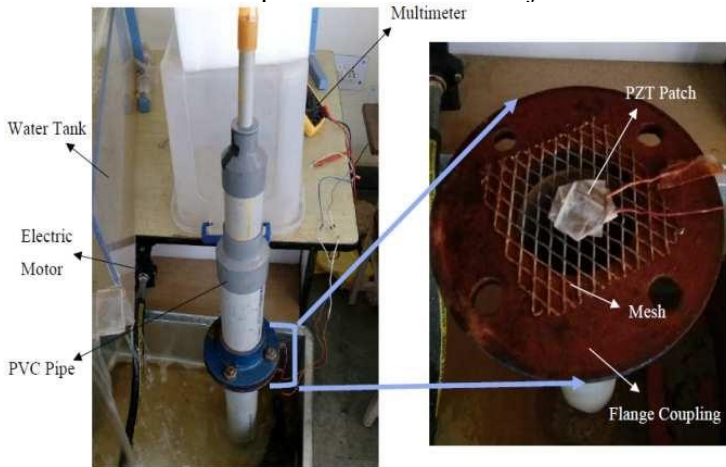
Piezoelectric patch menghasilkan *output* listrik AC, sehingga dibutuhkan sebuah alat untuk mengubah arus listrik menjadi DC. Untuk mengubah arus listrik digunakan *Full-bridge rectifiers* dan *Voltage doubler circuits*. Gambar 2.28 adalah *piezoelectric patch* yang dihubungkan dengan *Full-bridge rectifiers* dan *Voltage doubler circuits*.



Gambar 2. 28 (a): PZT Patch with Full Bridge Rectifier Circuit
(b): PZT Patch with Voltage Doubler Circuit (Abrol & Chhabra, 2018)

Model mekanikal dari penelitian ini terbuat dari pipa PVC dimana dipotong dibagian tengahnya dan dihubungkan oleh flange bearing dan kencangkan oleh baut dan mur. *Piezoelectric patch* dibungkus oleh *tape* untuk meningkatkan ketahanan ketika aliran air

menghantam permukaan untuk melepaskan voltase elektrik. Voltase diukur menggunakan multimeter yang dipasang pada ujung rectifier circuit. Teknik *energy harvesting* dengan menggunakan model ini dapat digunakan ketika suplai air *continuous*, dimana memiliki rentang dari aliran yang rendah seperti pada keperluan rumah tangga, dan lain-lain hingga aliran air yang tinggi seperti di sungai, bendungan, air terjun, dan lain-lain. Gambar 2.29 merupakan detail model kerja.



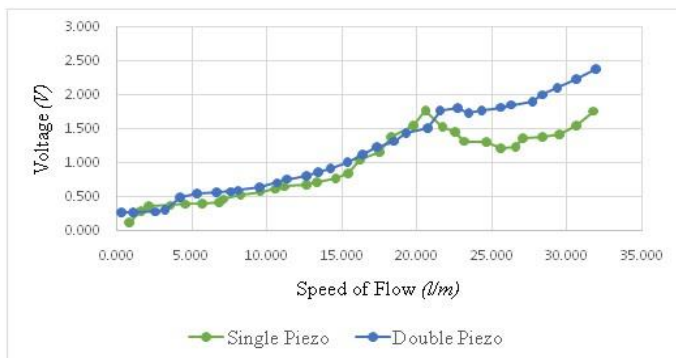
Gambar 2. 29 (a): *Working Model of the Energy Harvester* (b) *Housing of Piezoelectric Patches di Dalam Flange Coupling* (Abrol & Chhabra, 2018)

Tangki air digunakan untuk menyimpan dan menyuplai air ke sistem. Motor elektrik digunakan untuk men-resikurlasi aliran air. Aliran yang diukur menggunakan sistem pengukuran aliran air, yang terdiri dari *bypass control valve*, dan *flow control valve* untuk menjaga aliran air sudah sesuai. Gambar 2.30 menjelaskan sistem pengukuran aliran air yang digunakan dalam eksperimen untuk mengontrol dan mengukur debit aliran fluida.

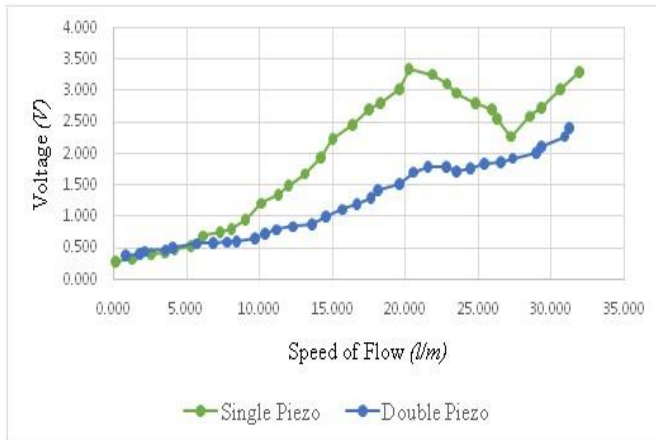


Gambar 2. 30 Sistem Pengukuran Aliran Air (Abrol & Chhabra, 2018)

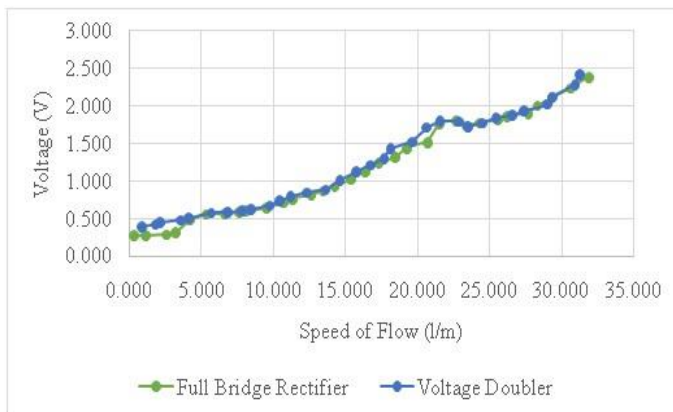
Hasil dari eksperimen dengan variasi jenis sirkuit yang digunakan (*Full-bridge rectifiers* dan *Voltage doubler circuits*) dan jumlah *piezoelectric* disetiap sirkuit dibentuk kedalam grafik. Diantaranya grafik hubungan perpindahan getaran arah Y terhadap waktu dengan variasi kecepatan aliran yang rendah yang dapat dilihat pada gambar



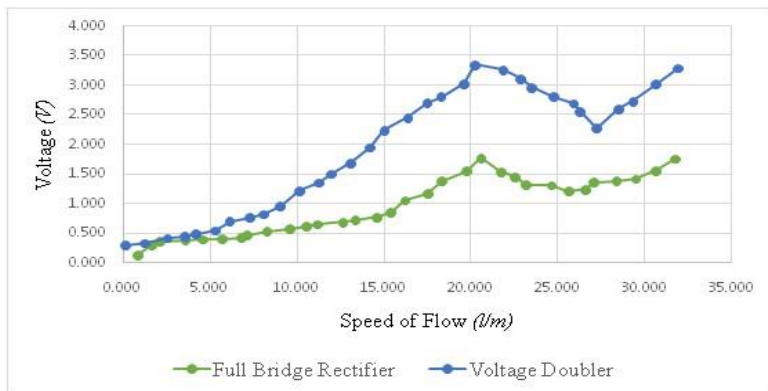
Gambar 2. 31 Perbandingan dari Voltase yang Dihasilkan dari PZT Menggunakan *Single* dan *Double Patches* untuk *Full Bridge Rectifier Circuit* (Abrol & Chhabra, 2018)



Gambar 2.32 Perbandingan dari Voltase yang Dihasilkan dari PZT Menggunakan *Single* dan *Double Patches* untuk *Voltage Doubler Circuit* (Abrol & Chhabra, 2018)



Gambar 2.33 Perbandingan dari Voltase yang Dihasilkan dari PZT Menggunakan *Single Piezo Patch* (Abrol & Chhabra, 2018)



Gambar 2. 34 Perbandingan dari Voltase yang Dihasilkan dari PZT Menggunakan *Double Piezo Patch (Parallel Connection)* (Abrol & Chhabra, 2018)

Voltase *output* dihasilkan oleh *single* dan *double PZT patches* dan diuji menggunakan tekanan dinamis dari air. Tegangan yang dihasilkan dari *patches* diukur pada debit aliran air yang berbeda dan hasil untuk sistem *full bridge rectifier* and *voltage doubler circuit* dirangkum dan dibandingkan dalam Gambar 2.31 dan Gambar 2.32. graifk menunjukkan bahwa debit aliran yang optimal untuk *single piezo patch* adalah 20-23 liter/menit dan *double piezo patch*, dalam koneksi paralel, adalah 30-32 liter/menit. Dengan peningkatan debit aliran air, *output* tegangan meningkat secara signifikan dalam semua kasus. Tegangan *output* untuk kedua *patch* lebih besar untuk *voltage doubler circuit*.

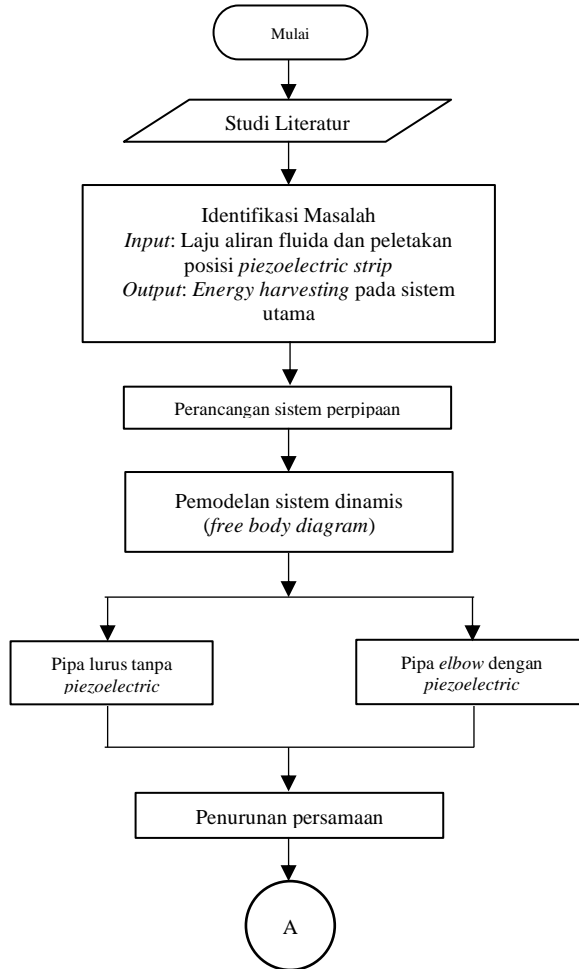
Perbandingan tegangan *output* untuk dua *patch* telah disajikan pada Gambar 2.33 dan Gambar 2.34. Perlu dicatat bahwa *output* tegangan yang dihasilkan dari *double piezo patch* lebih besar dari *single piezo* untuk rangkaian *full bridge rectifier*. Produksi tegangan relatif meningkat terhadap kecepatan benturan air yaitu dengan meningkatnya kecepatan air yang datang. Sirkuit PZT *patch* dengan *patch single piezo* dapat memberikan tegangan maksimum 3,348 V pada kecepatan aliran optimal 20,250 liter/menit sedangkan dalam kasus *patch double piezo*, tegangan

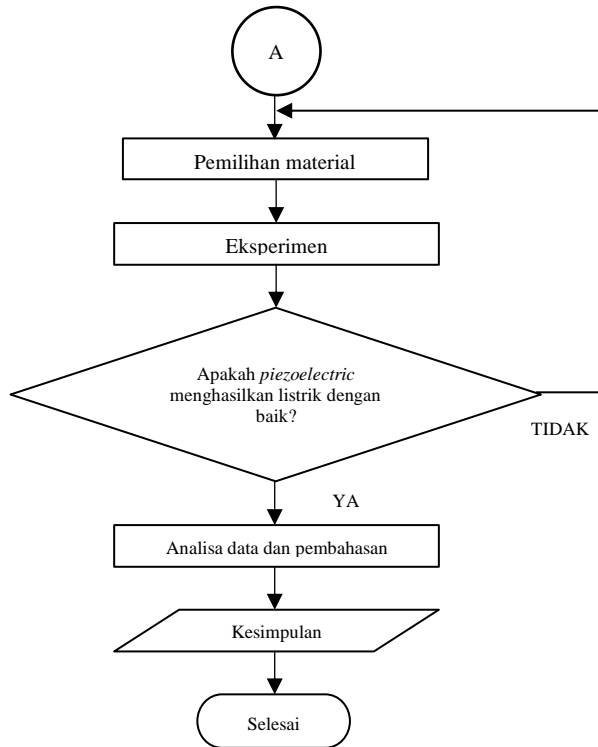
maksimum yang dihasilkan adalah 2,420 V pada 31,266 liter/menit. Perlu juga dicatat bahwa ada kasus khusus untuk kecepatan aliran 20-21 liter / mnt dalam rangkaian *full bridge rectifier* dimana bermanfaat untuk menggunakan *single piezo patch* selama mampu memberikan lebih banyak tegangan daripada *double piezo patch* di *parallel connection circuit*.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 *Flowchart* Penelitian

Langkah-langkah yang dilakukan dalam penelitian ini ditunjukkan dengan *Flowchart* penelitian pada gambar 3.1 berikut:





Gambar 3. 1 *Flowchart* Penelitian

3.2 Penjelasan *Flowchart* Penelitian

Penelitian ini terdiri dari beberapa tahap dan perlu dilakukan pemahaman terhadap metode-metode agar memperoleh hasil yang diinginkan. Metode pengerjaan penelitian tugas akhir telah dijelaskan secara garis besar oleh *flowchart* penelitian pada gambar 3.1. Penjelasan secara rinci mengenai *flowchart* penelitian adalah sebagai berikut:

3.2.1 Studi Literatur

Studi literatur merupakan langkah awal yang dilakukan pada penelitian ini, dengan mengumpulkan referensi-referensi yang terkait dengan penelitian ini baik dari *textbook*, tugas akhir sebelumnya, dan jurnal internasional. Beberapa topik yang di ambil dari referensi tersebut antara lain tentang multi *degree of freedom*, *base motion vibration*, *energy harvesting*, mekanika fluida. Referensi ini nantinya digunakan sebagai penunjang dalam analisa *energy harvesting* dan lebih terfokus pada penerapannya di sistem perpipaan.

3.2.2 Identifikasi Masalah

Identifikasi masalah pada penelitian ini terdiri dari dua bagian, yaitu *input* dan *output*. *Input* yang diberikan pada penelitian ini yaitu variasi posisi peletakkan *piezoelectric* dan variasi debit aliran fluida didalam pipa. Sedangkan *output* yang didapatkan pada penelitian ini yaitu tegangan listrik sebagai energi bangkitan yang dihasilkan dari sistem utama.

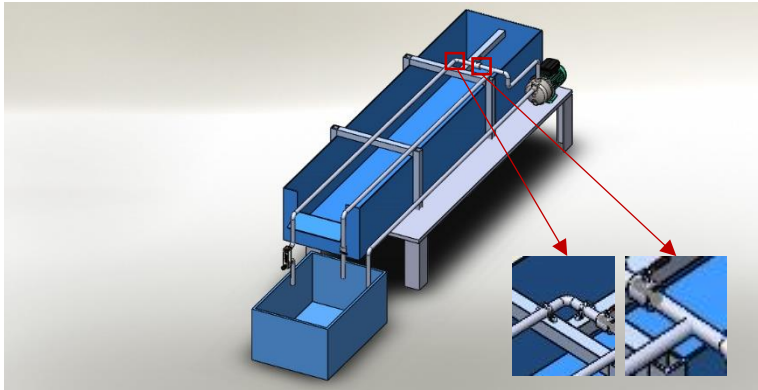
3.2.3 Perancangan Mekanisme Sistem Utama dan *Piezoelectric*

Berikut merupakan penjelasan dari mekanisme sistem utama yaitu sistem perpipaan pada bagian pipa lurus, pipa *elbow* 90 dan *piezoelectric* yang digunakan:

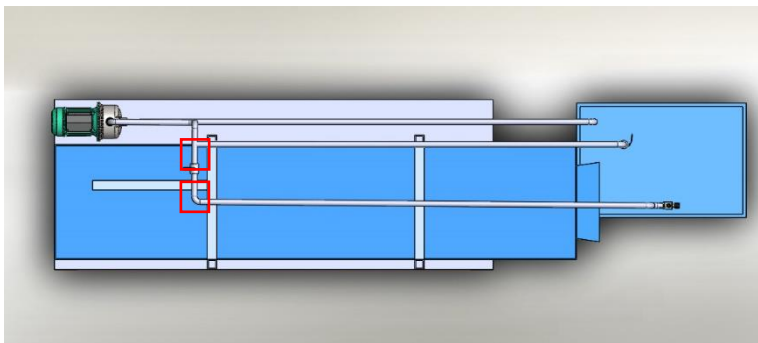
3.2.3.1 Perancangan Mekanisme Sistem Utama

Sistem utama yang dianalisa adalah sistem perpipaan. Berikut merupakan spesifikasi dari pipa yang digunakan.

Jenis Pipa	: Pipa lurus dan pipa <i>elbow</i> 90
Merk	: Wavin
Tipe	: AW
Bahan	: PVC
Diameter	: 1 inch



(a)



(b)

Gambar 3. 2 Rangkaian Sistem Perpipa-an dan Bagian yang Ditinjau (a) Tampak Isometrik (b) Tampak Atas

Penelitian ini dilakukan ketika sistem perpipa-an dialiri oleh fluida air menggunakan pompa dengan daya masuk 1.1 kW dan daya keluar 0.4 kW sistem perpipa-an *loop*. Debit aliran diatur oleh *valve* dan diukur dengan *flowmeter* untuk menentukan variasi debit aliran yang telah ditentukan yaitu 35 liter/menit, 25 liter/menit, dan 15 liter/menit sehingga terjadi aliran turbulen.

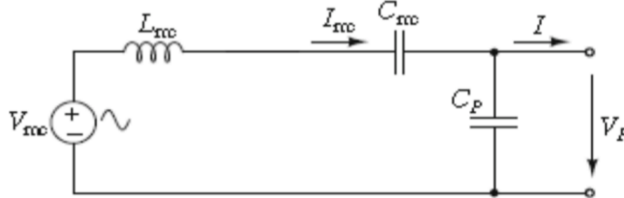
3.2.3.2 Pemodelan Kelistrikan *Piezoelectric*

Alat yang digunakan untuk mengubah energi kinetik menjadi arus listrik yaitu *piezoelectric*. Dalam peletakkannya, *piezoelectric* diletakkan pada *clamp* yang sudah dipasang PCB. Berikut merupakan spesifikasi dari *piezoelectric* yang digunakan.



Gambar 3. 3 *Piezoelectric*

Gambar 3.4 merupakan diagram sirkuit kelistrikan dari material *piezoelectric*. Material *piezoelectric* menghasilkan energi listrik apabila terjadi defleksi pada material tersebut. Energi listrik tersebut terdiri dari voltase, arus listrik, dan daya bangkitan.



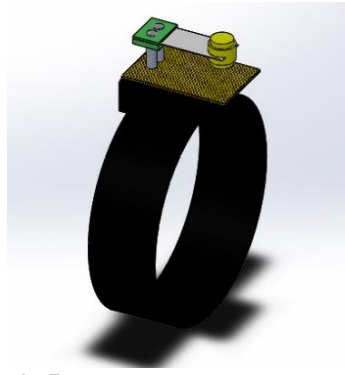
Gambar 3. 4 Diagram Sirkuit Elektromagnetik *Cantilever Piezoelectric*

Dimana:

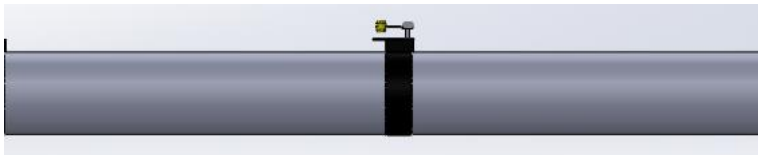
- F_i : Gaya lendutan dari eksitasi (N)
- M : Massa (Kg)
- d_s : Konstanta *damping* ekuivalen *piezoelectric* (Ns/m)
- k_s : Konstanta pegas ekuivalen *piezoelectric* (N/m)
- C_s : Kapasitansi *piezoelectric* (Farad)

Posisi peletakkan *piezoelectric* yang dianalisa pada penelitian ini yaitu pada pipa lurus dan *elbow* 90. Gambar 3.5 dan 3.6 merupakan *piezoelectric* dan *clamp* berikut merupakan sistem

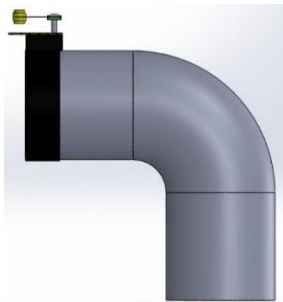
utama telah dipasang *piezoelectric* dengan *clamp* yang dianalisa pada penelitian ini.



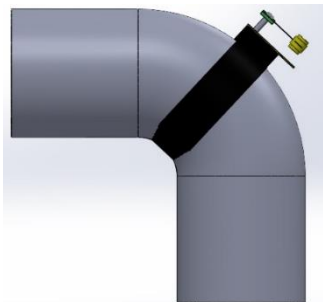
Gambar 3. 5 Model *Clamp* dan *Piezoelectric*



(a)



(b)



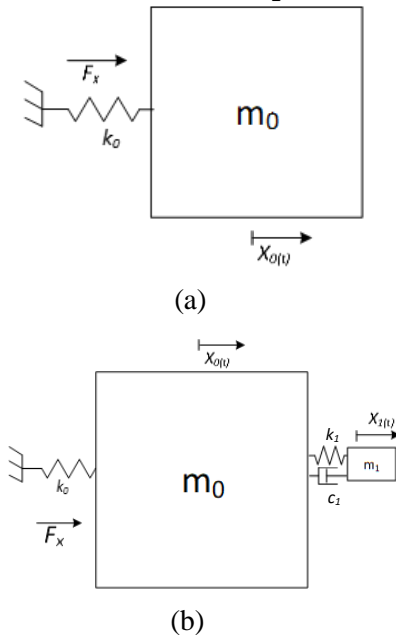
(c)

Gambar 3. 6 Sistem Utama Tampak Atas yang Telah Dipasang *Piezoelectric* (a) Pipa Lurus, (b) *Elbow 90* Posisi *Outlet* dan (c) *Elbow 90* Posisi *Bend*

3.2.4 Pemodelan Sistem Dinamis

Setelah mengetahui perancangan mekanisme *Piezoelectric* dan peletakkannya pada system perpipaan, maka langkah selanjutnya yaitu menentukan model dinamis dari sistem utama. Model dinamis dari sistem utama dilakukan untuk memudahkan dalam penentuan *Free body diagram* (FBD). Gambar 3.7 berikut merupakan pemodelan sistem dinamis pada sistem utama tanpa *piezoelectric* dan sistem utama dengan *piezoelectric*

3.2.4.1 Pemodelan Sistem Dinamis Pipa Lurus



Gambar 3. 7 Model Dinamis Pipa Lurus (a) Tanpa *Piezoelectric*
(b) Dengan *Piezoelectric*

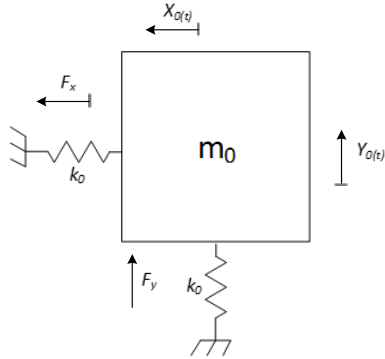
Keterangan:

m_0 : Massa utama

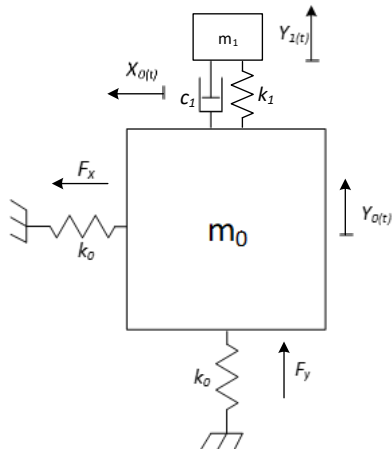
m_1 : Massa *piezoelectric*

- k_0 : Konstanta pegas massa utama
 k_1 : Konstanta pegas *piezoelectric*
 c_1 : Konstanta redaman *piezoelectric*
 F_x : Gaya eksitasi dari fluida arah X
 $X_{0(t)}$: *Displacement* massa utama arah X

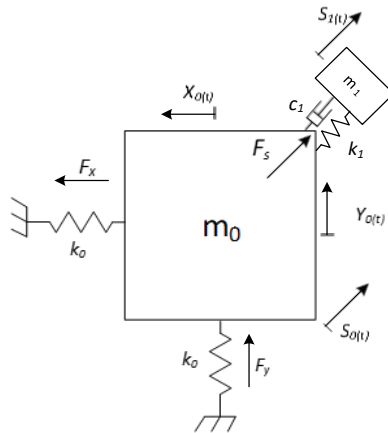
3.2.4.2 Pemodelan Sistem Dinamis Pipa *Elbow*



(a)



(b)



(c)

Gambar 3. 8 Model Dinamis Pipa *Elbow* (a) Tanpa *piezoelectric* (b) Dengan *Piezoelectric* Di Posisi *Outlet* (c) Dengan *Piezoelectric* Di Posisi *Bend*

Keterangan:

- m_0 : Massa utama
- m_1 : Massa *piezoelectric*
- k_0 : Konstanta pegas massa utama
- k_1 : Konstanta pegas *piezoelectric*
- c_1 : Konstanta redaman *piezoelectric*
- F_x : Gaya eksitasi dari fluida arah X
- F_y : Gaya eksitasi dari fluida arah Y
- F_s : Gaya eksitasi dari fluida di belokan *elbow*
- $X_{0(t)}$: *Displacement* massa utama arah X
- $Y_{0(t)}$: *Displacement* massa utama arah Y
- $S_{0(t)}$: *Displacement* massa utama arah S

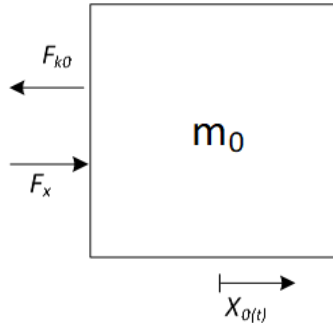
3.2.5 Penurunan Persamaan Gerak

Setelah mengetahui pemodelan sistem dinamis dari sistem perpipaan maka dapat diketahui *Free body diagram* (FBD) dari

sistem massa utama. Penentuan FBD ini memudahkan dalam menentukan persamaan gerak. Berikut merupakan persamaan gerak sistem utama tanpa *piezoelectric* dan dengan *piezoelectric*:

3.2.5.1 Sistem Utama Tanpa *Piezoelectric*

A. Pipa lurus



Gambar 3. 9 Free Body Diagram Massa Pipa Lurus

Keterangan:

m_0 : Massa pipa

F_{k_0} : Gaya pegas dari pipa

F_x : Gaya eksitasi fluida arah sumbu X

$X_{0(t)}$: *Displacement* massa utama arah X

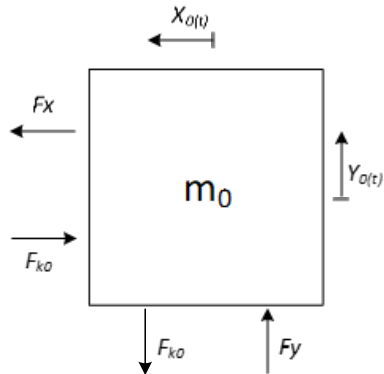
Besarnya masing-masing gaya yaitu:

$$F_{k_0} = k_0 x_0$$

Berdasarkan persamaan diatas, maka didapat persamaan gerak translasi terhadap sumbu X pada pipa (m_0) sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 +\uparrow \sum F &= m_0 \ddot{x}_0 \\
 F_x - F_{k_0} &= m_0 \ddot{x}_0 \\
 m_0 \ddot{x}_0 + k_0 x_0 &= F_x
 \end{aligned}$$

B. Pipa *elbow*



Gambar 3. 10 Free Body Diagram Massa Pipa Elbow

Keterangan:

m_0 : Massa pipa

F_{k_0} : Gaya pegas dari pipa

F_y : Gaya eksitasi fluida arah sumbu Y

F_x : Gaya eksitasi fluida arah sumbu X

$Y_{0(t)}$: *Displacement* massa utama arah Y

$X_{0(t)}$: *Displacement* massa utama arah X

Besarnya masing-masing gaya yaitu:

$$F_{k_{0x}} = k_0 x_0$$

$$F_{k_{0y}} = k_0 y_0$$

Berdasarkan persamaan diatas, maka didapat persamaan gerak translasi terhadap sumbu X pada pipa (m_0) sebagai berikut :

$$+\leftarrow \sum F = m_0 \ddot{x}_0$$

$$F_x - F_{k_{0x}} = m_0 \ddot{x}_0$$

$$m_0 \ddot{x}_0 + k_0 x_0 = F_x$$

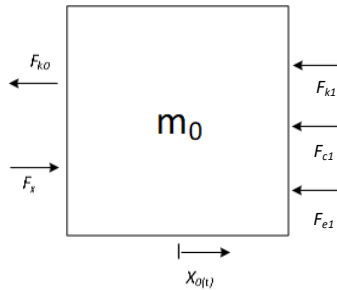
Berdasarkan persamaan diatas, maka didapat persamaan gerak translasi terhadap sumbu y pada pipa (m_0) sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 +\uparrow \sum F &= m_0 \ddot{y}_0 \\
 F_y - F_{k_{0y}} &= m_0 \ddot{y}_0 \\
 m_0 \ddot{y}_0 + k_0 y_0 &= F_y
 \end{aligned}$$

3.2.5.2 Sistem Utama dengan *Piezoelectric*

A. Sistem Utama Pipa Lurus dengan *Piezoelectric*

- Persamaan Gerak Pipa Lurus (m_0)



Gambar 3. 11 *Free Body Diagram* Massa Pipa (m_0)

Keterangan:

- m_0 : Massa pipa
- F_{k_0} : Gaya pegas dari pipa
- F_{k_1} : Gaya pegas ekuivalen dari *piezoelectric*
- F_{c_1} : Gaya redaman ekuivalen dari *piezoelectric*
- F_x : Gaya eksitasi fluida arah sumbu X
- F_{e_1} : Gaya elektromekanik ekuivalen dari *piezoelectric*
- $X_{0(t)}$: *Displacement* massa utama arah X

Besarnya masing-masing gaya yaitu:

$$F_{k_0} = k_0 x_0$$

$$F_{k_1} = k_1 (x_0 - x_1)$$

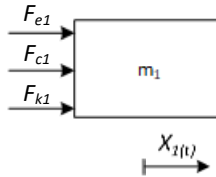
$$F_{c_1} = c_1 (\dot{x}_0 - \dot{x}_1)$$

$$F_{e_1} = n \Gamma k_v (x_0 - x_1)$$

Berdasarkan persamaan diatas, maka didapat persamaan gerak translasi terhadap sumbu X pada pipa (m_0) sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 + \rightarrow \sum F &= m_0 \ddot{x}_0 \\
 F_x - F_{k_0} - F_{k_1} - F_{c_1} - F_{e_1} &= m_0 \ddot{x}_0 \\
 m_0 \ddot{x}_0 + c_1 (\dot{x}_0 - \dot{x}_1) + k_0 x_0 + k_1 (x_0 - x_1) + n \Gamma k_v (x_0 - x_1) &= F_x \\
 &= F_x \\
 m_0 \ddot{x}_0 + c_1 \dot{x}_0 - c_1 \dot{x}_1 + (k_0 + k_1 + n \Gamma k_v) x_0 - (k_1 + n \Gamma k_v) x_1 &= F_x
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

- Persamaan Gerak *Piezoelectric* 1 (m_1)



Gambar 3. 12 *Free Body Diagram* Massa *Piezoelectric*

Keterangan:

- m_1 : Massa *Piezoelectric*
- F_{k_1} : Gaya pegas dari *Piezoelectric*
- F_{c_1} : Gaya redaman dari *piezoelectric*
- F_{e_1} : Gaya elektromekanik dari *piezoelectric*
- $X_{1(t)}$: *Displacement* massa *piezoelectric* arah X

Besarnya masing-masing gaya yaitu:

$$\begin{aligned}
 F_{k_1} &= k_1 (x_0 - x_1) \\
 F_{c_1} &= c_1 (\dot{x}_0 - \dot{x}_1) \\
 F_{e_1} &= n \Gamma k_v (x_0 - x_1)
 \end{aligned}$$

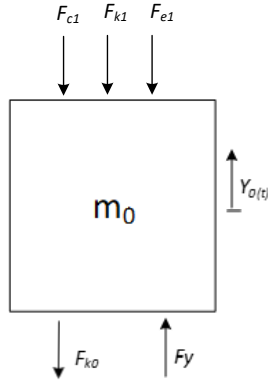
Berdasarkan persamaan diatas, maka didapat persamaan gerak translasi terhadap sumbu X pada *piezoelectric* 1 (m_1) sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 + \rightarrow \sum F &= m_1 \ddot{x}_1 \\
 F_{k_1} + F_{c_1} + F_{e_1} &= m_1 \ddot{x}_1 \\
 m_1 \ddot{x}_1 - c_1(\dot{x}_0 - \dot{x}_1) - k_1(x_0 - x_1) - n \Gamma k_v(x_0 - x_1) &= 0 \\
 m_1 \ddot{x}_1 - c_1 \dot{x}_0 + c_1 \dot{x}_1 - (k_1 + n \Gamma k_v)x_0 + (k_1 + n \Gamma k_v)x_1 &= 0
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

Matriks dari persamaan diatas adalah sebagai berikut:

$$\begin{pmatrix} m_0 & 0 \\ 0 & m_1 \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_0 \\ \ddot{x}_1 \end{Bmatrix} + \begin{pmatrix} c_1 & -c_1 \\ -c_1 & c_1 \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_0 \\ \dot{x}_1 \end{Bmatrix} + \begin{pmatrix} (k_0 + k_1 + n \Gamma k_v) & -(k_1 + n \Gamma k_v) \\ -(k_1 + n \Gamma k_v) & k_1 + \Gamma k_v \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} x_0 \\ x_1 \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} F_x \\ 0 \end{pmatrix} \tag{3.3}$$

B. Sistem Utama Pipa *Elbow* dengan *Piezoelectric* di Posisi *Outlet*



Gambar 3. 13 *Free Body Diagram* Massa Sistem Utama (m_0)

Keterangan:

- m_0 : Massa pipa
- F_{k0} : Gaya pegas dari pipa
- F_{k1} : Gaya pegas dari *piezoelectric*
- F_{c1} : Gaya redaman dari *piezoelectric*
- F_y : Gaya eksitasi fluida arah sumbu Y

F_{e1} : Gaya elektromekanik dari *piezoelectric*
 $Y_{0(t)}$: *Displacement* massa utama arah Y

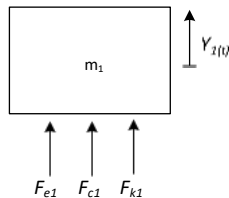
Besarnya masing-masing gaya yaitu:

$$\begin{aligned}
 F_{k_0} &= k_0 y_0 \\
 F_{k_1} &= k_1 (y_0 - y_1) \\
 F_{c_1} &= c_1 (\dot{y}_0 - \dot{y}_1) \\
 F_{e_1} &= n \Gamma k_v (y_0 - y_1)
 \end{aligned}$$

Berdasarkan persamaan diatas, maka didapat persamaan gerak translasi terhadap sumbu y pada pipa (m_0) sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 +\uparrow \sum F &= m_0 \ddot{y}_0 \\
 F_y - F_{k_0} - F_{k_1} - F_{c_1} - F_{e_1} &= m_0 \ddot{y}_0 \\
 m_0 \ddot{y}_0 + c_1 (\dot{y}_0 - \dot{y}_1) + k_0 y_0 + k_1 (y_0 - y_1) + n \Gamma k_v (y_0 - y_1) &= F_y \\
 &= F_y \\
 m_0 \ddot{y}_0 + c_1 \dot{y}_0 - c_1 \dot{y}_1 + (k_0 + k_1 + n \Gamma k_v) y_0 - (k_1 + n \Gamma k_v) y_1 &= F_y \quad (3.4)
 \end{aligned}$$

- Persamaan Gerak *Piezoelectric* 1 (m_1)



Gambar 3. 14 *Free Body Diagram* Massa *Piezoelectric*

Keterangan:

m_1 : Massa *piezoelectric*
 F_{k1} : Gaya pegas dari *piezoelectric*
 F_{c1} : Gaya redaman dari *piezoelectric*
 F_{e1} : Gaya elektromekanik dari *piezoelectric*
 $Y_{1(t)}$: *Displacement* massa *piezoelectric* arah Y

Besarnya masing-masing gaya yaitu:

$$F_{k_1} = k_1(y_0 - y_1)$$

$$F_{c_1} = c_1(\dot{y}_0 - \dot{y}_1)$$

$$F_{e_1} = n \Gamma k_v(y_0 - y_1)$$

Berdasarkan persamaan diatas, maka didapat persamaan gerak translasi terhadap sumbu y pada massa *piezoelectric* (m_1) sebagai berikut:

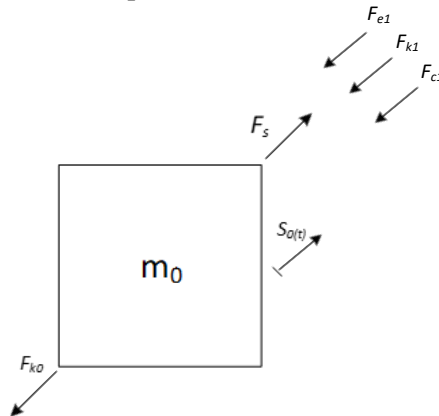
$$\begin{aligned} +\uparrow \sum F &= m_0 \ddot{y}_1 \\ F_{k_1} + F_{c_1} + F_{e_1} &= m_1 \ddot{y}_1 \\ m_1 \ddot{y}_1 - c_1(\dot{y}_0 - \dot{y}_1) - k_1(y_0 - y_1) - n \Gamma k_v(y_0 - y_1) &= 0 \\ m_1 \ddot{y}_1 - c_1 \dot{y}_0 + c_1 \dot{y}_1 - (k_1 + n \Gamma k_v)y_0 + (k_1 + n \Gamma k_v)y_1 &= 0 \end{aligned} \quad (3.5)$$

Matriks dari persamaan diatas adalah sebagai berikut:

$$\begin{pmatrix} m_0 & 0 \\ 0 & m_1 \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{y}_0 \\ \ddot{y}_1 \end{Bmatrix} + \begin{pmatrix} c_1 & -c_1 \\ -c_1 & c_1 \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{y}_0 \\ \dot{y}_1 \end{Bmatrix} + \begin{pmatrix} k_0 + k_1 + n \Gamma k_v & -(k_1 + n \Gamma k_v) \\ -(k_1 + n \Gamma k_v) & k_1 + n \Gamma k_v \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} y_0 \\ y_1 \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} F_y \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.6)$$

C. Sistem Utama Pipa *Elbow* dengan *Piezoelectric* di Posisi *Bend*

- Persamaan Gerak Pipa *Elbow* (m_0)



Gambar 3. 15 *Free body Diagram* Massa Sistem Utama (m_0) *Elbow* Posisi *Bend*

Keterangan:

- m_0 : Massa pipa
 F_{k_0} : Gaya pegas dari pipa
 F_{k_1} : Gaya pegas dari *piezoelectric*
 F_{c_1} : Gaya redaman dari *piezoelectric*
 F_y : Gaya eksitasi fluida arah sumbu Y
 F_x : Gaya eksitasi fluida arah sumbu X
 F_s : Gaya eksitasi dari fluida di belokan *elbow*
 F_{e_1} : Gaya elektromekanik dari *piezoelectric*
 $S_{0(t)}$: *Displacement* massa utama arah S

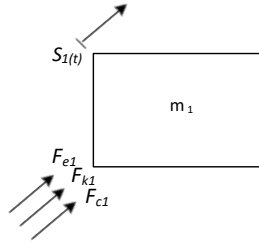
Besarnya masing-masing gaya yaitu:

$$\begin{aligned}
 F_s &= \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \\
 F_{k_{os}} &= k_0 s_0 \\
 F_{k_1} &= k_1 (s_0 - s_1) \\
 F_{c_1} &= c_1 (\dot{s}_0 - \dot{s}_1) \\
 F_{e_1} &= n \Gamma k_v (s_0 - s_1)
 \end{aligned}$$

Berdasarkan persamaan diatas, maka didapat persamaan gerak translasi pada pipa (m_0) sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 +\nearrow \sum F &= m_0 \ddot{s}_0 \\
 F_s - F_{k_0} - F_{k_1} - F_{c_1} - F_{e_1} &= m_0 \ddot{s}_0 \\
 m_0 \ddot{s}_0 + k_0 s_0 + k_1 (s_0 - s_1) + c_1 (\dot{s}_0 - \dot{s}_1) + n \Gamma k_v (s_0 - s_1) &= F_s \\
 &= F_s \\
 m_0 \ddot{s}_0 + (k_0 + k_1 + n \Gamma k_v) s_0 - (k_1 + n \Gamma k_v) s_1 + c_1 \dot{s}_0 - c_1 \dot{s}_1 &= F_s \\
 &= F_s \\
 m_0 \ddot{s}_0 + c_1 \dot{s}_0 - c_1 \dot{s}_1 + (k_0 + k_1 + n \Gamma k_v) s_0 - (k_1 + n \Gamma k_v) s_1 &= F_s \quad (3.7)
 \end{aligned}$$

- Persamaan Gerak *Piezoelectric* (m_1)



Gambar 3. 16 *Free Body Diagram* Massa *Piezoelectric*

Keterangan:

m_1 : Massa *piezoelectric*

F_{k1} : Gaya pegas dari *piezoelectric*

F_{c1} : Gaya redaman dari *piezoelectric*

F_{e1} : Gaya elektromekanik dari *piezoelectric*

$S_{1(t)}$: *Displacement* massa *piezoelectric* arah S

Besarnya masing-masing gaya yaitu:

$$F_{k_1} = k_1(s_0 - s_1)$$

$$F_{c_1} = c_1(\dot{s}_0 - \dot{s}_1)$$

$$F_{e_1} = n \Gamma k_v(s_0 - s_1)$$

Berdasarkan persamaan diatas, maka didapat persamaan gerak translasi terhadap sumbu s pada *piezoelectric* 1 (m_1) sebagai berikut:

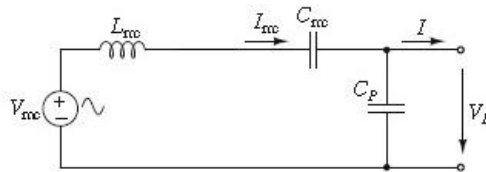
$$\begin{aligned}
 + \rightarrow \sum F &= m_2 \ddot{s}_1 \\
 F_{k_1} + F_{c_1} + F_{e_1} &= m_2 \ddot{s}_1 \\
 m_1 \ddot{s}_1 - c_1(\dot{s}_0 - \dot{s}_1) - k_1(s_0 - s_1) - n \Gamma k_v(s_0 - s_1) &= 0 \\
 m_1 \ddot{s}_1 - c_1 \dot{s}_0 + c_1 \dot{s}_1 - (k_1 + n \Gamma k_v)s_0 + (k_1 + n \Gamma k_v)s_1 &= 0 \\
 m_1 \ddot{s}_1 - c_1 \dot{s}_0 + c_1 \dot{s}_1 - (k_1 + n \Gamma k_v)s_0 + (k_1 + n \Gamma k_v)s_1 &= 0
 \end{aligned}
 \tag{3.8}$$

Matriks dari persamaan diatas adalah sebagai berikut:

$$\begin{pmatrix} m_0 & 0 \\ 0 & m_1 \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{s}_0 \\ \dot{s}_1 \end{Bmatrix} + \begin{pmatrix} c_1 & -c_1 \\ -c_1 & c_1 \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{s}_0 \\ \dot{s}_1 \end{Bmatrix} + \begin{pmatrix} (k_0 + k_1 + n \Gamma k_v) & -(k_1 + n \Gamma k_v) \\ -(k_1 + n \Gamma k_v) & (k_1 + n \Gamma k_v) \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} s_0 \\ s_1 \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} F_s \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.9)$$

3.2.6 Pemodelan Kelistrikan *Piezoelectric*

Gambar 3.17 menjelaskan diagram sirkuit kelistrikan dari material *piezoelectric*. Material *piezoelectric* menghasilkan energi listrik ketika terjadi defleksi pada material tersebut. Energi listrik yang dihasilkan tersebut terdiri dari voltase, arus listrik, dan daya bangkitan. Berikut dirumuskan voltase bangkitan mekanisme pada 3.10. Nilai gaya elektromekanik *piezoelectric* Fe dirumuskan pada 3.11.



Gambar 3. 17 Diagram Sirkuit Elektromagnetik *Cantilever Piezoelectric*

$$V_p = \frac{3d_{31}E_p w_p t}{4C} X_p \quad (3.10)$$

$$F_e = \Gamma V_p \quad (3.11)$$

$$= K_{pe} X_p \quad (3.12)$$

Dimana:

- V_p = Voltase *piezoelectric*
- d_{31} = Voltage constant
- E_p = Modulus elastisitas
- W_p = Lebar *piezoelectric*
- t = Tebal *piezoelectric*
- C = *Piezoelectric* capacitance
- X_p = Defleksi *piezoelectric*

- F_e = Gaya elektromagnetik
 n = Jumlah *piezoelectric*
 Γ = *electromechanical factor piezoelectric*
 K_{pe} = Konstanta pegas *piezoelectric* ekivalen

Sedangkan arus bangkitan dari *piezoelectric* pada mekanisme kali ini dapat dirumuskan dengan:

$$V_{mc} = L_{mc} \frac{dI_{mc}}{dt} + R_{mc} I_{mc} + \frac{1}{C_{mc}} \int I_{mc} dt + V_p \quad (3.13)$$

$$I_{mc} = \frac{1}{L_{mc}} (V_{mc} - R_{mc} I_{mc} - \frac{1}{C_{mc}} \int I_{mc} dt - V_p) \quad (3.14)$$

dimana:

$$V_{mc} = \frac{F_i}{r}, \quad L_{mc} = \frac{M}{r^2}, \quad R_{mc} = \frac{d_p}{r^2}, \quad C_{mc} = \frac{r^2}{k_p}$$

Dimana:

- M = Massa (Kg)
 d_p = Konstanta *damping* ekuivalen *piezoelectric* (Ns/m)
 k_p = Konstanta pegas ekuivalen *piezoelectric* (N/m)
 C_p = kapasitansi *piezoelectric* (Farad)

Sehingga daya bangkitan dari *piezoelectric* dapat dirumuskan dengan:

$$P = V_p I_{mc} \quad (3.15)$$

Dimana :

- P = Daya bangkitan *piezoelectric* (Watt)
 I_{mc} = Arus bangkitan *piezoelectric* (Ampere)

3.3 Penentuan Parameter Penelitian

Dalam melakukan sebuah eksperimen, perlu diketahui parameter yang dibutuhkan untuk menjalankan eksperimen. Parameter ini meliputi massa, panjang, dan koefisien pegas. Nilai massa diperoleh dengan penimbangan benda pada timbangan

digital atau dari perhitungan terhadap frekuensi natural dan koefisien pegas yang diinginkan, sedangkan nilai panjang dapat diperoleh dengan pengukuran dengan menggunakan mistar atau jangka sorong. Cara untuk menentukan parameter-parameter yang dibutuhkan dijelaskan secara rinci dibawah ini.

3.3.1 Menentukan Massa Utama (M_0)

Sistem utama berperan sebagai pemberi getaran sekaligus tempat terjadinya getaran. Massa sistem utama yang dianalisa terdiri dari beberapa komponen utama yaitu pipa lurus, pipa *elbow*, fluida, dan *piezoelectric*. Oleh karena itu, massa total dari sistem utama yang dianalisa dapat diketahui dari persamaan:

A. Massa *elbow*

$$\begin{aligned}
 M_{fluid} &= v \times \rho \\
 v &= A \times L \\
 v &= \left(\pi \left[\left(\frac{1}{4} \times D_i^2 \times SR \right) + \left(\frac{1}{4} \times D_i^2 \times L \right) \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + \left(\frac{1}{4} \times D_i^2 \times L \right) \right] \right) \\
 v &= \left(\pi \left[\left(\frac{1}{4} \times (0,0325)^2 \times 0,0254 \right) \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + \left(\frac{1}{2} \times (0,0325)^2 \times 0,04 \right) \right] \right) \\
 v &= 8,743 \times 10^{-5} \text{m}^3 \\
 M_{fluid} &= v \times \rho = 8,743 \times 10^{-5} \times 1000 = 0,08743 \text{ kg} \\
 \text{Massa } elbow &= M_{timbang} + M_{fluid} \\
 &= 0,0735 + 0,08743 \\
 &= 0,1609 \text{ kg}
 \end{aligned} \tag{3.16}$$

B. Massa Pipa Lurus

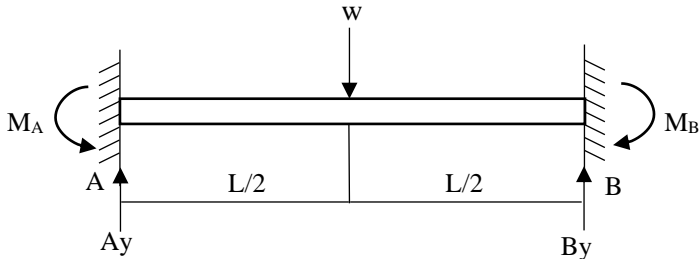
$$\begin{aligned}
 M_{fluid} &= v \times \rho \\
 v &= A \times L \\
 v &= \frac{\pi}{4} \times D_i^2 \times L
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 v &= \frac{\pi}{4} \times (0,028)^2 \times 0,1054 \\
 v &= 6,49 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \\
 M_{fluid} &= v \times \rho = 6,49 \times 10^{-5} \times 1000 = 0,065 \text{ kg} \\
 \text{Massa pipa lurus} &= M_{timbang} + M_{fluid} \\
 &= 0,033 + 0,06158 \\
 &= 0,098 \text{ kg}
 \end{aligned} \tag{3.17}$$

Setelah dilakukan perancangan mekanisme sistem utama dan pengukuran dimensi maupun massa komponen pendukung dari sistem utama tersebut, dapat diperoleh massa total sistem utama (M_0) sebesar 0,1609 kg untuk *elbow* 90, dan 0,098 kg untuk pipa lurus.

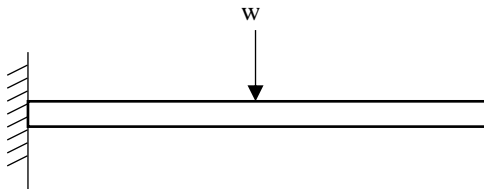
3.3.2 Analisa Defleksi

3.3.2.1 Analisa Perhitungan Defleksi pada Pipa Lurus



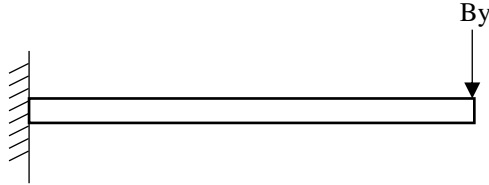
Gambar 3. 18 *Free Body Diagram* Pipa Lurus

Untuk mencari nilai M_A , A_y , B_y , dan M_B dilakukan metode superposisi sebagai berikut:



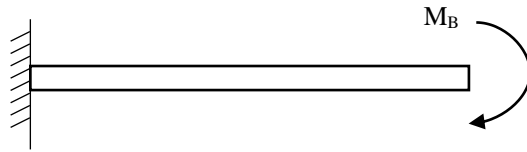
Gambar 3. 19 Posisi Berat Pipa Lurus

$$\theta' = \frac{w L^2}{8 E I} \quad v' = \frac{5 w L^3}{48 E I} \quad (3.18)$$



Gambar 3. 20 Posisi Gaya Arah Y pada Titik B

$$\theta'' = \frac{B y L^2}{2 E I} \quad v'' = \frac{B y L^3}{3 E I} \quad (3.19)$$



Gambar 3. 21 Momen Posisi B

$$\theta''' = \frac{M_B L}{E I} \quad v''' = \frac{M_B L^2}{2 E I} \quad (3.20)$$

$$\theta' + \theta'' + \theta''' = 0$$

$$\frac{w L^2}{8 E I} + \frac{B y L^2}{2 E I} + \frac{M_B L}{E I} = 0 \quad (3.21)$$

$$v' + v'' + v''' = 0$$

$$\frac{5 w L^3}{48 E I} + \frac{B y L^3}{3 E I} + \frac{M_B L^2}{2 E I} = 0 \quad (3.22)$$

$$\frac{w L}{8} + \frac{B y L}{2} + M_B = 0 \quad | \times 2 | \quad \frac{w L}{4} + 2 M_B = 0$$

$$\frac{5 w L}{48} + \frac{B y L}{3} + \frac{M_B}{2} = 0 \quad | \times 3 | \quad \frac{15 w L}{4} + \frac{3 M_B}{2} = 0$$

$$-\frac{wL}{16} + \frac{M_B}{2} = 0$$

$$\frac{M_B}{2} = \frac{1}{16}wL$$

$$M_B = \frac{1}{8}wL \quad (3.23)$$

$$\frac{wL}{8} + \frac{ByL}{2} + M_B = 0$$

$$\frac{wL}{8} + \frac{ByL}{2} + \frac{1}{8}wL = 0$$

$$\frac{ByL}{2} + \frac{1}{4}wL = 0$$

$$\frac{ByL}{2} = -\frac{1}{4}wL$$

$$By = -\frac{1}{2}w \quad (3.24)$$

Gaya-gaya pada sumbu Y

$$+\uparrow \Sigma F_y = 0$$

$$FA_y + FB_y - w = 0$$

$$FA_y = w - FB_y$$

$$FA_y = w - \frac{w}{2}$$

$$FA_y = \frac{w}{2} \quad (3.25)$$

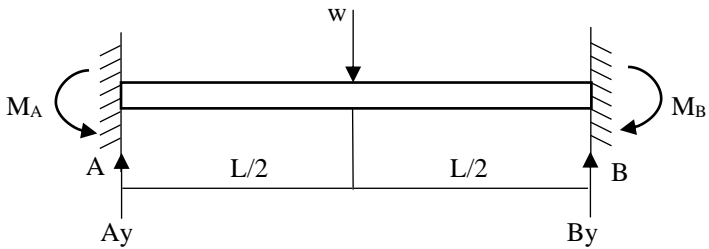
Momen pada titik A

$$+\curvearrowright \Sigma M_A = 0$$

$$M_A - M_B - \frac{wL}{2} + FB_y L = 0$$

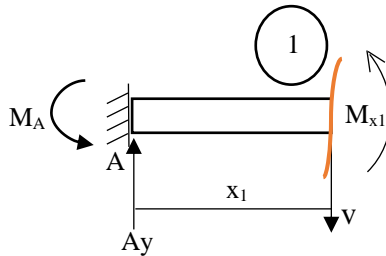
$$M_A - \frac{wL}{8} - \frac{w}{2} + \frac{wL}{2} = 0$$

$$M_A = \frac{wL}{8} \quad (3.26)$$



Gambar 3. 22 Momen A dan Momen B Pipa Lurus

Potongan 1

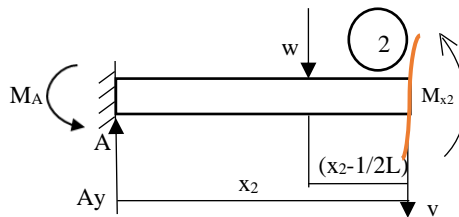


Gambar 3. 23 Potongan Pipa Lurus 1

Untuk $0 \leq x_1 \leq \frac{L}{2}$

$$\begin{aligned}
 +\curvearrowright \Sigma M_{x_1} &= 0 \\
 M_{x_1} + M_A - Ay x_1 &= 0 \\
 M_{x_1} &= Ay x_1 - M_A
 \end{aligned} \tag{3.27}$$

• Potongan 2



Gambar 3. 24 Potongan Pipa Lurus 2

Untuk $0 \leq x_1 \leq L$

$$\begin{aligned}
 & + \curvearrowright \Sigma M_{x_2} = 0 \\
 M_{x_2} + M_A - Ay x_2 + w(x_2 - \frac{L}{2}) &= 0 \\
 M_{x_2} = Ay x_2 - wx_2 + \frac{wL}{2} - M_A & \quad (3.28)
 \end{aligned}$$

Metode *double integral*:

$$\text{Slope: } EI \frac{dv_1}{dx_1} = \frac{Ay x_1^2}{2} - M_A + c_1 \quad (3.29)$$

$$\text{Defleksi : } EI v_1 = \frac{Ay x_1^3}{6} - \frac{M_A x_1^2}{2} + c_1 x_1 + c_2 \quad (3.30)$$

$$\text{Slope: } EI \frac{dv_2}{dx_2} = \frac{Ay x_2^2}{2} - \frac{w x_2^2}{2} + \frac{wL x_2}{2} - M_A + c_3 \quad (3.31)$$

$$\text{Defleksi: } EI v_2 = \frac{Ay x_2^3}{6} - \frac{w x_2^3}{6} + \frac{wL x_2^2}{4} - \frac{M_A x_2^2}{2} + c_3 x_2 + c_4 \quad (3.32)$$

$v_1 = 0$ saat $x_1 = 0$

$$c_2 = 0 \quad (3.33)$$

$v_2 = 0$ saat $x_2 = L$

$$\begin{aligned}
 0 &= \frac{Ay L^3}{6} - \frac{wL^3}{6} + \frac{wL^3}{4} - \frac{M_A L^2}{2} + c_3 L + c_4 \\
 0 &= \frac{Ay L^3}{6} + \frac{wL^3}{12} - \frac{M_A L^2}{2} + c_3 L + c_4 \quad (3.34)
 \end{aligned}$$

$\frac{dv_1}{dx_1} = \frac{dv_2}{dx_2}$ saat $x_1 = x_2 = \frac{1}{2} L$

$$\begin{aligned}
 \frac{Ay x_1^2}{2} - M_A x_1 + c_1 &= \frac{Ay x_2^2}{2} - \frac{w x_2^2}{2} + \frac{wL x_2}{2} - M_A x_2 + c_3 \\
 \frac{Ay x_1^2}{8} + c_1 &= \frac{Ay L^2}{4} - \frac{wL^2}{8} + \frac{wL^2}{4} + c_3 \\
 c_3 &= -\frac{Ay L^2}{8} - \frac{wL^2}{8} + c_1 \quad (3.35)
 \end{aligned}$$

$v_1 = v_2$ saat $x_1 = x_2 = L/2$

$$\begin{aligned}
\frac{Ay x_1^3}{6} - \frac{M_A x_1^2}{2} + c_1 x_1 &= \frac{Ay x_2^3}{6} - \frac{w x_2^3}{6} + \frac{w L x_2^2}{4} - \frac{M_A x_2^2}{2} + c_3 x_2 + c_4 \\
\frac{c_1 L}{2} &= -\frac{w L^3}{48} + \frac{w L^3}{16} + \frac{c_3 L}{2} + c_4 \\
\frac{c_1 L}{2} &= \frac{w L^3}{24} + \frac{c_3 L}{2} + c_4 \\
c_4 &= \frac{c_1 L}{2} - \frac{w L^3}{24} - \frac{c_3 L}{2}
\end{aligned} \tag{3.36}$$

Persamaan (3.35) \rightarrow (3.36)

$$\begin{aligned}
c_4 &= \frac{c_1 L}{2} - \frac{w L^3}{24} + \frac{Ay L^3}{16} + \frac{w L^3}{16} - \frac{c_1 L}{2} \\
c_4 &= \frac{w L^3}{48} + \frac{Ay L^3}{16}
\end{aligned} \tag{3.37}$$

Persamaan (3.37) \rightarrow (3.34)

$$\begin{aligned}
0 &= \frac{Ay L^3}{6} + \frac{w L^3}{6} - \frac{M_A L^2}{2} + c_3 L + \frac{w L^3}{48} + \frac{Ay L^3}{16} \\
0 &= -\frac{11Ay L^3}{48} - \frac{5w L^3}{48} + \frac{M_A L^2}{2} + c_3 L \\
c_3 L &= \frac{11Ay L^3}{48} + \frac{5w L^3}{48} + \frac{M_A L^2}{2} \\
c_3 &= -\frac{11Ay L^2}{48} - \frac{5w L^2}{48} + \frac{M_A L}{2}
\end{aligned} \tag{3.38}$$

Persamaan (3.38) \rightarrow (3.35)

$$\begin{aligned}
-\frac{11Ay L^2}{48} - \frac{5w L^2}{48} + \frac{M_A L}{2} &= -\frac{Ay L^2}{8} - \frac{w L^2}{8} + c_1 \\
c_1 &= -\frac{5Ay L^2}{48} + \frac{w L^2}{48} + \frac{M_A L}{2}
\end{aligned} \tag{3.39}$$

Persamaan (3.39) dan (3.33) \rightarrow (3.30)

$$\begin{aligned}
EI v_1 &= \frac{Ay x_1^3}{6} - \frac{M_A x_1^2}{2} + c_1 x_1 + c_2 \\
EI v_1 &= \frac{Ay x_1^3}{6} - \frac{M_A x_1^2}{2} - \frac{5Ay L^2}{48} x_1 + \frac{w L^2}{48} x_1 + \frac{M_A L}{2} x_1
\end{aligned} \tag{3.40}$$

Mencari defleksi maksimum yang berada pada $x = L/2$ melalui persamaan:

$$EI v_1 = \frac{Ay L^3}{48} - \frac{M_A L^2}{8} - \frac{5AyL^3}{96} + \frac{wL^3}{96} x_1 + \frac{M_A L^2}{4}$$

$$Ay = w/2 ; M_A = \frac{wL}{8}$$

$$EI v_1 = \frac{w L^3}{96} - \frac{w L^2}{64} - \frac{5wL^3}{192} + \frac{wL^3}{96} + \frac{wL^3}{32}$$

$$EI v_1 = \frac{(2 - 3 - 5 + 1 + 6) w L^3}{192}$$

$$EI v_1 = \frac{1}{192} w L^3$$

$$v_1 = \frac{w L^3}{192 EI}$$

- Momen

1. $M_{x1} = Ay x_1 - M_A$

$$M_{x1} = \frac{w}{2} x_1 - \frac{wL}{8}$$

$$x = 0 \rightarrow M_{x1} = -\frac{wL}{8} = -0,125 wL$$

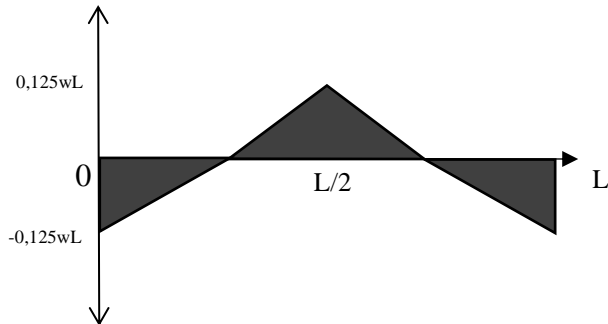
$$x = \frac{L}{2} \rightarrow M_{x1} = \frac{wL}{8} = 0,125 wL \quad (3.41)$$

2. $M_{x2} = Ay x_2 - w x_2 + \frac{wL}{2} - M_A$

$$M_{x2} = \frac{w}{2} x_2 - w x_2 + \frac{wL}{2} - \frac{wL}{8}$$

$$x = L/2 \rightarrow M_{x1} = \frac{wL}{8} = 0,125 wL$$

$$x = L \rightarrow M_{x1} = -\frac{wL}{8} = -0,125 wL \quad (3.42)$$



Gambar 3. 25 Diagram Shear dan Diagram Momen Pipa Lurus

Mencari nilai kekakuan

$$F = k \Delta x$$

$$k = \frac{F}{\Delta x}$$

$$k = \frac{F}{\frac{F L^3}{192 EI}}$$

$$k = \frac{192 EI}{L^3} \quad (3.43)$$

Rumus inersia pipa:

$$\begin{aligned} I &= \frac{\pi}{64} (d_o^4 - d_i^4) \\ &= \frac{\pi}{64} (32^4 - 28^4) \\ &= \frac{\pi}{64} (1048576 - 614656) \\ &= 21289.2 \text{ mm}^4 \end{aligned} \quad (3.44)$$

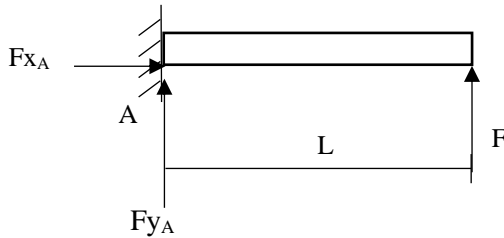
$$E = 3000 \text{ N/mm}^2$$

$$k = \frac{192 (3000)(21300)}{232,185^3}$$

$$k = 980,166 \text{ N/mm}$$

$$= 980.166 \text{ N/m} \quad (3.45)$$

3.3.2.2 Analisa Perhitungan Defleksi pada Pipa *Elbow*



Gambar 3. 26 Skema Pembebanan oleh Eksitasi Fluida pada *Elbow*

Dari gambar skema 3.26 dapat dilakukan perhitungan untuk menemukan persamaan besarnya momen seperti berikut:

Gaya-gaya pada sumbu X

$$\Sigma F_x = 0$$

$$F_{x_A} = 0 \quad (3.46)$$

Gaya pada sumbu Y

$$\Sigma F_y = 0$$

$$F_{y_A} + F = 0$$

$$F_{y_A} = -F \quad (3.47)$$

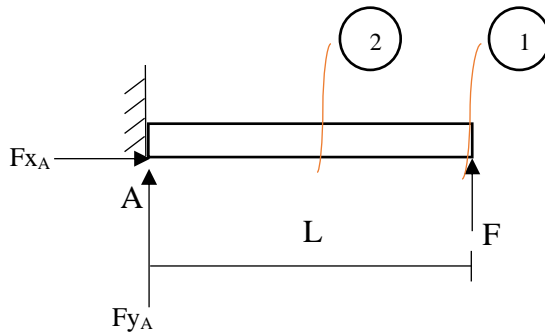
Momen pada titik A

$$(ccw)\Sigma M_A = 0$$

$$M_A - F L = 0$$

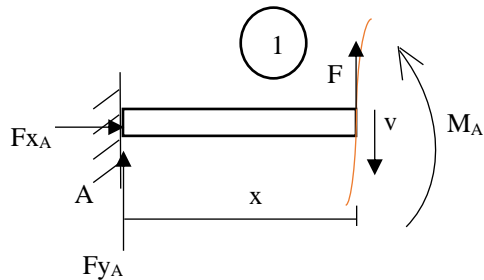
$$M_A = F L \quad (3.48)$$

Setelah diketahui besarnya nilai F_{y_a} dan F_{y_b} langkah selanjutnya gambarkan kembali *free body diagram* yang baru untuk menggambarkan diagram momen.



Gambar 3. 27 Free Body Diagram Potongan Elbow

Potongan 1



Gambar 3. 28 Potongan 1 Pipa Elbow

Untuk $0 \leq X_1 \leq L$

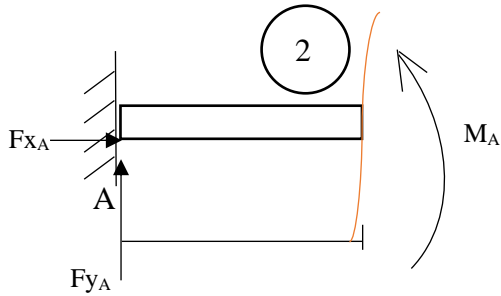
Gaya pada sumbu Y

$$\begin{aligned} \Sigma F_y &= 0 \\ F_{yA} - V &= 0 \\ F_{yA} &= V \end{aligned} \quad (3.49)$$

Momen pada titik B

$$\begin{aligned} (ccw) \Sigma M &= 0 \\ M - F_{yA} \cdot X_1 &= 0 \\ M &= F_{yA} \cdot X_1 \\ M &= -F \cdot X_1 \end{aligned} \quad (3.50)$$

Potongan 2



Gambar 3. 29 Potongan 2 Pipa *Elbow*

Untuk $0 \leq X_2 \leq L/2$

Momen untuk

$$\begin{aligned}
 +\curvearrowright \Sigma M &= 0 \\
 M_A - F_{yA} X_2 &= 0 \\
 M_A &= F_{yA} X_2 \\
 M_A &= -F X_2
 \end{aligned}$$

(3.51)



Gambar 3. 30 *Diagram Shear* dan *Diagram Momen* Pipa Lurus

Persamaan defleksi dapat ditemukan dengan menggunakan metode *double integral* sebagai berikut:

Dari gambar 3.30 didapatkan *boundary condition* yaitu $\theta = dv/dx = 0$ pada $X = L$ dan $v = 0$ pada $x = 0$, dengan *boundary condition* tersebut dapat digunakan untuk menyelesaikan persamaan berikut:

Untuk $0 \leq X_1 \leq L$:

$$\begin{aligned}
 EI v \frac{d^2 v}{dx^2} &= M(x) \\
 EI v \frac{d^2 v}{dx^2} &= -F \cdot x \\
 EI v \frac{dv}{dx} &= \frac{F}{2} \cdot x^2 + C_1 \\
 EI v &= \frac{F}{6} \cdot x^3 + C_1 x + C_2
 \end{aligned} \tag{3.52}$$

Mencari nilai C_1 dan C_2 :

Untuk $\theta = dv/dx = 0$ pada $X = L$

$$\begin{aligned}
 EI v \frac{dv}{dx} &= -\frac{F}{2} \cdot x^2 + C_1 \\
 0 &= -\frac{F}{2} \cdot (L)^2 + C_1 \\
 C_1 &= \frac{FL^2}{2}
 \end{aligned} \tag{3.53}$$

Untuk $v = 0$ pada $x = 0$:

$$\begin{aligned}
 EI v &= \frac{F}{6} \cdot x^3 + C_1 x + C_2 \\
 0 &= \frac{F}{6} \cdot 0 + C_1 \cdot 0 + C_2 \\
 C_2 &= 0
 \end{aligned} \tag{3.54}$$

Setelah didapatkan besarnya nilai C_1 dan C_2 lalu disubstitusikan ke dalam persamaan awal untuk mencari besarnya defleksi maksimum yang berada pada $X = L$ sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 EI v &= -\frac{F}{6} \cdot X_2^3 + C_1 X_2 + C_2 \\
 EI v &= -\frac{F}{6} \cdot (L)^3 + \frac{FL^2}{2} \cdot L + 0 \\
 EI v &= -\frac{FL^3}{6} + \frac{FL^3}{2} \\
 EI v &= \frac{2FL^3}{6} \\
 EI v &= \frac{FL^3}{3} \\
 v &= \frac{FL^3}{3EI} \\
 \Delta &= \frac{FL^3}{3EI} \tag{3.55}
 \end{aligned}$$

- Mencari nilai kekakuan

Sedangkan untuk mencari kekakuan (*stiffness*) di *elbow* dapat dilakukan dengan cara berikut:

$$\begin{aligned}
 F &= k \cdot \Delta X \\
 k &= \frac{F}{\Delta X} \tag{3.56}
 \end{aligned}$$

Untuk kekakuan (*stiffness*) oleh *piezoelectric* di *elbow* menggunakan persamaan 3.48:

$$\begin{aligned}
 k &= \frac{F}{\Delta X} \\
 k &= \frac{F}{\frac{FL^3}{3EI}} \\
 k &= \frac{3EI}{L^3} \tag{3.57}
 \end{aligned}$$

- Rumus inersia pipa:

$$I = \frac{\pi}{64} (d_o^4 - d_i^4)$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{\pi}{64} (40^4 - 32,5^4) \\
&= \frac{\pi}{64} (2560000 - 1115664,063) \\
&= 70898,7 \text{ mm}^4 \tag{3.58}
\end{aligned}$$

$$E = 3000 \text{ N/mm}^2$$

$$\begin{aligned}
k &= \frac{3 (3000)(70898,7)}{232,185^3} \\
k &= 50,9774 \text{ N/mm} \\
&= 50.977,4 \text{ N/m} \tag{3.59}
\end{aligned}$$

3.3.3 Menentukan Frekuensi Natural

Frekuensi natural sistem merupakan frekuensi natural bagian pipa dari sistem utama. Berikut persamaan untuk mengetahui nilai frekuensi natural:

- Pipa Lurus (*one degree of freedom*)

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_{eq}}{M_{eq}}}$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{980.166 \text{ N/m}}{0,098}} = 3.162,5 \frac{\text{rad}}{\text{s}} = 503,32 \text{ Hz} \tag{3.60}$$

- Pipa elbow (*two degree of freedom*)

$$\begin{aligned}
\begin{pmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{Bmatrix} + \begin{pmatrix} k & 0 \\ 0 & k \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix} &= \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \\
\det \begin{pmatrix} k - m\omega^2 & 0 \\ 0 & k - m\omega^2 \end{pmatrix} &= \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix}
\end{aligned}$$

$$k^2 - 2km\omega^2 + m^2\omega^4 = 0$$

Misal $\omega^2 = \lambda$, sehingga persamaannya menjadi:

$$k^2 - 2km\lambda + m^2\lambda^2 = 0$$

Menggunakan rumus ABC ($\frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$), sehingga persamaan menjadi:

$$\frac{2km \pm \sqrt{(2km)^2 - 4(m^2k^2)}}{2m^2}$$

$$\lambda = \frac{k}{m}$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{50.977,4}{0,1609}} = 562,87 \frac{\text{rad}}{\text{s}} = 89,5 \text{ Hz} \quad (3.61)$$

3.3.4 Menentukan Konstanta Kekakuan Pegas dari *Cantilever Piezoelectric*

Pada mekanisme *energy harvesting*, terdapat *piezoelectric* dengan jenis *cantilever beam* yang memiliki besar nilai *Modulus young* (E) dan dimensi yang dapat diketahui dari spesifikasi material *piezoelectric* yang tersedia. Dengan demikian, untuk mengetahui konstanta kekakuan *piezoelectric* dapat digunakan persamaan sebagai berikut:

$$k_p = k_4 = \frac{3EI}{l^3} \quad (3.62)$$

$$I = \frac{1}{12} b h^3 \quad (3.63)$$

Dimana:

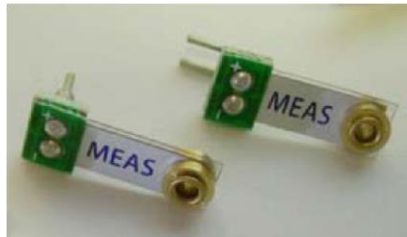
$$E_{pzt} : 68 \times 10^9 \text{ N/m}^2$$

$$b : 6 \text{ mm}$$

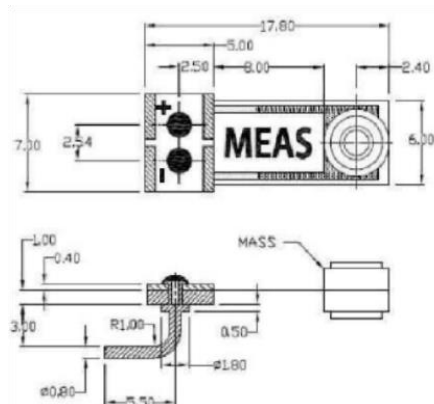
$$l : 12 \text{ mm}$$

$$h : 1 \text{ mm}$$

Berdasarkan persamaan 3.62 dan 3.63 di atas, diketahui bahwa untuk mengetahui konstanta kekakuan pegas dari *piezoelectric* yang digunakan, maka perlu mengetahui dimensi dari *piezoelectric* tersebut. *Piezoelectric* yang digunakan merupakan *piezoelectric* Minisense 100 Vibration Sensor dengan massa di bagian ujung *piezoelectric* dan dapat dilihat pada gambar 3.31. Jenis *piezoelectric* yang digunakan merupakan *piezoelectric* vertikal atau *piezoelectric* yang digunakan untuk pemasangan pada bidang vertikal. Spesifikasi dimensi dari material *piezoelectric* yang digunakan tersebut dapat dilihat pada gambar 3.32. Maka nilai kekakuan *piezoelectric* adalah $5,75 \times 10^{-1} \text{ N/m}^2$.



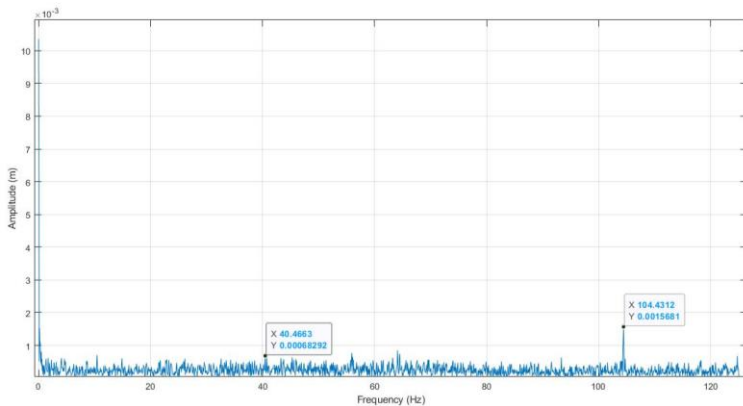
Gambar 3. 31 *Piezoelectric* Minisense 100 Vibration Sensor



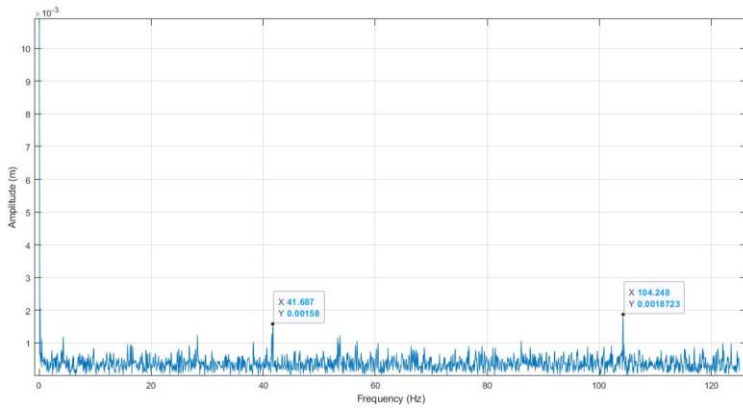
Gambar 3. 32 Dimensi Material *Piezoelectric* yang Digunakan

3.3.5 Menentukan Frekuensi Operasi (ω_f)

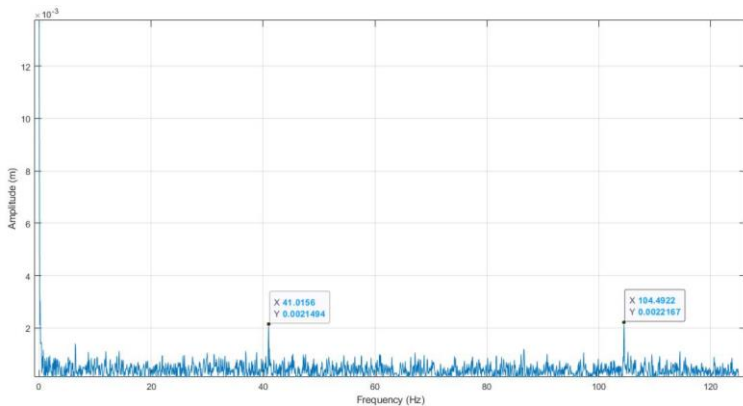
Hal yang pertama kali dilakukan adalah menentukan jenis fluida dan pompa air yang digunakan untuk mengalirkan fluida dan sebagai sumber getaran. Pencarian dilakukan dipasaran berdasarkan kebutuhan debit aliran yang digunakan sehingga dapat mengalirkan fluida melalui sistem untuk mengetahui pompa yang dipakai. Berdasarkan ketentuan tersebut, dipilihlah sebuah pompa air yang ada di pasaran. Setelah didapatkan pompa dengan spesifikasi yang diinginkan, dilakukan pengujian eksperimen dan diolah menggunakan MATLAB untuk menentukan nilai frekuensi operasi pada variasi posisi pengujian sistem perpipaan tanpa *piezoelectric* dari sistem utama menggunakan *transform fourier*. Berikut merupakan frekuensi operasi hasil olahan MATLAB dapat dilihat pada gambar 3.33 untuk pipa lurus, 3.34 untuk *elbow outlet*, dan 3.35 untuk *elbow bend*.



Gambar 3. 33 Frekuensi Operasi Tanpa *Piezoelectric* Pipa Lurus



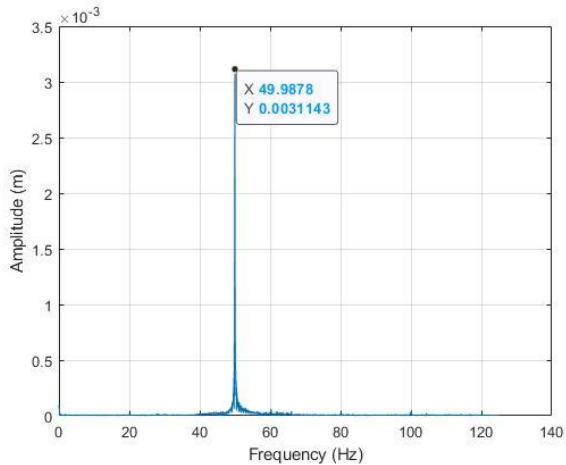
Gambar 3. 34 Frekuensi Operasi Tanpa *Piezoelectric* Pipa *Elbow Outlet*



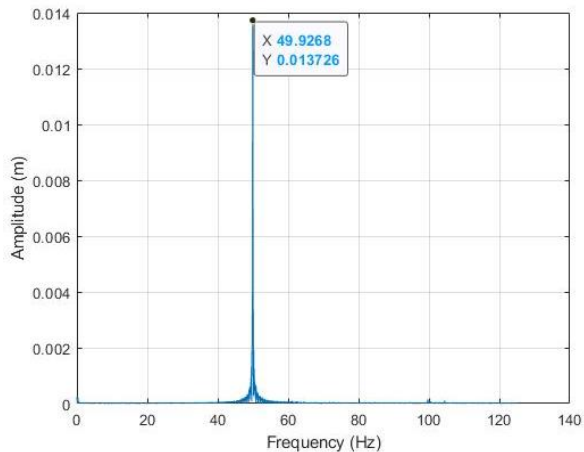
Gambar 3. 35 Frekuensi Operasi Tanpa *Piezoelectric* Pipa *Elbow Bend*

Berdasarkan grafik diatas dapat dilihat bahwa frekuensi operasi dari respon getaran yang terjadi pada pipa lurus yaitu sebesar 40,663 Hz, pipa *elbow outlet* memiliki frekuensi operasi 41,687 Hz, dan pipa *elbow bend* memiliki frekuensi operasi 41.016 Hz. Setelah dilakukan percobaan tanpa *piezoelectric*, dilakukan

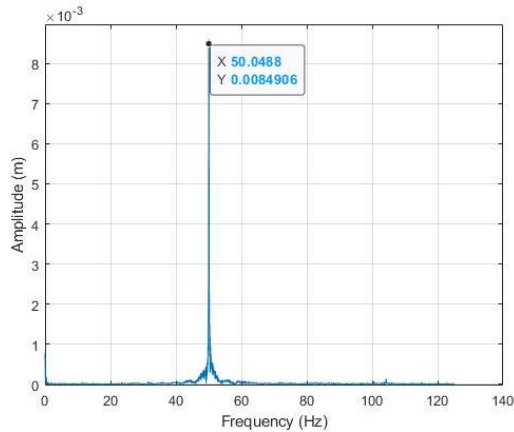
pengujian pada menggunakan piezoelectric pada tiap posisi peletakkan *piezoelectric*. Berikut merupakan frekuensi operasi dari voltase yang dihasilkan oleh *piezoelectric*.



Gambar 3. 36 Frekuensi Operasi Menggunakan *Piezoelectric* Pada Pipa Lurus



Gambar 3. 37 Frekuensi Operasi Menggunakan *Piezoelectric* Pada *Elbow Outlet*



Gambar 3. 38 Frekuensi Operasi Menggunakan *Piezoelectric* Pada *Elbow Bend*

Berdasarkan grafik diatas dapat dilihat bahwa frekuensi operasi dari voltase yang terjadi pada pipa lurus yaitu sebesar 49,988 Hz, pipa *elbow outlet* memiliki frekuensi operasi 49,927 Hz, dan pipa *elbow bend* memiliki frekuensi operasi 50,049 Hz.

3.3.6 Parameter Penelitian

Tabel 3.1 berisikan parameter dari material dari sistem perpipaan yang digunakan sebagai sistem massa utama.

Tabel 3. 1 Parameter Sistem Utama

Parameter	Nilai	
Massa pipa	Pipa Lurus	<i>Elbow</i>
	0,098 kg	0,1609 kg
Massa <i>piezoelectric</i>	6×10^{-4} kg	
Konstanta kekakuan pipa	Pipa Lurus	<i>Elbow</i>
	980.166 N/mm	50977.4 N/mm
Konstanta kekakuan <i>piezoelectric</i>	$5,75 \times 10^{-1}$ N/m ²	

Tabel 3.2 berisikan parameter dari material *piezoelectric* yang digunakan sebagai alat konversi energi.

Tabel 3. 2 Parameter Material *Piezoelectric*

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Massa <i>piezoelectric</i>	M_{pzt}	6×10^{-4}	Kg
Ketebalan <i>piezoelectric</i>	t	1×10^{-3}	m
Lebar <i>piezoelectric</i>	w_{pzt}	6×10^{-4}	m
Panjang <i>piezoelectric</i>	L_{pzt}	12×10^{-3}	m
Kapasitansi	C_{pzt}	244×10^{-10}	F
Konstanta regangan <i>piezoelectric</i>	d 31	110×10^{-12}	C/N
<i>Electromechanical coupling factor</i>	k 31	12	%
Kontanta pegas <i>piezoelectric</i>	k pzt	$5,75 \times 10^{-1}$	N/m
<i>Modulus young</i>	E	3×10^9	N/m ²

Tabel 3.3 berisikan parameter dari fluida yang digunakan sebagai eksitasi getaran pada sistem perpipaan.

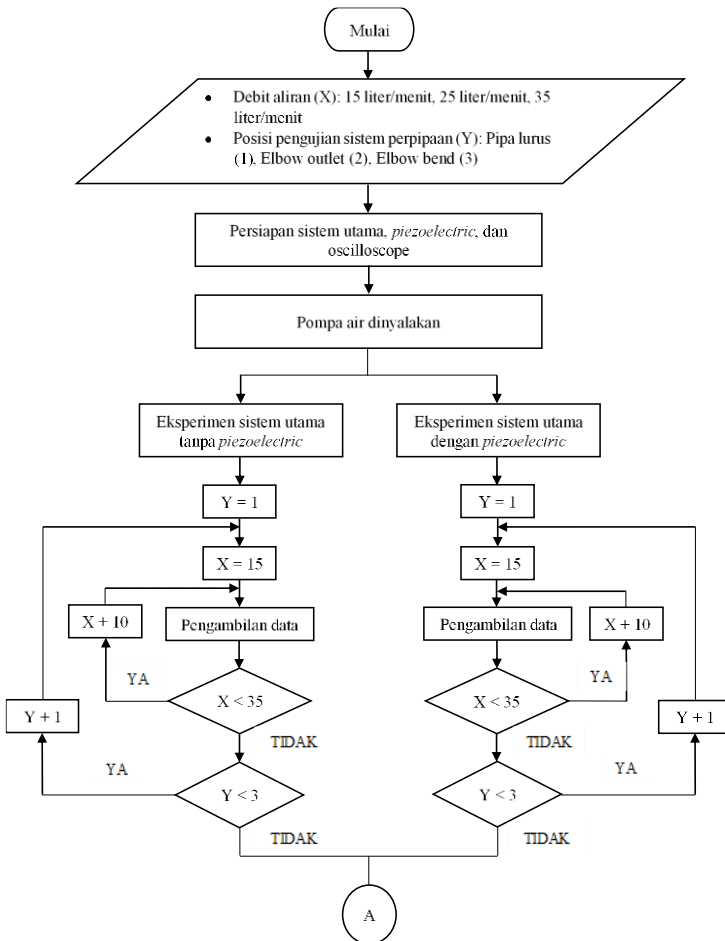
Tabel 3. 3 Parameter Fluida

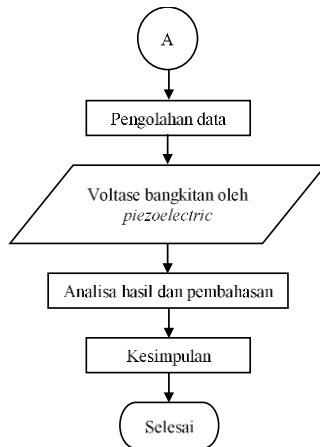
Parameter	Nilai
Jenis fluida	Air
Debit aliran fluida	15 liter/menit ; 25 liter/menit ; 35 liter/menit
<i>Temperature</i>	25°C
<i>Density</i>	1000 kg/m ³
<i>Dynamic viscosity</i>	0,887 x 10 ⁻³ kg/m.s
Gravitasi	9,81 m ² /s

3.4 Eksperimen

Terdapat urutan langkah-langkah dalam melakukan eksperimen pada penelitian tugas akhir ini. Langkah-langkah eksperimen tersebut ditunjukkan dengan *flowchart* pada gambar 3.35 berikut.

3.4.1 *Flowchart* Eksperimen

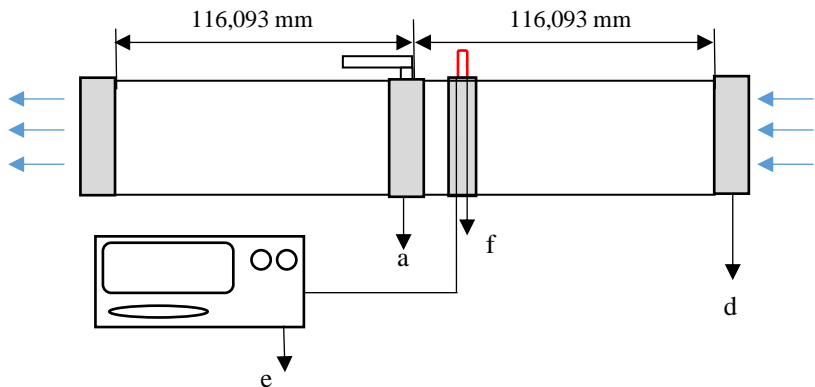




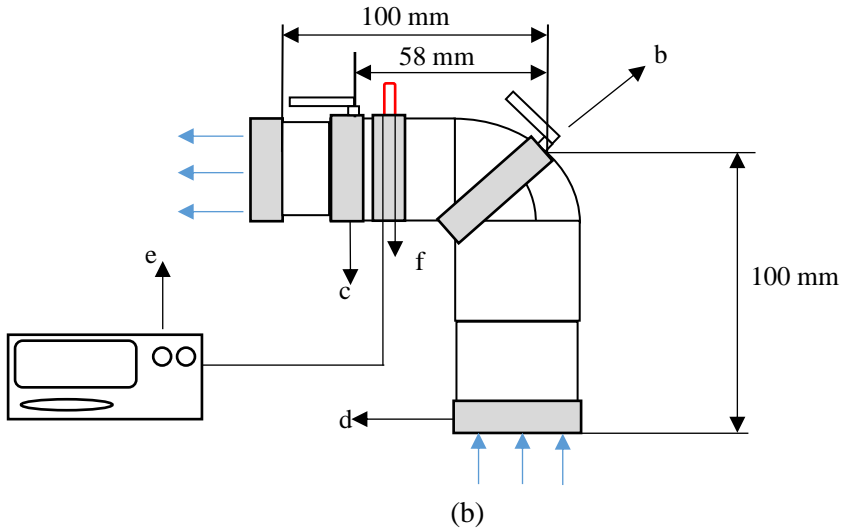
Gambar 3. 39 Flowchart Ekserimen

3.4.2 Skema Pengujian

Gambar 3.36 (a) dan (b) menunjukkan skema pengujian untuk eksperimen pada penelitian tugas akhir ini. Pada eksperimen ini, *probe* yang terhubung dengan *oscilloscope* diletakkan pada bagian benda



(a)



Gambar 3. 40 Skema Pengujian (a) Pipa Lurus dan (b) *Fitting* Pipa Elbow 90 Tampak Atas

Keterangan:

- a = *Clamp* dan *piezoelectric* di pipa lurus
- b = *Clamp* dan *piezoelectric* di *elbow* posisi *bend*
- c = *Clamp* dan *piezoelectric* di *elbow* posisi *outlet*
- d = *Clamp* tumpuan
- e = *Oscilloscope*
- f = *Probe accelerometer, clamp, dan plat*

3.4.3 Pengambilan Data Eksperimen

Eksperimen pada penelitian ini dilakukan pada sistem utama dengan *piezoelectric*. Eksperimen ini memiliki 2 jenis variasi yaitu variasi debit aliran fluida dan variasi posisi peletakkan *piezoelectric*.

Nilai bangkitan yang dihasilkan oleh getaran pada sistem utama dengan *piezoelectric* dapat diketahui dari pembacaan hasil osilasi sistem pada *oscilloscope* yang dihubungkan dengan *probe*

yang dipasangkan pada sistem perpipaan. Hasil yang didapatkan dari eksperimen nantinya dituliskan pada tabel 3.4 berikut.

Tabel 3. 4 Pengambilan Data Eksperimen

Variasi Kecepatan Fluida (liter/menit)	Respon Percepatan Getaran (m/s^2)			Respon Percepatan Getaran (m/s^2)			Tegangan Bangkitan (Volt)		
	Tanpa <i>Piezoelectric</i>			Menggunakan <i>Piezoelectric</i>					
	Pipa Lurus	Elbow Posisi Outlet	Elbow Posisi Bend	Pipa Lurus	Elbow Posisi Outlet	Elbow Posisi Bend	Pipa Lurus	Elbow Posisi Outlet	Elbow Posisi Bend
15									
25									
35									

Hasil eksperimen yang diperoleh berupa RMS respon percepatan getaran sistem utama tanpa *piezoelectric* dan dengan *piezoelectric*. Selanjutnya hasil pada kedua kondisi tersebut dibandingkan untuk mendapatkan reduksi respon getaran. Dari reduksi tersebut, dapat diketahui apakah pemasangan *piezoelectric* dan *clamp* mempengaruhi RMS respon percepatan. Data-data yang telah diperoleh disajikan ke dalam beberapa grafik sebagai berikut:

1. Grafik RMS respon percepatan translasi pada sistem utama tanpa *piezoelectric*.
2. Grafik RMS dan reduksi respon percepatan translasi pada sistem utama dengan *piezoelectric* untuk variasi debit aliran.
3. Grafik RMS dan reduksi respon percepatan translasi pada sistem utama dengan *piezoelectric* untuk variasi posisi peletakan *piezoelectric*.
4. Grafik RMS dan reduksi respon voltase translasi pada sistem utama dengan *piezoelectric* untuk variasi debit aliran.
5. Grafik RMS dan reduksi respon voltase translasi pada sistem utama dengan dengan *piezoelectric* untuk variasi posisi peletakan *piezoelectric*.

3.5 Analisa Data dan Pembahasan

Setelah diketahui data eksperimen yang telah dilakukan, maka dilakukan analisis dan pembahasan sesuai dasar teori yang

ada. Dari analisis data dan pembahasan yang dilakukan, dapat diketahui variabel-variabel yang mempengaruhi energi bangkitan yang dapat dihasilkan pada instalasi sistem perpipaan. Pembahasan dan penjelasan analisa tersebut digunakan sebagai acuan untuk menarik kesimpulan dari penelitian ini.

3.6 Kesimpulan

Dari hasil eksperimen yang didapatkan dan telah dilakukan pembahasan, maka dapat ditarik kesimpulan mengenai penelitian yang telah dilakukan. Kesimpulan yang ditulis merupakan inti pembahasan dari grafik RMS respon percepatan translasi pada sistem utama tanpa *piezoelectric*, grafik RMS dan reduksi respon percepatan translasi pada sistem utama dengan *piezoelectric* untuk variasi debit aliran, serta grafik RMS dan reduksi respon percepatan translasi pada sistem utama dengan *piezoelectric* untuk variasi posisi peletakan posisi *piezoelectric*. Serta menjawab rumusan masalah yang telah dituliskan pada Bab I sehingga tujuan dari penelitian dapat tercapai.

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Peralatan dan Pelaksanaan Eksperimen

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen yang dilakukan pada sistem utama berupa instalasi sistem perpipaan. Sistem perpipaan tersebut dioperasikan menggunakan pompa dengan debit aliran maksimum 300 liter/menit. Terdapat beberapa peralatan yang digunakan pada penelitian ini yang ditunjukkan pada gambar 4.1 berikut.



(a)



(b)



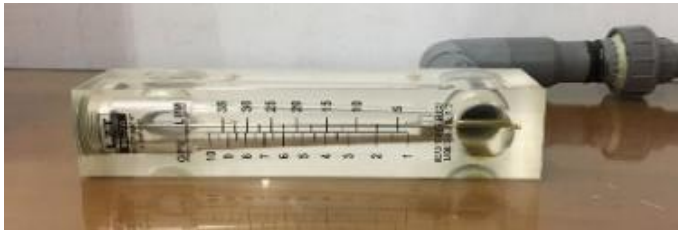
(c)



(d)



(e)



(f)

Gambar 4. 1 Alat Eksperimen (a) *Oscilloscope*, (b) *Adaptor*, (c) Kabel Penghubung *Adaptor* dengan *Oscilloscope*, (d) *Probe Accelerometer*, dan (e) *Probe Tegangan*, dan (f) *Flowmeter*

Oscilloscope merupakan alat untuk menampilkan dan merekam data hasil pembacaan *probe*. *Adaptor* berfungsi untuk memberikan daya pada sensor pendeteksi. Sedangkan *Probe accelerometer* berfungsi sebagai sensor pendeteksi respon getaran sistem utama yang dihubungkan dengan *adaptor* sebagai *supply* daya sensor pendeteksi. Dalam eksperimen ini dibutuhkan *probe accelerometer* sebanyak 1 buah untuk 1 buah *adaptor*. *Adaptor* dihubungkan dengan *oscilloscope* menggunakan kabel penghubung. *Probe voltmeter* berfungsi sebagai sensor pendeteksi respon tegangan yang dihasilkan oleh *Piezoelectric*. Dalam eksperimen ini dibutuhkan *probe voltmeter* sebanyak 1 buah dan dihubungkan langsung ke *channel oscilloscope*.

4.1.1 Sistem Utama

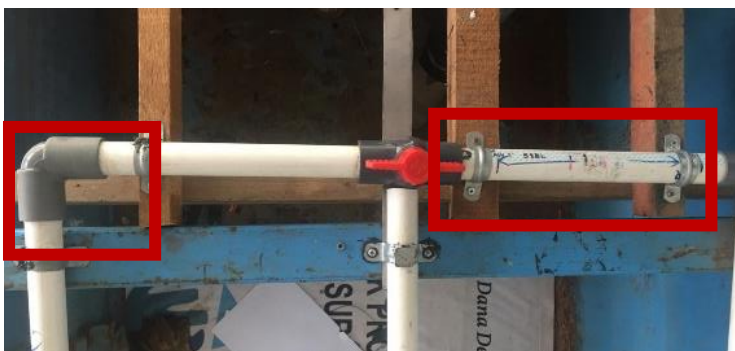
Sistem utama yang digunakan adalah pada pipa lurus dan *elbow* 90 diameter 1inch merk Wavin tipe AW berbahan material PVC dan *clamp* sebagai tumpuan pipa. Namun, pengujian hanya dilakukan dibagian tengah dari pipa lurus dengan posisi horizontal dan untuk *elbow* 90 dilakukan pada sudut 45 derajat *elbow*, dan setelah belokan pada *elbow*. Gambar 4.2 berikut merupakan komponen sistem utama yang dianalisa pada penelitian ini.



(a)



(b)



(c)



(d)



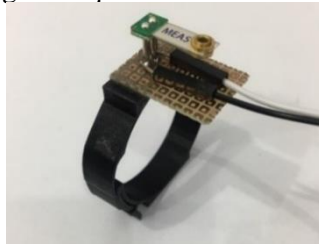
(e)

Gambar 4. 2 Sistem Utama (a) Pipa Lurus (b) *Elbow* 90 (c) Gabungan Pipa lurus dan *Elbow* 90 (d) Katup Pengatur Debit (e) Rangkaian Sistem Utama Keseluruhan

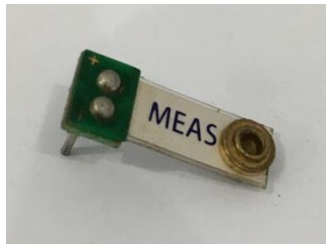
Berdasarkan gambar diatas dapat dilihat dalam pengujian ini menggunakan dua buah katup untuk mengatur debit aliran di dalam pipa. Katup berwarna merah digunakan untuk mengatur debit aliran pada pipa elbow posisi *bend* dan posisi *outlet*, sedangkan katup berwarna putih digunakan untuk mengatur debit aliran pada pipa lurus. Debit aliran yang diukur sudah sesuai dengan *flowmeter* di setiap posisinya.

4.1.2 *Piezoelectric Cantilever dan Clamp*

Pada penelitian ini menggunakan dua buah *piezoelectric* yang diletakkan diatas *clamp* khusus sebagai tumpuan dari *piezoelectric*. *Clamp* yang digunakan bermaterial *Polylactic acid* yang merupakan hasil dari 3D *printing* dengan diameter sesuai ukuran diameter luar pipa dan ketebalan 1 mm. Gambar 4.3 dibawah ini merupakan gambar komponen penyusun *piezoelectric* dan gambar *piezoelectric* secara keseluruhan.



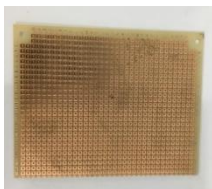
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Gambar 4. 3 (a) Rangkaian *Piezoelectric* dan *Clamp* (b) *Piezoelectric*, (c) *Clamp*, (d) PCB, (e) Kabel *Jumper Male*

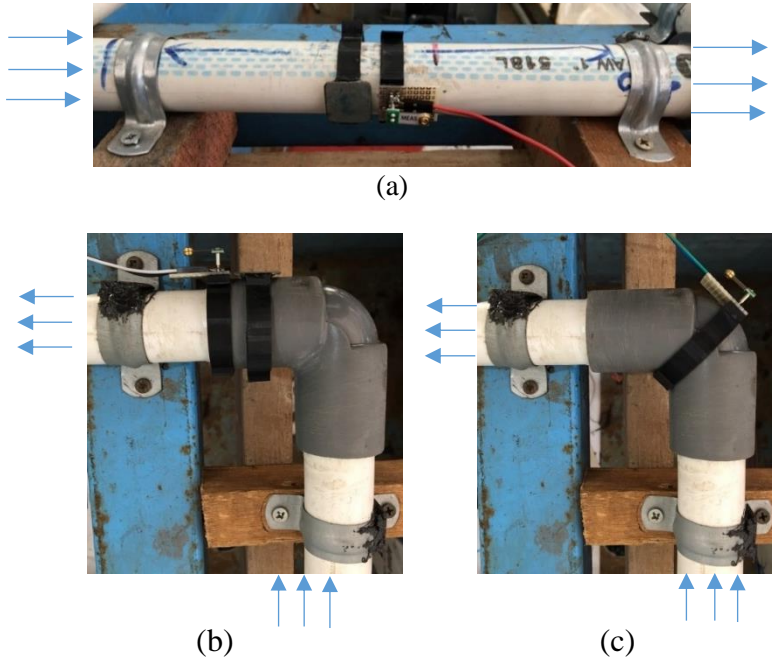
Pada gambar 4.3 di atas, terlihat bahwa rangkaian *piezoelectric* terdiri dari beberapa komponen yaitu satu buah *piezoelectric cantilever*, PCB board dengan ukuran 8 x 8 cm, kabel *jumper* dengan panjang 30 cm, dan *clamp 3D printing*. Ukuran *clamp 3D printing* yang telah dirancang sudah sesuai dengan ukuran diameter luar pipa dari masing-masing variasi posisi pengujian. Spesifikasi *clamp* dapat dilihat pada tabel 4.1 sebagai berikut.

Tabel 4. 1 Spesifikasi *Clamp Piezoelectric*

<i>Clamp</i> untuk Pipa Lurus	
Material	<i>Polylactic acid</i>
Diameter dalam (mm)	32
Tebal (mm)	1
Massa (Kg)	0,00087
<i>Clamp</i> untuk <i>Elbow</i> Posisi <i>Outlet</i> dan <i>Bend</i>	
Material	<i>Polylactic acid</i>
Diameter dalam (mm)	40
Tebal (mm)	1
Massa (Kg)	0,00106

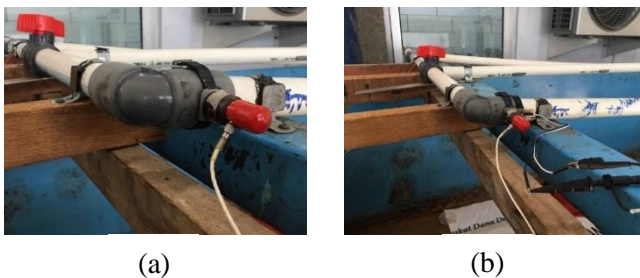
Piezoelectric hanya bergerak pada arah translasi. Penelitian pada sistem dilakukan pada variasi debit aliran dari eksitasi fluida 15 liter/menit, 25 liter/menit, dan 35 liter/menit serta variasi peletakkan *piezoelectric* di pipa lurus, *elbow* posisi *outlet* dan *elbow* posisi *bend* untuk mengetahui tegangan yang dihasilkan secara optimum. Penelitian dilakukan dengan variasi

peletakan *piezoelectric* seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.4 di bawah ini.



Gambar 4. 4 Variasi Posisi Peletakkan *Piezoelectric* (a) Pipa Lurus, (b) *Elbow* Posisi *Outlet*, (c) *Elbow* Posisi *Bend*

4.1.3 *Piezoelectric Cantilever dan Clamp*





(c)



(d)



(e)



(f)



(g)

Gambar 4. 5 Pelaksanaan Eksperimen Sistem Utama (a) *Elbow Outlet Tanpa Piezoelectric* (b) *Elbow Outlet Dengan Piezoelectric* (c) *Elbow Bend Tanpa Piezoelectric* (d) *Elbow Bend Dengan Piezoelectric* (e) *Pipa Lurus Tanpa Piezoelectric* (f) *Pipa Lurus Dengan Piezoelectric* (g) *Eksperimen Keseluruhan*

Gambar 4.5 diatas merupakan pelaksanaan eksperimen pada pipa lurus dan *elbow* 90 diameter 1inch merk Wavin tipe AW berbahan material PVC. Pada eksperimen ini hanya menggunakan satu buah *probe accelerometer* dan tegangan, satu buah kabel penghubung, dan satu buah *adaptor*. *Probe accelerometer* diletakkan pada masing-masing posisi variasi peletakkan pada pipa untuk menganalisa getaran di masing-masing pipa lurus dan *elbow* 90. *Probe accelerometer* diletakkan dibagian tengah dari pipa lurus dengan posisi horizontal untuk mendeteksi getaran translasi arah horizontal, untuk *elbow* posisi *outlet probe accelerometer* diletakkan disudut 45 derajat *elbow*, dan pada *elbow* posisi *bend probe accelerometer* diletakkan di posisi horizontal untuk mendeteksi getaran translasi arah horizontal. Pada pengujian elbow posisi bend, peletakkan probe accelerometer tidak dapat diletakkan secara bersamaan dikarenakan sudut elbow 90 yang digunakan pada penelitian ini memiliki sudut yang kecil. Oleh karena itu pada penelitian ini voltase bangkitan yang dihasilkan tidak mempresentasikan nilai percepatan yang dihasilkan karena pengujian tidak dilakukan secara bersamaan

Terdapat dua perlakuan yang diterapkan pada penelitian ini yaitu sistem utama tanpa *piezoelectric* dan sistem utama dengan *piezoelectric*. Pada sistem utama tanpa *piezoelectric* seperti gambar 4.5 (a), (c), dan (e) diterapkan variasi debit aliran air pada tiap titik posisi pengujian untuk melihat besarnya respon percepatan getaran pada setiap variasi debit aliran dan variasi posisi pengujian pada sistem perpipaan. Sedangkan untuk sistem utama dengan *piezoelectric* seperti gambar 4.5 (b), (d), dan (f) diterapkan variasi debit aliran air dan posisi peletakkan *piezoelectric* sehingga dapat diketahui perbedaan percepatan getarannya dan mengetahui voltase bangkitan pada setiap variasi. Mekanisme *piezoelectric* yang diletakkan di sisi luar sistem perpipaan dengan arah horizontal sesuai variasi posisi peletakkan dihubungkan ke *oscilloscope* menggunakan *probe voltmeter* untuk mendeteksi respon voltase bangkitan yang dihasilkan oleh sistem utama. Pada eksperimen ini sistem perpipaan dialiri air

menggunakan pompa dengan debit aliran 300 liter/menit dan nantinya dengan mengatur *valve* pada pipa aliran fluida dilakukan variasi debit aliran bor yaitu 35 liter/menit, 25 liter/menit, dan 15 liter/menit. Selain itu juga digunakan variasi peletakkan *piezoelectric* yaitu pipa lurus, *elbow* 90 di posisi *outlet* dan posisi *bend*.

4.2 Analisa Eksperimen

Penelitian ini dilakukan ketika pipa dialiri fluida air dari pompa dengan debit aliran 300 liter/menit. Eksperimen ini bertujuan untuk mengetahui besarnya respon percepatan getaran sebelum dan sesudah dipasang *piezoelectric* serta voltase bangkitan yang dihasilkan getaran pada pipa. Eksperimen ini hanya menganalisa getaran translasi horizontal saja pada pipa lurus dan translasi horizontal pada *elbow* 90.

Respon getaran yang diinginkan pada eksperimen ini adalah respon percepatan getaran translasi, namun, data yang terbaca pada *oscilloscope* berupa data waktu dan *voltase*. Oleh sebab itu, data hasil eksperimen harus dikonversi mejadi respon percepatan. Persamaan 4.1 berikut merupakan persamaan yang digunakan untuk mengkonversi data hasil eksperimen berupa *voltase* menjadi respon percepatan translasi.

$$\text{Respon} = G \frac{g}{10 \text{ mV} \times \text{pembesaran}} = G \frac{9.81 \text{ m/s}^2}{10 \text{ mV} \times \text{pembesaran}} \quad (4.1)$$

Keterangan:

G : Data angka *excel* dikalikan skala pembacaan pada *oscilloscope* (mV)

Pembesaran : Pembesaran pada *oscilloscope*

Untuk contoh, didapatkan data *excel* hasil pengukuran *oscilloscope* sebesar 0.0016. Kemudian diketahui juga skala pembacaan pada *oscilloscope* sebesar 5 mV dan menggunakan pembesaran 1x, maka hasil nilai responnya sebagai berikut.

$$\text{Respon} = (0.0016 \times 10 \text{ mV}) \frac{9.81 \text{ m/s}^2}{10 \text{ mV} \times 1} = 0.015696 \text{ m/s}^2$$

Setelah diketahui respon percepatan getarannya, maka dapat dilakukan proses *filtering* dan *smoothing* dengan *software* MATLAB untuk menghilangkan *noise* yang terjadi selama pengujian. Dari hasil *filtering* dan *smoothing* dapat diketahui nilai *Root Mean Square* (RMS) untuk masing-masing data hasil pengujian yang telah dilakukan. Respon yang didapat dibandingkan antara respon sistem utama sebelum penambahan *piezoelectric* dan setelah penambahan *piezoelectric*, sehingga perbedaan respon getaran dapat diketahui dalam bentuk persen dengan menggunakan persamaan (4.2) berikut.

$$\text{Reduksi} = \frac{RMS_1 - RMS_2}{RMS_1} \times 100\% \quad (4.2)$$

Keterangan:

RMS_1 : Nilai respon percepatan getaran sistem utama tanpa *piezoelectric* (m/s^2)

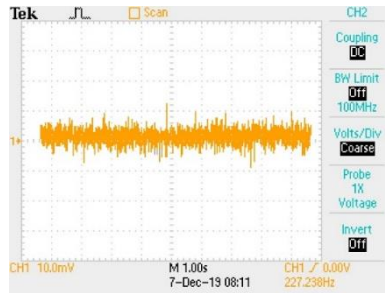
RMS_2 : Nilai respon percepatan getaran sistem utama dengan *piezoelectric* (m/s^2)

Sedangkan untuk mengolah data voltase dari *oscilloscope* yaitu dengan cara data voltase dikalikan dengan skala pembacaan *oscilloscope*. Karena data dari *oscilloscope* sudah dalam bentuk voltase.

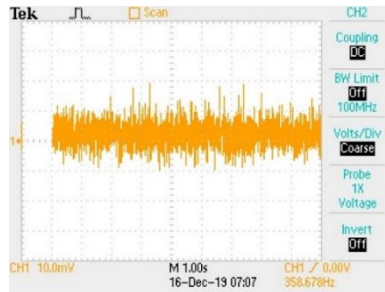
4.2.1 Sistem Utama Tanpa *Piezoelectric*

Dari eksperimen yang dilakukan terhadap sistem utama tanpa tambahan *piezoelectric* didapat respon getaran. Respon getaran sistem utama yang dianalisa adalah respon percepatan massa utama. Variasi yang dilakukan adalah variasi posisi sistem perpipaan dan debit aliran. Berikut ditunjukkan hasil eksperimen pada posisi pada *elbow* posisi *bend* dan variasi debit aliran 35

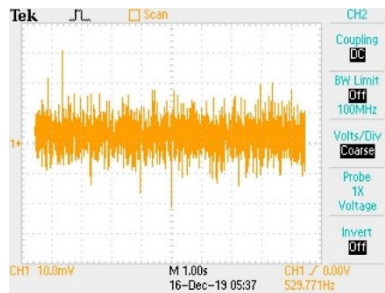
liter/menit yang terekam oscilloscope seperti terlihat pada gambar 4.6.



(a)

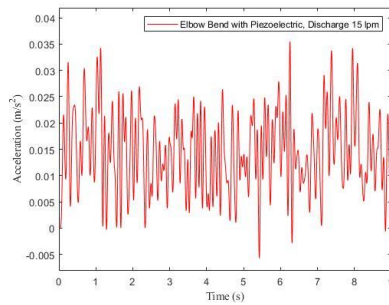


(b)

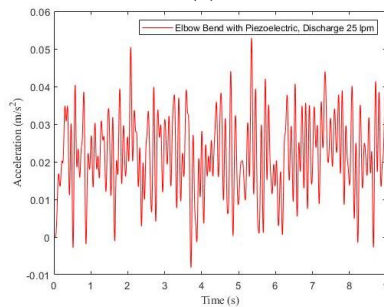


(c)

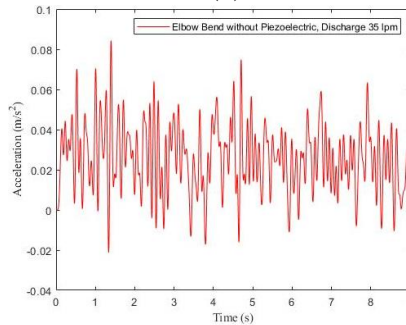
Gambar 4. 6 Hasil Pembacaan *Oscilloscope* Eksperimen Sistem Utama Tanpa *Piezoelectric* pada *Elbow* Posisi *Bend* dengan Debit Aliran (a) 15 liter/menit, (b) 25 liter/menit, dan (c) 35 liter/menit



(a)



(b)



(c)

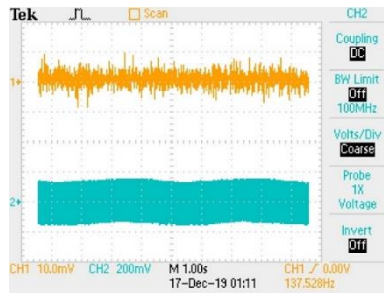
Gambar 4. 7 Hasil *Filtering* dan *Smoothing* Eksperimen Sistem Utama Tanpa *Piezoelectric* pada *Elbow* Posisi *Bend* dengan Debit Aliran (a) 15 liter/menit, (b) 25 liter/menit, dan (c) 35 liter/menit

Gambar 4.6 di atas merupakan data sistem utama pada *elbow* posisi *bend* tanpa *piezoelectric* hasil pembacaan *oscilloscope* dengan variasi debit aliran 15 liter/menit, 25 liter/menit, 35 liter/menit. Sedangkan gambar 4.7 merupakan hasil *filtering* dan *smoothing* sistem utama tanpa penambahan *piezoelectric* dengan variasi debit aliran 15 liter/menit, 25 liter/menit, 35 liter/menit menggunakan MATLAB. Hasil *filtering* dan *smoothing* menunjukkan bahwa sistem berhasil dan respon getarannya berupa respon percepatan terhadap waktu.

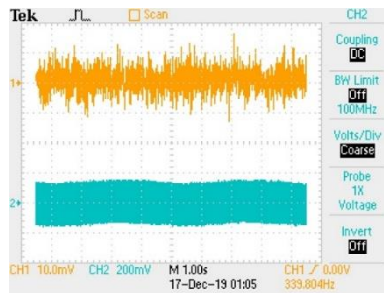
4.2.2 Sistem Utama dengan *Piezoelectric*

Pada eksperimen ini didapatkan respon percepatan getaran sistem utama dengan *piezoelectric*. Respon getaran yang dianalisa adalah respon percepatan getaran dari sistem perpipaan. Respon yang didapat selanjutnya dibandingkan dengan respon sistem utama tanpa penambahan *piezoelectric*, sehingga dapat diketahui reduksi respon getarannya dalam bentuk persentase dan voltase bangkitan yang dihasilkan oleh *piezoelectric*. Pada sistem utama dengan penambahan *piezoelectric* ini diterapkan kedua variasi yang telah ditentukan antara lain variasi debit aliran dan variasi peletakkan *piezoelectric*.

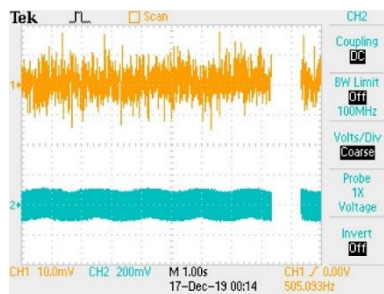
Grafik data *oscilloscope* ditunjukkan pada subbab ini. Variasi yang dilakukan adalah variasi debit aliran, dan peletakkan posisi *piezoelectric*. Berikut ditunjukkan hasil eksperimen pada variasi posisi peletakkan *piezoelectric elbow* posisi *outlet* dan debit aliran 25 liter/menit yang terekam *oscilloscope* seperti terlihat pada gambar 4.9 di bawah. Grafik yang berwarna kuning adalah respon percepatan dari *accelerometer probe*, dan warna biru adalah respon tegangan dari *voltage probe*.



(a)

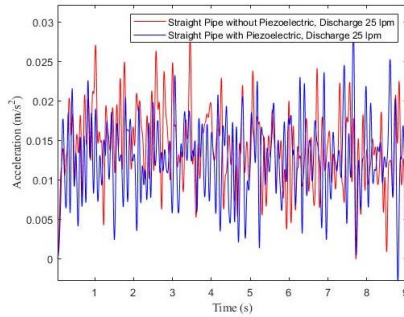


(b)

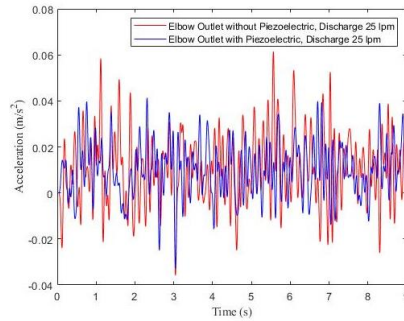


(c)

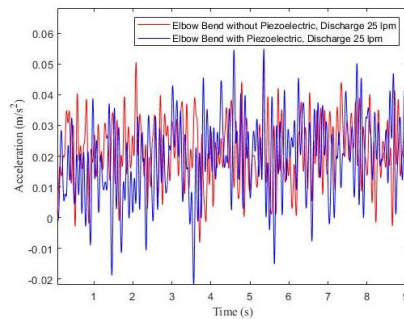
Gambar 4. 8 Hasil Pembacaan *Oscilloscope* Eksperimen Sistem Utama dengan *Piezoelectric* pada *Elbow* Posisi *Outlet* dengan Debit Aliran (a) 15 liter/menit, (b) 25 liter/menit, dan (c) 35 liter/menit



(a)



(b)



(c)

Gambar 4. 9 Perbandingan Hasil *Filtering* dan *Smoothing* Eksperimen Sistem Utama Tanpa *Piezoelectric* dan Penambahan *Piezoelectric* pada Debit Aliran 25 liter/menit dengan Variasi Peletakkan Posisi *Piezoelectric* pada (a) Pipa Lurus, (b) *Elbow* Posisi *Outlet*, dan (c) *Elbow* Posisi *Bend*

Gambar 4.8 di atas merupakan data sistem utama pada debit aliran *elbow* posisi *outlet* menggunakan *piezoelectric* hasil pembacaan *oscilloscope* dengan variasi debit aliran. Gambar 4.9 merupakan hasil perbandingan *filtering* dan *smoothing* sistem utama tanpa *piezoelectric* dan penambahan *piezoelectric* pada debit aliran 25 liter/menit dengan variasi peletakkan posisi *piezoelectric* pada pipa lurus, *elbow* posisi *outlet*, dan *elbow* posisi *bend* menggunakan MATLAB. Hasil *filtering* dan *smoothing* menunjukkan bahwa sistem beresilasi dan respon getarannya berupa respon percepatan terhadap waktu.

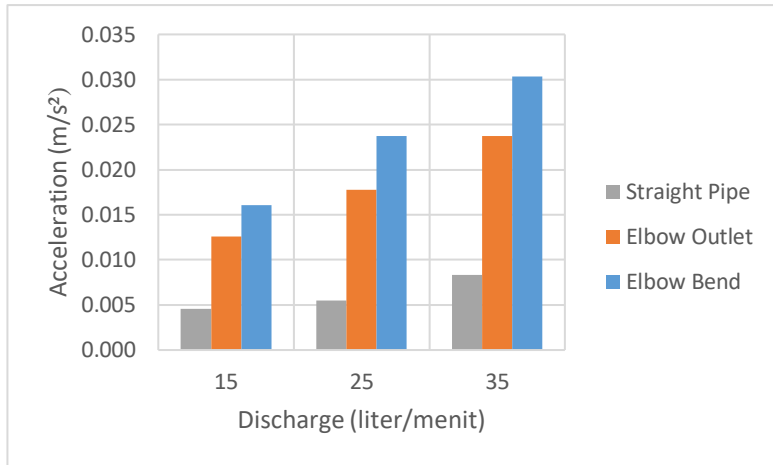
4.3 Analisa dan Pembahasan Data Eksperimen

4.3.1 Analisa dan Pembahasan Sistem Utama Tanpa *Piezoelectric*

Tabel 4.1 dan gambar 4.10 dibawah ini merupakan RMS respon percepatan hasil data yang terjadi pada sistem utama tanpa penambahan *piezoelectric* menggunakan masing-masing variasi ukuran debit aliran dan variasi peletakkan *piezoelectric*.

Tabel 4. 2 Nilai RMS Percepatan Hasil Eksperimen Sistem Utama Tanpa *Piezoelectric*

Debit Aliran	Pipa Lurus	<i>Elbow</i> Posisi <i>Outlet</i>	<i>Elbow</i> Posisi <i>Bend</i>
15 liter/menit	0.0046 m/s ²	0.0126 m/s ²	0.0161 m/s ²
25 liter/menit	0.0055 m/s ²	0.0178 m/s ²	0.0237 m/s ²
35 liter/menit	0.0083 m/s ²	0.0237 m/s ²	0.0303 m/s ²



Gambar 4. 10 Grafik RMS Percepatan Sistem Utama Tanpa Penambahan *Piezoelectric*

Berdasarkan tabel 4.1 dan gambar 4.10 di atas menunjukkan bahwa posisi pengujian pada sistem perpipaan dan variasi debit aliran mempengaruhi nilai RMS respon percepatan yang dihasilkan. Posisi pengujian pada sistem perpipaan memiliki nilai respon getaran yang berbeda-beda, dimana nilai respon getaran terendah terletak pada posisi pipa lurus dengan nilai percepatan 0.0046 m/s^2 dan peletakkan pada *elbow* posisi *bend* memiliki respon getaran tertinggi dengan nilai percepatan 0.0303 m/s^2 .

Kenaikan RMS respon percepatan berdasarkan posisi pengujian ini sudah sesuai teori dimana adanya *head loss* yang berbeda di setiap posisi pengujian menyebabkan RMS respon percepatan berbeda. Pipa lurus memiliki nilai RMS terkecil pada tiap pengukuran dengan debit yang sama. Hal ini disebabkan pada pipa lurus hanya terjadi *head loss* minor, dimana *head loss* terjadi karena gesekan dengan dinding pipa. Sedangkan pada *elbow bend* yang memiliki nilai RMS respon percepatan tertinggi terjadi *head loss* mayor dan minor. *Head loss* minor disebabkan oleh aliran yang bergesekan dengan dinding pipa dan *head loss* mayor

disebabkan *fitting elbow* dimana aliran menabrak tegak lurus pada dinding pipa *elbow*. Nilai *head loss* yang tinggi berbanding lurus dengan *pressure drop* yang terjadi sehingga kecepatan aliran fluida didalam pipa meningkat dan menyebabkan aliran semakin turbulen. Kenaikan turbulensi aliran diakibat oleh kenaikan bilangan Reynold.

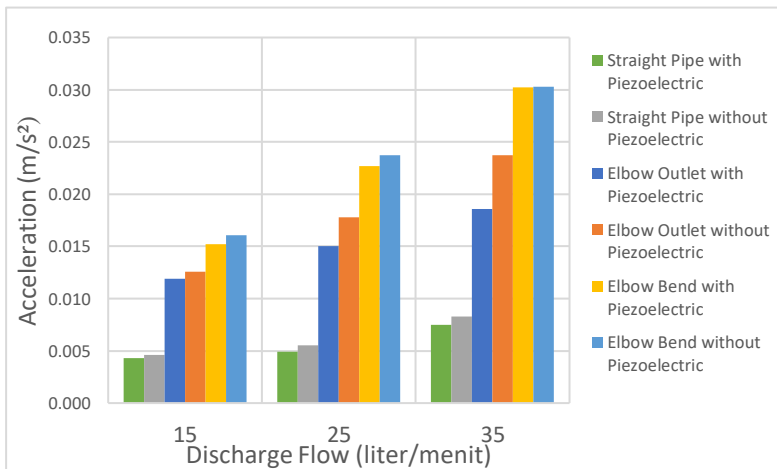
Dari tabel 4.1 dan gambar 4.10 diatas dapat diketahui bahwa nilai percepatan getaran translasi horizontal sistem utama berbanding lurus dengan variasi debit aliran, dimana semakin tinggi debit aliran maka semakin besar pula RMS respon percepatan yang dihasilkan. Nilai percepatan getaran tertinggi terjadi ketika debit aliran 35 liter/menit pada *elbow* posisi *bend* dengan nilai 0.0303 m/s^2 . Sedangkan nilai terendah pada posisi pengujian yang sama terjadi ketika debit aliran 15 liter/menit dengan nilai 0.0161 m/s^2 . Pada ukuran debit aliran 35 liter/menit dapat memiliki respon percepatan terbesar karena nilai bilangan Reynold pada debit ini lebih besar daripada variasi debit aliran lainnya. Untuk mengetahui besarnya bilangan Reynold yang terjadi pada setiap variasi debit aliran dapat menggunakan persamaan 2.1 dimana debit aliran berbanding lurus dengan besarnya bilangan Reynold.

4.3.2 Analisa dan Pembahasan Sistem Utama dengan *Piezoelectric*

Tabel 4.2 dan gambar 4.11 dibawah ini merupakan perbandingan RMS respon percepatan hasil data yang terjadi pada sistem utama tanpa penambahan *piezoelectric* dan dengan penambahan *piezoelectric* menggunakan variasi ukuran debit aliran dan variasi peletakkan *piezoelectric*.

Tabel 4. 3 Perbandingan Nilai RMS Percepatan Hasil Eksperimen Sistem Utama Tanpa *Piezoelectric* dan Dengan Menggunakan *Piezoelectric*

Variasi Kecepatan Fluida (liter/menit)	Respon Percepatan Getaran (m/s^2)			Respon Percepatan Getaran (m/s^2)		
	Tanpa <i>Piezoelectric</i>			Menggunakan <i>Piezoelectric</i>		
	Pipa Lurus	Elbow Posisi Outlet	Elbow Posisi Bend	Pipa Lurus	Elbow Posisi Outlet	Elbow Posisi Bend
15	0.0046	0.0126	0.0161	0.0043	0.0119	0.0152
25	0.0055	0.0178	0.0237	0.0049	0.015	0.0227
35	0.0083	0.0237	0.0303	0.0075	0.0186	0.0302



Gambar 4. 11 Grafik RMS Percepatan Sistem Utama Tanpa *Piezoelectric* dan Penambahan *Piezoelectric*

Dari gambar 4.11 diatas dapat diketahui bahwa respon percepatan getaran translasi pada benda kerja mengalami penurunan yang sangat kecil setelah ditambahkan *piezoelectric*. Respon percepatan getaran terendah terjadi ketika penambahan *piezoelectric* dan *clamp* pada debit aliran 15 liter/menit di pipa lurus yaitu $0.0043 m/s^2$. Respon percepatan getaran ketika penambahan *piezoelectric* dan *clamp* tertinggi pada debit aliran 35

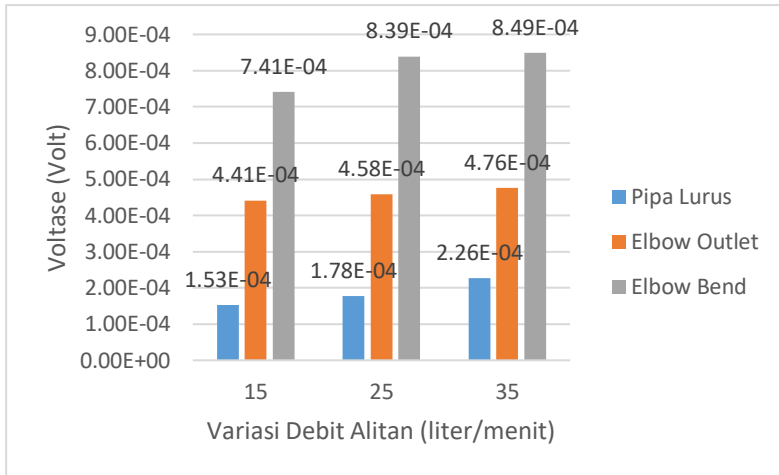
liter/menit di *elbow* posisi *bend* dengan nilai respon percepatan 0.0302 m/s^2 . Dari nilai hasil RMS dan grafik diatas menunjukkan bahwa ada penurunan yang sangat kecil antara getaran yang terjadi pada sistem perpipaan dengan menggunakan *piezoelectric* dibandingkan sistem perpipaan tanpa menggunakan *piezoelectric*. Hal ini disebabkan kecilnya massa *piezoelectric* serta *clamp* yang dipasang pada sistem perpipaan. Namun nilai respon percepatan setelah diletakkan *piezoelectric* tetap naik seiring meningkatnya debit aliran dan posisi peletakkan *piezoelectric* dimana posisi *elbow bend* memiliki RMS terbesar, sedangkan posisi pipa lurus miliki nilai RMS terkecil.

4.3.3 Analisa Respon Voltase dengan Variasi Debit Aliran dan Variasi Peletakkan *Piezoelectric*

Perbandingan grafik respon voltase bangkitan dijabarkan pada subbab ini. Grafik respon voltase sistem pada variasi peletakkan *piezoelectric* dan debit aliran gambar 4.12.

Tabel 4. 4 Nilai RMS Voltase Bangkitan Sistem *Piezoelectric* Variasi Debit Aliran dan Peletakkan *Piezoelectric*

Variasi Debit Fluida (liter/menit)	Respon Percepatan Getaran (m/s^2)			Respon Percepatan Getaran (m/s^2)			Tegangan Bangkitan (Volt)		
	Tanpa <i>Piezoelectric</i>			Menggunakan <i>Piezoelectric</i>					
	Pipa Lurus	<i>Elbow</i> Posisi <i>Outlet</i>	<i>Elbow</i> Posisi <i>Bend</i>	Pipa Lurus	<i>Elbow</i> Posisi <i>Outlet</i>	<i>Elbow</i> Posisi <i>Bend</i>	Pipa Lurus	<i>Elbow</i> Posisi <i>Outlet</i>	<i>Elbow</i> Posisi <i>Bend</i>
15	0.0046	0.0126	0.0161	0.0044	0.0119	0.0152	1.53E-04	4.41E-04	7.95E-04
25	0.0055	0.0178	0.0237	0.0049	0.015	0.0227	1.78E-04	4.58E-04	8.39E-04
35	0.0083	0.0237	0.0303	0.0075	0.0186	0.0302	2.26E-04	4.76E-04	8.49E-04



Gambar 4. 12 Grafik RMS Voltase Sistem Utama dengan Variasi Peletakkan *Piezoelectric* pada Sistem Utama dan Variasi Debit Aliran

Grafik RMS voltase bangkitan sistem dengan *piezoelectric* hasil eksperimen pada gambar 4.12 memiliki tren grafik yang naik. Tren grafik meningkat seiring meningkatnya debit aliran. Nilai tegangan maksimum pada debit aliran 35 liter/menit dengan nilai tegangan $8.49E-04$, dan nilai minimum pada frekuensi 15 liter/menit dengan voltase bangkitan sebesar $1.53E-04$. Namun peningkatan voltase bangkitan pada variasi debit aliran memiliki perbedaan yang sangat kecil.

Sedangkan peningkatan voltase bangkitan pada variasi peletakkan *piezoelectric* lebih tinggi daripada variasi debit aliran. Perbedaan nilai voltase bangkitan antara 15 liter/menit dibandingkan 25 liter/menit pada pipa lurus sebesar $0,25E-04$ atau 1,67 % dari nilai voltase bangkitan awal. Sedangkan peningkatan voltase bangkitan yang disebabkan variasi peletakkan *piezoelectric* pada *elbow* posisi *outlet* dan *elbow* posisi *bend* pada debit 35 liter/menit sebesar $3.73E-4$ Volt atau mengalami kenaikan 78% dari voltase bangkitan awal.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang diperoleh dari penelitian yang telah dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Nilai RMS respon percepatan sistem utama tanpa *piezoelectric* berbanding lurus dengan debit aliran fluida. Hal ini dapat dilihat untuk posisi pengujian *elbow* posisi *bend* nilai percepatan tertinggi terjadi pada debit aliran 35 liter/menit dengan RMS respon percepatan sebesar $0,0303 \text{ m/s}^2$ sedangkan percepatan terendah terjadi pada debit aliran 15 liter/menit sebesar $0,0046 \text{ m/s}^2$. Hal ini disebabkan meningkatnya debit aliran berbanding lurus dengan nilai bilangan Reynoldnya, sehingga peningkatan debit aliran mampu menyebabkan turbulen aliran didalam pipa semakin tinggi dan mampu menciptakan getaran pada sistem perpipaan.
2. Nilai RMS respon percepatan sistem utama dengan *piezoelectric* terbesar pada debit aliran 35 liter/menit dengan variasi peletakkan *piezoelectric* di *elbow* posisi *bend* sebesar 0.0302 m/s^2 , sedangkan nilai RMS respon percepatan terendah terletak pada pipa lurus sebesar 0.0042 m/s^2 . Dari hasil yang didapat, nilai RMS respon percepatan tertinggi terletak pada *elbow* posisi *bend*, selanjutnya *elbow* posisi *outlet*, dan yang terakhir pipa lurus dengan respon percepatan terendah. Dari pengujian ini dapat disimpulkan bahwa posisi peletakkan pengujian pada sistem perpipaan berpengaruh terhadap RMS respon percepatan. Hal ini dikarenakan *head loss* yang terjadi pada tiap posisi berbeda, dimana pada *elbow* posisi

bend memiliki *head loss* yang besar karena mencakup *head loss* mayor dan minor, sedangkan pada *elbow* posisi *outlet* dan pipa lurus hanya memiliki *head loss* minor, sehingga *pressure drop* yang terbesar terjadi di *elbow* posisi *bend*.

3. Voltase bangkitan optimum didapatkan dari eksperimen sistem utama dengan variasi peletakkan posisi *piezoelectric* di *elbow* posisi *bend* pada debit aliran 35 liter/menit yaitu sebesar $8.49E-04$ Volt. Sedangkan untuk voltase bangkitan minimum terjadi pada variasi peletakkan posisi *piezoelectric* di pipa lurus pada debit aliran 15 liter/menit sebesar $1.53E-04$.

5.2 Saran

Adapun saran dari penelitian yang telah dilakukan dengan metode eksperimen adalah sebagai berikut:

1. Sebaiknya melakukan perhitungan terkait nilai *pressure drop* yang terjadi pada sistem perpipaan.
2. Sebaiknya pengujian menggunakan *elbow* 90 yang lebih besar sehingga mampu menguji getaran dan voltase bangkitan secara bersamaan.
3. Sebaiknya alat uji *flowmeter* yang digunakan memiliki kapasitas pengujian debit aliran yang lebih tinggi sehingga pengujian dengan variasi debit aliran mampu mendapatkan sample nilai debit yang lebih tinggi.
4. Sebaiknya diperiksa ulang pemasangan kabel penghubung dari *oscilloscope* ke *adaptor* dan kabel penghubung dari *adaptor* ke *probe accelerometer* supaya data yang didapatkan akurat.

DAFTAR PUSTAKA

- Abrol, S., & Chhabra, D. (2018, Feb). **Experimental Investigation of Piezoelectric Energy**. International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development (IJMPERD), 704-710.
- Al-Hashimy, Z. I., Al-Kayiem, H. H., & Time, R. (2016, Oktober). **Experimental Investigation on the Vibration Induced**. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 12134-12139.
- Arafa.M, Akl. W, Majeed. M, Al-Hussain. K, & Baz. A. (2010). **Energy Harvesting of Gas Pipeline Vibration**. Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems, 76430L 9-11.
- Efendy, W. R. (2017, Januari). **Pemodelan dan Analisa Reduksi Respon Getaran Translasi pada Sistem Utama dan Energi Listrik yang Dihasilkan oleh Mekanisme Dynamic Vibration Absorber Metode Cantilever Piezoelectric (CPVA)**. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Khot, S., Khair, P., & Naik, A. (2017). **Experimental and Simulation Study of flow Induced**. International Conference on Nascent Technologies in the Engineering Field.
- Malau, J., & Sitepu, T. (2012). **Analisa Pressure Drop pada sistem Perpipaan Fuel Oil Boiler pada PT.PLN Pembangkitan Sumatera Bagian Utara Sicanang-**

Belawan dengan Menggunakan Pipe Flow Expert.
Jurnal E-Dinamis, 167-168.

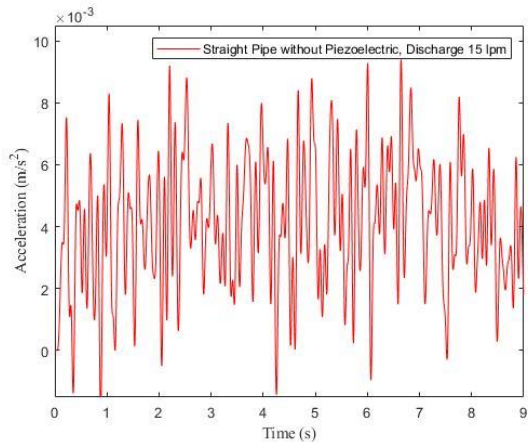
Putranto, A. A. (2018). **Desain dan Layouting Instalasi Sistem Perpipaan dengan *Software* Plant Design Management System (PDMS).** Yogyakarta: Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.

Rao, & Singiresu , S. (2011). **Mechanical Vibration (Fifth Edition ed.).** Upper Saddle River: Pearson Education. Inc.

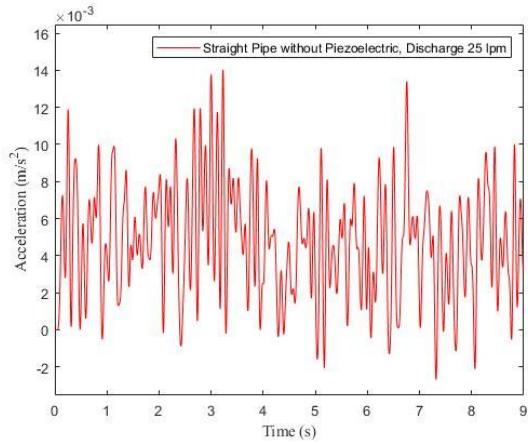
Sinha, D. N. (2005, August 12). **Power Generation in Pipeline.** United States: Los Alamos National Laboratory.

Surya, P. I. (2017). **Pengujian Karakteristik Aliran pada Sistem Perpipaan dengan Menggunakan Peralatan Eksperimen Fenomena Kavitasi.** Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

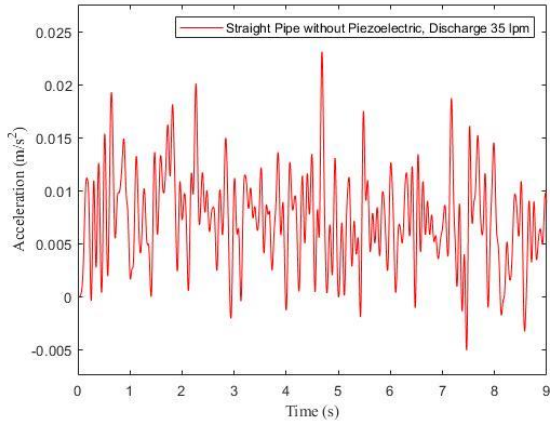
LAMPIRAN



(a)

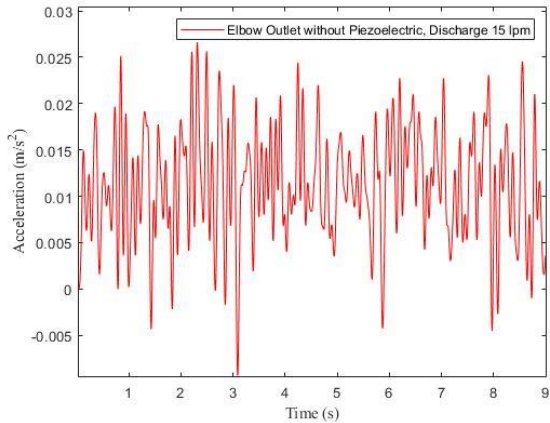


(b)

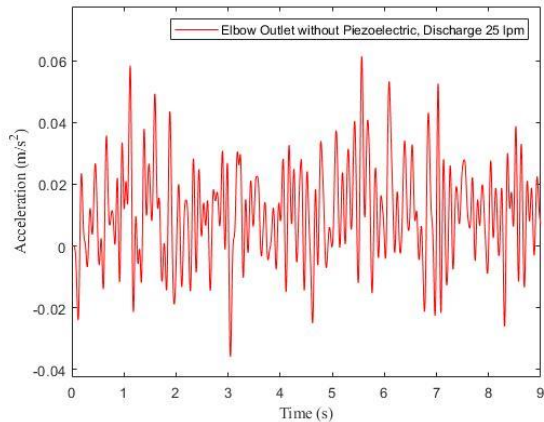


(c)

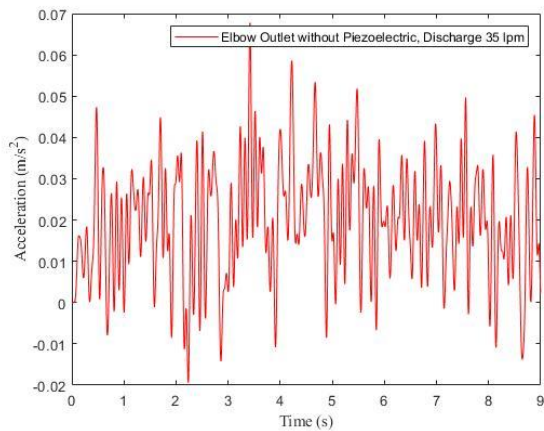
Gambar 1 Hasil *Filtering* dan *Smoothing* Sistem Utama Tanpa *Piezoelectric* pada Posisi Pengujian Pipa Lurus dengan Debit Aliran (a) 15 liter/menit; (b) 25 liter/menit; (c) 35 liter/menit.



(a)

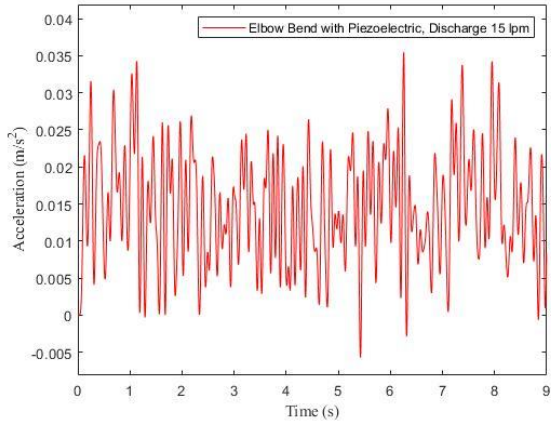


(b)

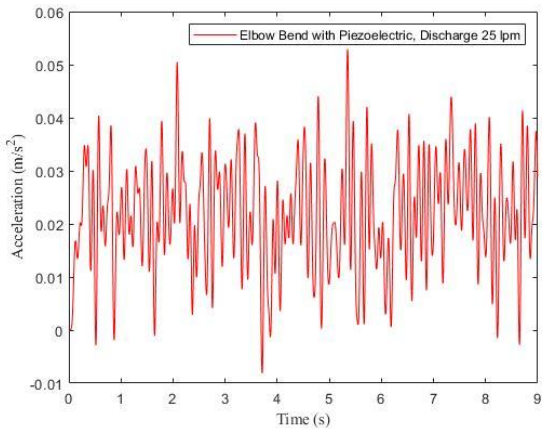


(c)

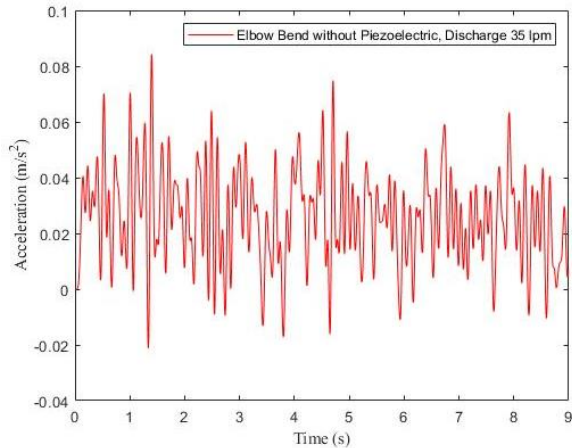
Gambar 2 Hasil *Filtering* dan *Smoothing* Sistem Utama Tanpa *Piezoelectric* pada Posisi Pengujian *Elbow* Posisi *Outlet* dengan Debit Aliran (a) 15 liter/menit; (b) 25 liter/menit; (c) 35 liter/menit.



(a)

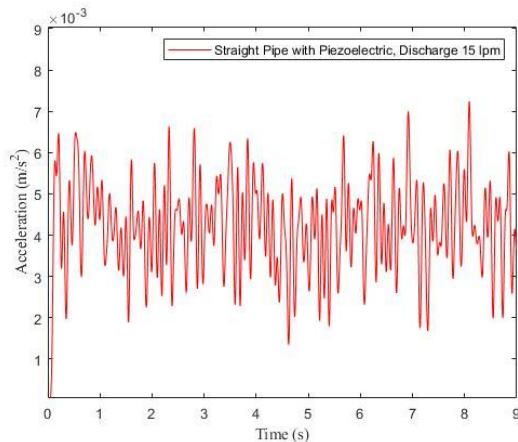


(b)

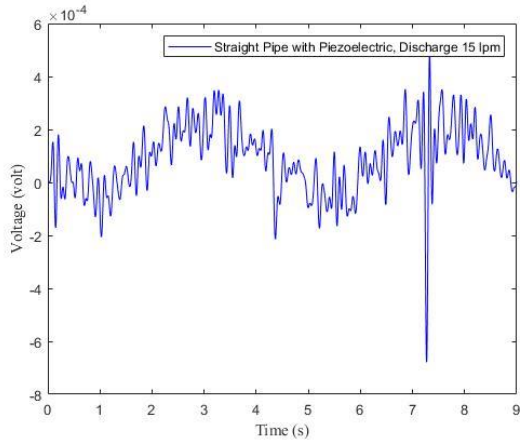


(c)

Gambar 3 Hasil *Filtering* dan *Smoothing* Sistem Utama Tanpa *Piezoelectric* pada Posisi Pengujian *Elbow* Posisi *Bend* dengan Debit Aliran (a) 15 liter/menit; (b) 25 liter/menit; (c) 35 liter/menit.

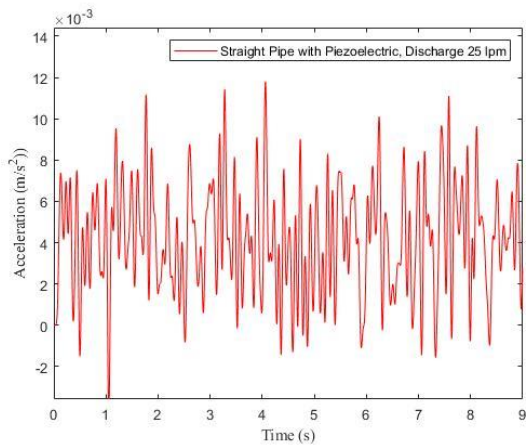


(a)

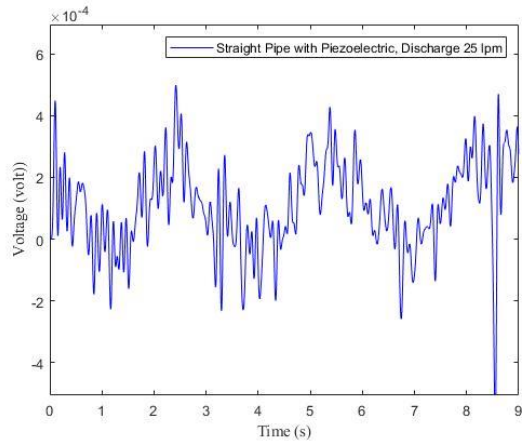


(b)

Gambar 4 Hasil *Filtering* dan *Smoothing* Sistem Utama dengan *Piezoelectric* pada Posisi Pengujian Pipa Lurus dengan Debit Aliran 15 liter/menit (a) Translasi; (b) Voltase.

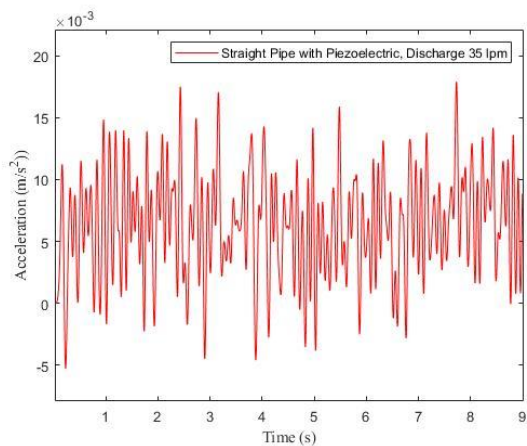


(a)

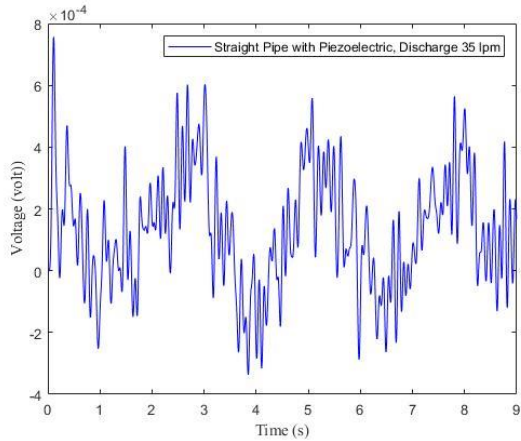


(b)

Gambar 5 Hasil *Filtering* dan *Smoothing* Sistem Utama dengan *Piezoelectric* pada Posisi Pengujian Pipa Lurus dengan Debit Aliran 25 liter/menit (a) Translasi; (b) Voltase.

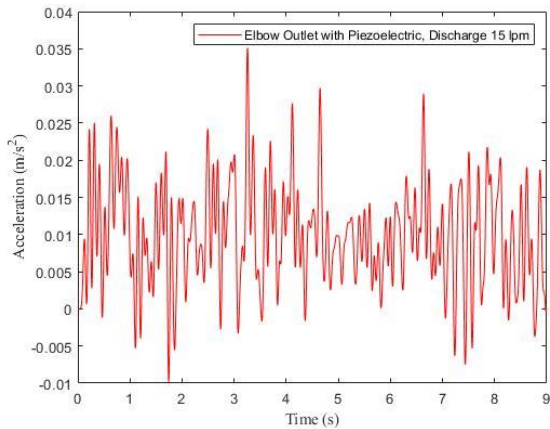


(a)

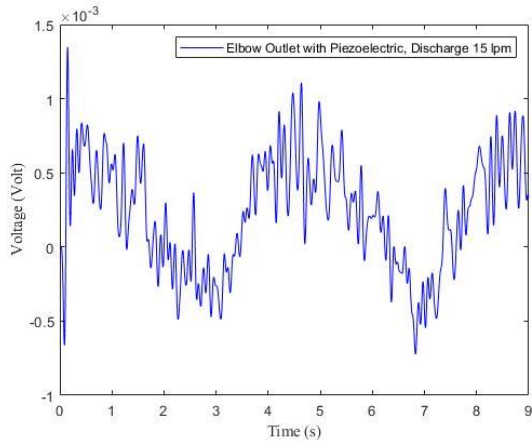


(b)

Gambar 6 Hasil *Filtering* dan *Smoothing* Sistem Utama dengan *Piezoelectric* pada Posisi Pengujian Pipa Lurus dengan Debit Aliran 35 liter/menit (a) Translasi; (b) Voltase.

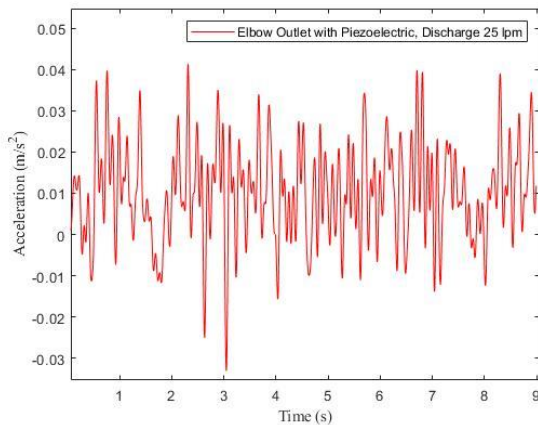


(a)

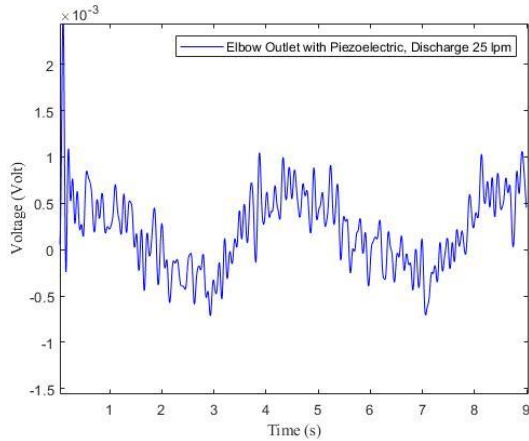


(b)

Gambar 7 Hasil *Filtering* dan *Smoothing* Sistem Utama dengan *Piezoelectric* pada Posisi Pengujian *Elbow Outlet* dengan Debit Aliran 15 liter/menit (a) Translasi; (b) Voltase.

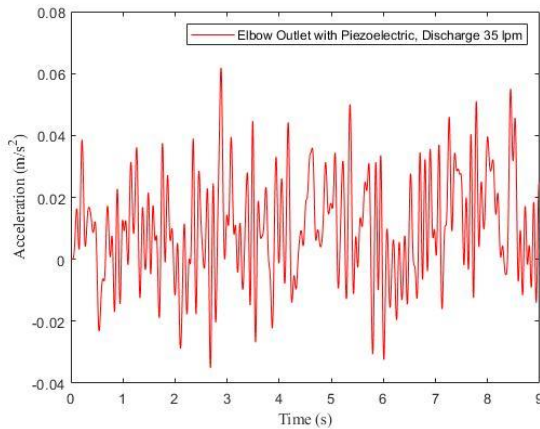


(a)

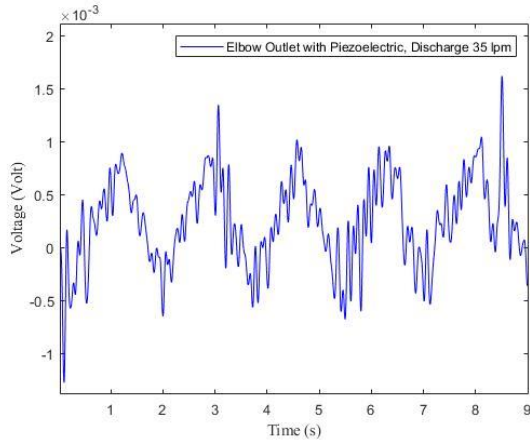


(b)

Gambar 8 Hasil *Filtering* dan *Smoothing* Sistem Utama dengan *Piezoelectric* pada Posisi Pengujian *Elbow Outlet* dengan Debit Aliran 25 liter/menit (a) Translasi; (b) Voltase.

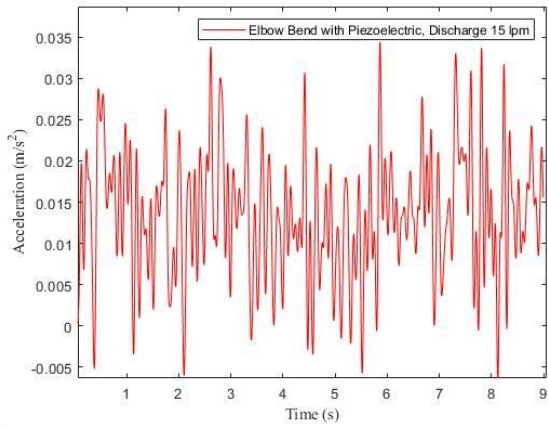


(a)

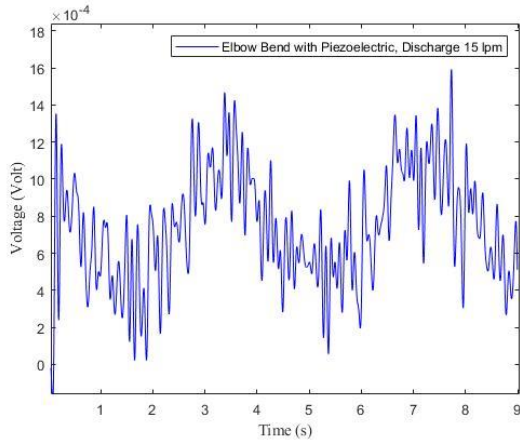


(b)

Gambar 9 Hasil *Filtering* dan *Smoothing* Sistem Utama dengan *Piezoelectric* pada Posisi Pengujian *Elbow Outlet* dengan Debit Aliran 35 liter/menit (a) Translasi; (b) Voltase.

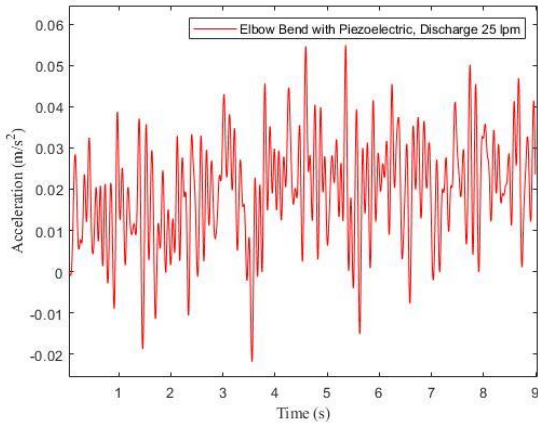


(a)

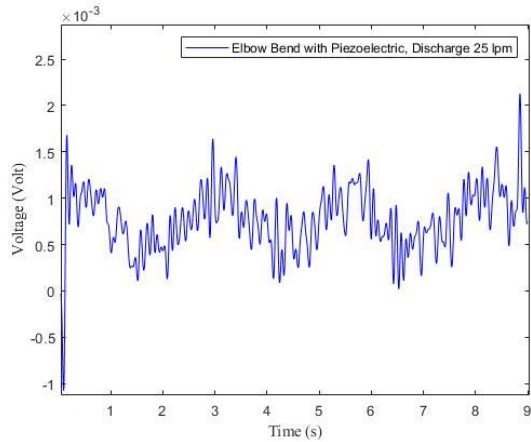


(b)

Gambar 10 Hasil *Filtering* dan *Smoothing* Sistem Utama dengan *Piezoelectric* pada Posisi Pengujian *Elbow Bend* dengan Debit Aliran 15 liter/menit (a) Translasi; (b) Voltase.

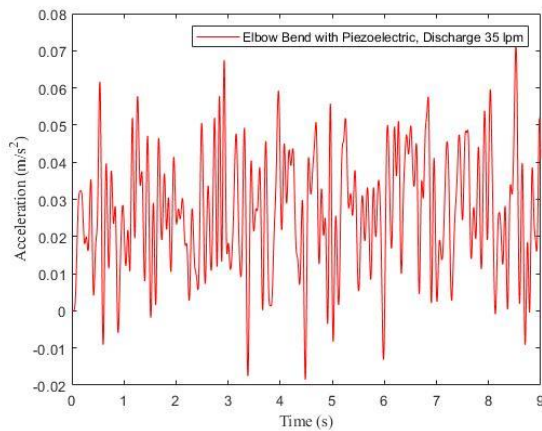


(a)

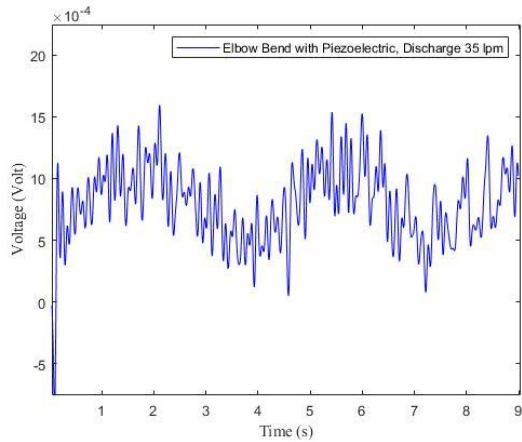


(b)

Gambar 11 Hasil *Filtering* dan *Smoothing* Sistem Utama dengan *Piezoelectric* pada Posisi Pengujian *Elbow Bend* dengan Debit Aliran 25 liter/menit (a) Translasi; (b) Voltase.



(a)



(b)

Gambar 12 Hasil *Filtering* dan *Smoothing* Sistem Utama dengan *Piezoelectric* pada Posisi Pengujian *Elbow Bend* dengan Debit Aliran 35 liter/menit (a) Translasi; (b) Voltase.

BIODATA PENULIS



Barelvi Ghazy Daffa dilahirkan di Jember, 16 April 1997. Terlahir dari pasangan Erry Septianto dan Effiawati Puji Rahayu serta memiliki satu adik yang bernama Tazkia Fastsbicha. Menempuh Pendidikan sekolah dasar di SD Negeri Rawa Barat 07 Jakarta pada tahun 2003, kemudian melanjutkan pendidikan ke jenjang sekolah menengah pertama di SMPN 115 Jakarta pada tahun 2009, selanjutnya menempuh sekolah menengah atas di SMA Negeri 8 Jakarta pada tahun 2012.

Penulis melanjutkan pendidikan ke jenjang perguruan tinggi di Departemen Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya pada tahun 2015-2020.

Penulis aktif dalam kegiatan akademik maupun non-akademik di lingkungan kampus maupun lingkungan departemen Teknik Mesin. Penulis tergabung dalam organisasi BEM ITS Kementerian Sosial Masyarakat (Sosmas). Penulis juga aktif dalam berbagai kegiatan kepanitiaan di Departemen Teknik Mesin. Dalam kegiatan akademik, penulis aktif menjadi asisten laboratorium Vibrasi dan Sistem Dinamis khususnya untuk praktikum mata kuliah mekanika getaran.

Motto hidup dari penulis adalah *“There are things which must cause you to lose your dream or you have nothing to lose”* yang menjadikan penulis selalu tidak menyerah dalam menghadapi suatu masalah baru dan tetap semangat serta optimis untuk mencapai impian yang diinginkan. Untuk informasi dan masukan untuk penulis terkait laporan Tugas Akhir ini dapat menghubungi melalui email: barelvidg@gmail.com