



TUGAS AKHIR - TM184835

PEMODELAN DAN SIMULASI *VIBRATION ENERGY HARVESTING* DENGAN MENGGUNAKAN MEKANISME *CANTILEVER PIEZOELECTRIC BEAM* PADA INSTALASI PIPA LURUS DAN *ELBOW*

Kevin Harris Setiawan
NRP 0211154000183

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

PEMODELAN DAN SIMULASI *VIBRATION ENERGY HARVESTING* DENGAN MENGGUNAKAN MEKANISME *CANTILEVER PIEZOELECTRIC BEAM* PADA INSTALASI PIPA LURUS DAN *ELBOW*

Kevin Harris Setiawan
NRP 0211154000183

Dosen Pembimbing
Dr. Wiwiek Hendrowati, ST, MT.

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya, 2020



FINAL PROJECT - TM184835

**MODELING AND ANALYSIS OF VIBRATION
ENERGY HARVESTING USING CANTILEVER
PIEZOELECTRIC BEAM MECHANISM ON
STRAIGHT AND ELBOW PIPE INSTALATION**

Kevin Harris Setiawan
NRP 02111540000183

Advisory Lecturer
Dr. Wiwiek Hendrowati, ST, MT.

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya, 2020

PEMODELAN DAN SIMULASI *VIBRATION ENERGY HARVESTING* DENGAN MENGGUNAKAN MEKANISME *CANTILEVER PIEZOELECTRIC BEAM* PADA INSTALASI PIPA LURUS DAN *ELBOW*

TUGAS AKHIR

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

Oleh:

Kevin Harris Setiawan

NRP. 02111540000183

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Dr. Wiwiek Hendrowati, S.T., M.T. (Pembimbing)
NIP. 197004121997032003
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, M.T. (Penguji III)
NIP. 196807061999031004

SURABAYA

JANUARI, 2020

PEMODELAN *ENERGY HARVESTING* GETARAN PADA PIPA LURUS DAN *ELBOW* MENGGUNAKAN *CANTILEVER PIEZOELECTRIC*

Nama Mahasiswa : Kevin Harris Setiawan
NRP : 02111540000183
Departemen : Teknik Mesin FTIRS-ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Wiwiek Hendrowati, S.T., M.T.

ABSTRAK

Gesekan antara fluida dengan dinding pipa dapat menimbulkan getaran pada pipa. Apabila amplitudo getaran pipa tersebut besar, maka akan menghambat aliran fluida di dalamnya menyebabkan debit aliran tidak konstan. Amplitudo getaran tertinggi terjadi pada saat resonansi, dimana frekuensi natural sama dengan frekuensi eksitasinya. Potensi energi dari getaran yang tinggi ini dapat dimanfaatkan oleh *cantilever piezoelectric* sebagai elemen *energy harvesting*. Listrik dapat dihasilkan dari defleksi *cantilever piezoelectric* yang bergerak naik turun disebabkan oleh getaran yang terjadi.

Penelitian tugas akhir ini membahas tentang simulasi *energy harvesting* menggunakan *cantilever piezoelectric* yang bertujuan untuk memanfaatkan energi getaran dari pipa lurus dan pipa *elbow*. Sistem perpipaan yang disimulasikan menggunakan pipa PVC dengan bentuk rangkaian pipa dibuat khusus berskala laboratorium. Pipa lurus berdiameter dalam 28 mm dengan tebal 4 mm sedangkan pipa *elbow* berdiameter dalam 32,5 mm dengan

tebal 7,6 mm. Pada pipa lurus diasumsikan getaran hanya terjadi secara vertikal, sedangkan pada pipa *elbow* getaran terjadi secara vertikal maupun horizontal. *Cantilever piezoelectric* diletakan di atas klem pipa kemudian dipasangkan di 3 posisi, yaitu: pipa lurus, pipa *elbow outlet*, dan pipa *elbow bend*. Setiap titik memiliki sebuah *cantilever piezoelectric* dengan spesifikasi yang sama. Aliran air yang melalui sistem perpipaan divariasikan menjadi 3 kecepatan yaitu 0,3 m/s; 0,5 m/s; 0,7 m/s.

Dari penelitian yang telah dilakukan, didapatkan hasil voltase bangkitan optimum yang dihasilkan *cantilever piezoelectric* pada posisi *elbow bend* pada kecepatan 0,7 m/s, besar voltase bangkitan sebesar 1,686 mV. Rancangan dioperasikan pada frekuensi operasi 40 Hz dengan gaya eksitasi 0.3676 N.

Kata kunci : *Energy Harvesting, Cantilever piezoelectric, Flow induced vibration, Sistem perpipaan.*

**MODELING AND ANALYSIS OF VIBRATION
ENERGY HARVESTING USING CANTILEVER
PIEZOELECTRIC BEAM MECHANISM ON
STRAIGHT AND ELBOW PIPE INSTALATION**

Student's Name : Kevin Harris Setiawan
NRP : 02111540000183
Departement : Mechanical Engineering FTIRS-ITS
Advisory Lecturer : Dr. Wiwiek Hendrowati, S.T., M.T.

ABSTRACT

Friction between the fluid and the pipe wall able to cause vibration in the pipe. If the amplitude of the pipe vibration is large, it will obstruct the fluid flow causing it to be inconstant. The highest amplitude occurs at resonance, where natural frequency is equal to excitation frequency. The potency of energy from this high vibration can be utilized by cantilever piezoelectric as energy harvesting element. Electricity can be generated from cantilever piezoelectric deflection which moves up and down by vibration occurred.

This research will discuss about energy harvesting simulation using cantilever piezoelectric from straight and elbow pipe vibration. The piping system made by PVC material in a laboratory scale. Straight pipe diameter is 28 mm and 4 mm thick while elbow pipe diameter is 32,5 mm and 7,6 mm thick. Assumed for straight pipe vibration only occurs vertically, whereas elbow pipe occurs both vertically dan horizontally. Cantilever

piezoelectric is placed on top of pipe then planted in 3 positions, namely: straight pipe, elbow outlet, and elbow bend. Each position has one cantilever piezoelectric with the same specification. Water flows velocity varied to 3 speeds: 0,3 m/s; 0,5 m/s; 0,7 m/s.

From the research that has been done, the optimum voltage generated by cantilever piezoelectric in the elbow bend position at a speed of 0,7 m/s valued 1,686 mV. The design operated at a frequency of 40 Hz with excitation force 0,3676 N.

Keyword : Energy Harvesting, Cantilever piezoelectric, Flow induced vibration, Piping system.

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 “Pemodelan dan Simulasi *Vibration Energy Harvesting* dengan Menggunakan *Cantilever Piezoelectric Beam* pada Instalasi Pipa Lurus dan *Elbow*” meskipun tertatih.

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. Untuk itu penulis sangat mengucapkan terima kasih kepada:

1. Keluarga penulis, papa saya Herry Suhardiman dan mama saya Ucu Masitoh. Tidak lupa saudari kandung penulis Keyva Harris Sakhi. Mereka tak henti-hentinya mendoakan dan memberikan dukungan moral 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. Ibu Aida Annisa Amin Daman, ST., MT., Bapak Ir. Julendra Bambang Ariatedja, MT., Bapak Dr. Eng. Harus Laksana Guntur, ST., M.Eng., selaku dosen penguji yang memberikan

kritik, saran, dan masukan dari Seminar Proposal Tugas Akhir hingga Sidang Tugas Akhir. Juga segenap dosen karyawan Departemen Teknik Mesin FTI-ITS, atas ilmu dan bimbingan yang telah diberikan kepada penulis selama menjalani empat setengah tahun perkuliahan.

4. Alya Nadhifa Fauzia yang selalu mendoakan juga memberikan dukungan moral dari jauh.
5. Kawan satu kelompok Tugas Akhir yaitu Barel, 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.
6. 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

ABSTRAK.....	iv
ABSTRACT	vi
KATA PENGANTAR.....	viii
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR TABEL.....	xx
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Manfaat.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Sistem Perpipaan	5
2.1.1 Bahan-bahan Pipa Secara Umum	6
2.1.2 Sambungan Tipe <i>Elbow</i>	6
2.2 Mekanika Getaran	6
2.2.1 <i>Multi Degree of Freedom (MdoF)</i>	6
2.2.2 <i>Base Motion Vibration</i>	8
2.3 Fluida	10
2.3.1 Tipe Aliran	11
2.3.2 Aliran Fluida di Dalam Pipa.....	12
2.4 <i>Piezoelectric</i>	14
2.4.1 Energi Bangkitan <i>Piezoelectric</i>	16

2.4.2	<i>Cantilever Piezoelectric</i>	18
2.4.3	Susunan <i>Piezoelectric</i>	21
2.5	Tinjauan Pustaka.....	22
BAB III	METODOLOGI	37
3.1	<i>Flowchart</i> Penelitian	37
3.2	Metode Pengerjaan.....	39
3.2.1	Studi Literatur.....	39
3.2.2	Identifikasi Masalah	39
3.2.3	Perancangan Mekanisme.....	39
3.2.4	Pemodelan Simulasi Aliran Dalam Pipa Menggunakan ANSYS	44
3.2.5	Pemodelan Sistem Dinamis.....	45
3.2.6	Penurunan Persamaan Gerak.....	48
3.2.7	Pemodelan Kelistrikan <i>Piezoelectric</i>	58
3.2.8	Pemodelan Simulasi Simulink Matlab	60
3.2.9	Simulasi	60
3.2.10	Analisa Hasil	60
3.2.11	Kesimpulan.....	60
3.3	Penentuan Parameter Penelitian.....	61
3.3.1	Menentukan Parameter Massa.....	62
3.3.2	Menentukan Parameter Kekakuan (k).....	64
3.3.2.1	Pipa Lurus	64
3.3.2.2	Pipa <i>Elbow</i>	72
3.3.2.3	<i>Piezoelectric</i>	77
3.3.3	Menentukan Frekuensi Natural	78

3.3.4	Posisi Peletakkan <i>Piezoelectric</i> dan Jumlah <i>Cantilever Piezoelectric</i>	79
BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN		81
4.1	Simulasi Aliran di Dalam Pipa.....	81
4.1.1	Membuat <i>Meshing</i> Pipa.....	81
4.1.2	Simulasi ANSYS Fluent.....	84
4.1.3	Hasil Simulasi ANSYS Fluent	86
4.2	Pembuatan Blok Simulasi.....	94
4.2.1	<i>Block Diagram</i> Posisi pada Pipa Lurus.....	94
4.2.2	<i>Block Diagram</i> Posisi pada Pipa <i>Elbow Outlet</i>	94
4.2.3	<i>Block Diagram</i> Posisi pada Pipa <i>Elbow Bend</i>	95
4.3	Analisa Respon dan Voltase Bangkitan dengan Variasi Kecepatan pada Setiap Posisi	96
4.3.1	Analisa Respon dan Voltase Bangkitan Pada Pipa Lurus	96
4.3.2	Analisa Voltase Bangkitan Pada Pipa <i>Elbow outlet</i> ...	102
4.3.3	Analisa Voltase Bangkitan Pada Pipa <i>Elbow Bend</i>	107
4.4	Analisa Pengaruh Kecepatan Fluida dan Posisi Peletakan <i>Piezoelectric</i>	114
4.5	Analisa validasi dengan Hasil Eksperimen.....	115
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		119
5.1	Kesimpulan	119
5.2	Saran	119
DAFTAR PUSTAKA		121
LAMPIRAN.....		123

BIODATA PENULIS..... 131

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1	Sistem perpipaan (Hertanto, 2009)	5
Gambar 2. 2	<i>Fitting Elbow</i> 90°, 45°, dan 180° (Putranto, 2017) ..	6
Gambar 2. 3	Ilustrasi sistem <i>undamped</i> dengan tiga derajat kebebasan (Rao, 2011)	7
Gambar 2. 4	(a) <i>Base excitation</i> , (b) <i>Base excitation free body diagram</i> (Rao, 2011)	8
Gambar 2. 5	Grafik hubungan (a) Amplitudo ratio dengan <i>frequency ratio</i> , (b) <i>Phase angle</i> dengan <i>frequency ratio</i> (Rao, 2011)	10
Gambar 2. 6	Tipe aliran (Sydney, University , 2005).....	11
Gambar 2. 7	Aliran di dalam pipa (Meutiarani, 2012).....	12
Gambar 2. 8	Perubahan distribusi muatan bahan <i>piezoelectric</i> (a) Tanpa gaya luar, (b) Bila diberi gaya tarik, (c) Bila diberi gaya tekan (Wira Hidayatullah, 2016)	15
Gambar 2. 9	<i>Cantilever piezoelectric</i> (Thorsten Hehn, 2015)...	19
Gambar 2. 10	Model dinamis <i>canltilever piezoelectric</i> (Thorsten Hehn, 2015).....	19
Gambar 2. 11	Rangkaian listrik ekuivalen pemanen <i>piezoelectric</i> (Thorsten Hehn, 2015)	20
Gambar 2. 12	(a) Susunan paralel material <i>piezoelectric</i> (b) Konstanta pegas disusun paralel (Efendy, 2017) .	21
Gambar 2. 13	<i>Piezoelectric</i> disusun secara seri (Efendy, 2017)	22
Gambar 2. 14	(a) Parameter yang dibutuhkan (b) Distribusi tekanan (Arafaa, AkIb, Majeedc, Al-Hussaind, & BazIe, 2010)	23
Gambar 2. 15	(a)Rancang Bangun Sistem Utama (b)Sistem Dinamis Sistem Utama (Arafaa, AkIb, Majeedc, Al-Hussaind, & BazIe, 2010)	24
Gambar 2. 16	<i>Setup</i> eksperimen (Arafaa, AkIb, Majeedc, Al-Hussaind, & BazIe, 2010).....	24
Gambar 2. 17	<i>Output</i> voltase eksperimen dan simulasi (Arafaa, AkIb, Majeedc, Al-Hussaind, & BazIe, 2010).....	25

Gambar 2. 18	Distribusi tekanan pada pipa <i>elbow</i> (Keshtkar & Jafari, 2017).....	26
Gambar 2. 19	(a) <i>Bimorph layer cantilever</i> (b) Skematik diagram dari <i>energy harvester</i> (Kundua & Nemadea, 2016)	27
Gambar 2. 20	Sistem dinamis <i>piezoelectric</i> (Kundua & Nemadea, 2016)	27
Gambar 2. 21	Power terhadap frekuensi hasil a) MATLAB b) COMSOL (Kundua & Nemadea, 2016).....	28
Gambar 2. 22	Pemodelan sederhana rancangan sistem utama (Efendy, 2017).....	29
Gambar 2. 23	Model analisa dari (a) sistem utama sebagai simulator getaran dan (b) CPVA (Efendy, 2017). 30	
Gambar 2. 24	Pemodelan sederhana rancangan sistem CPVA (Efendy, 2017).....	30
Gambar 2. 25	Sistem dinamis dari sistem utama dengan ditambahkan CPVA (Efendy, 2017)	31
Gambar 2. 26	Rancangan sistem utama (a) tampak isometri dan (b) tampak depan (Bambang, 2018).....	33
Gambar 2. 27	Rancangan CPDVA (a) tampak isometri dan (b) tampak depan (Bambang, 2018).....	34
Gambar 2. 28	Rancangan sistem utama dengan CPDVA (Bambang, 2018).....	34
Gambar 2. 29	Grafik RMS reduksi getaran dan daya terhadap jumlah <i>piezoelectric</i> (Bambang, 2018)	35
Gambar 3. 1	Diagram alir simulasi	38
Gambar 3. 2	Rangkaian sistem perpipaan dan bagian yang ditinjau (a) tampak isometrik (b) tampak atas.....	40
Gambar 3. 3	(a) Posisi Pipa Lurus (b) Posisi Pipa Elbow Outlet (c) Posisi Pipa Elbow Bend.....	43
Gambar 3. 4	(a) Minisense 100 vibration sensor (b) Cantilever piezoelectric dipasang pada klem.....	44
Gambar 3. 5	Skema analisis pada Workbench ANSYS	44
Gambar 3. 6	Model dinamis pipa lurus (a) Tanpa piezoelectric (b) Dengan piezoelectric	45

Gambar 3. 7	Model dinamis pipa elbow (a) Tanpa piezoelectric (b) Dengan piezoelectric pada posisi outlet (c) Dengan piezoelectric pada bend.....	47
Gambar 3. 8	Free Body Diagram massa pipa lurus	48
Gambar 3. 9	Free Body Diagram massa pipa elbow	49
Gambar 3. 10	Free Body Diagram massa pipa lurus	50
Gambar 3. 11	Free Body Diagram massa piezoelectric.....	51
Gambar 3. 12	Free Body Diagram massa pipa elbow	53
Gambar 3. 13	Free Body Diagram massa piezoelectric.....	54
Gambar 3. 14	Free Body Diagram massa pipa elbow	55
Gambar 3. 15	Free Body Diagram massa piezoelectric.....	57
Gambar 3. 16	Diagram sirkuit elektromagnetik cantilever piezoelectric	58
Gambar 3. 17	Free Body Diagram pipa lurus.....	64
Gambar 3. 18	Free Body Diagram hanya dengan gaya berat	64
Gambar 3. 19	Free Body Diagram hanya dengan gaya reaksi titik B	65
Gambar 3. 20	Free Body Diagram hanya dengan momen titik B	65
Gambar 3. 21	Potongan 1 free body diagram pipa lurus	67
Gambar 3. 22	Potongan 2 free body diagram pipa lurus	68
Gambar 3. 23	Diagram momen pipa lurus.....	71
Gambar 3. 24	<i>Free Body Diagram</i> pipa elbow	72
Gambar 3. 25	Potongan <i>free body diagram</i> pipa elbow.....	73
Gambar 3. 26	Potongan 1 <i>free body diagram</i> pipa elbow.....	73
Gambar 3. 27	Potongan 2 <i>free body diagram</i> pipa elbow.....	74
Gambar 3. 28	Diagram <i>shear</i> dan diagram momen pipa lurus ..	75
Gambar 3. 29	Dimensi piezoelectric Minisense 100 Vibration Sensor.....	78
Gambar 3. 30	Tampak atas posisi peletakkan rangkaian <i>piezoelectric</i> pada (a) Pipa lurus (b)Pipa elbow ...	80
Gambar 4. 1	<i>Meshing</i> pipa dari pompa hingga pipa elbow.....	81
Gambar 4. 2	<i>Meshing</i> permukaan pipa	82
Gambar 4. 3	<i>Meshing</i> pipa lurus	83
Gambar 4. 4	<i>Meshing</i> pipa elbow	83

Gambar 4. 5 Contoh grafik residual simulasi pipa lurus kecepatan 0,7 m/s	86
Gambar 4. 6 Hasil simulasi pipa dari pompa hingga pipa <i>elbow</i>	87
Gambar 4. 7 <i>Pressure contour</i> (a) pipa lurus kecepatan 0,3 m/s (b) pipa lurus kecepatan 0,5 m/s (c) pipa lurus kecepatan 0,7 m/s	88
Gambar 4. 8 <i>Pressure contour</i> (a) pipa <i>elbow</i> kecepatan 0,3 m/s (b) pipa <i>elbow</i> kecepatan 0,5 m/s (c) pipa <i>elbow</i> kecepatan 0,7 m/s	90
Gambar 4. 9 Grafik tekanan terhadap waktu di titik peletakan pada posisi pipa lurus kecepatan 0,3 m/s	93
Gambar 4. 10 <i>Block diagram</i> energy harvesting posisi pipa lurus	94
Gambar 4. 11 <i>Block diagram</i> energy harvesting posisi pipa <i>elbow</i> keluaran	95
Gambar 4. 12 <i>Block diagram</i> energy harvesting posisi pipa <i>elbow</i> tikungan	96
Gambar 4. 13 Respon percepatan pipa lurus pada kecepatan 0,3 m/s	97
Gambar 4. 14 Respon perpindahan <i>piezoelectric</i> posisi pipa lurus pada kecepatan 0,3 m/s.....	97
Gambar 4. 15 Voltase pipa lurus pada kecepatan 0,3 m/s	98
Gambar 4. 16 Respon percepatan pipa lurus pada kecepatan 0,5 m/s	98
Gambar 4. 17 Respon perpindahan <i>piezoelectric</i> posisi pipa lurus pada kecepatan 0,5 m/s.....	99
Gambar 4. 18 Voltase pipa lurus pada kecepatan 0,5 m/s	99
Gambar 4. 19 Respon percepatan pipa lurus pada kecepatan 0,7 m/s	100
Gambar 4. 20 Respon perpindahan <i>piezoelectric</i> posisi pipa lurus pada kecepatan 0,7 m/s.....	100
Gambar 4. 21 Voltase pipa lurus pada kecepatan 0,7 m/s	101

Gambar 4. 22 Respon percepatan pipa <i>elbow outlet</i> pada kecepatan 0,3 m/s	102
Gambar 4. 23 Respon perpindahan <i>piezoelectric</i> posisi pipa <i>elbow outlet</i> pada kecepatan 0,3 m/s	103
Gambar 4. 24 Voltase pipa <i>elbow outlet</i> pada kecepatan 0,3 m/s	103
Gambar 4. 25 Respon percepatan pipa <i>elbow outlet</i> pada kecepatan 0,5 m/s	104
Gambar 4. 26 Respon perpindahan <i>piezoelectric</i> posisi pipa <i>elbow outlet</i> pada kecepatan 0,5 m/s	104
Gambar 4. 27 Voltase pipa <i>elbow outlet</i> pada kecepatan 0,5 m/s	105
Gambar 4. 28 Respon percepatan pipa <i>elbow outlet</i> pada kecepatan 0,7 m/s	105
Gambar 4. 29 Respon perpindahan <i>piezoelectric</i> posisi pipa <i>elbow outlet</i> pada kecepatan 0,7 m/s	106
Gambar 4. 30 Voltase pipa <i>elbow outlet</i> pada kecepatan 0,7 m/s	106
Gambar 4. 31 Respon percepatan pipa <i>elbow bend</i> pada kecepatan 0,3 m/s	108
Gambar 4. 32 Respon percepatan pipa <i>elbow bend</i> pada kecepatan 0,7 m/s	108
Gambar 4. 33 Voltase pipa <i>elbow bend</i> pada kecepatan 0,3 m/s	109
Gambar 4. 34 Respon percepatan pipa <i>elbow bend</i> pada kecepatan 0,5 m/s	109
Gambar 4. 35 Respon percepatan pipa <i>elbow bend</i> pada kecepatan 0,5 m/s	110
Gambar 4. 36 Voltase pipa <i>elbow bend</i> pada kecepatan 0,5 m/s	110
Gambar 4. 37 Respon percepatan pipa <i>elbow bend</i> pada kecepatan 0,7 m/s	111
Gambar 4. 38 Respon percepatan pipa <i>elbow bend</i> pada kecepatan 0,7 m/s	111

Gambar 4. 39 Voltase pipa <i>elbow bend</i> pada kecepatan 0,7 m/s	112
Gambar 4. 40 Grafik perbandingan pengaruh variasi kecepatan fluida dan posisi peletakan <i>piezoelectric</i> hasil simulasi	114
Gambar 4. 41 Grafik perbandingan pengaruh variasi kecepatan fluida dan posisi peletakan <i>piezoelectric</i> hasil eksperimen	117

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Nilai <i>LeD</i> untuk berbagai jenis <i>fitting</i> (Pritchard, 2011)	14
Tabel 2. 2 Energi bangkitan, <i>displacement</i> dan kapasitansi pada <i>piezoelectric</i> (Krisdianto, 2011)	16
Tabel 2. 3 Perbandingan material <i>piezoelectric</i> (Krisdianto, 2011)	17
Tabel 2. 4 Frekuensi vibrasi terhadap kecepatan fluida.....	26
Tabel 2. 5 Perbandingan hasil (Kundua & Nemadea, 2016)	29
Tabel 2. 6 Frekuensi natural sistem dengan CPVA (Efendy, 2017).....	32
Tabel 2. 7 RMS reduksi respon perpindahan dan daya bangkitan sistem CPVA pada frekuensi 20.61 rad/s dengan jumlah 1400 buah <i>piezoelectric</i> dari hasil simulasi...	32
Tabel 3. 1 Parameter ANSYS	61
Tabel 3. 2 Parameter sistem utama	62
Tabel 3. 3 Parameter cantilever <i>piezoelectric</i>	62
Tabel 3. 4 Tabel data hasil simulasi.....	80
Tabel 4. 1 Besar selisih tahanan posisi peletakan <i>piezoelectric</i> pada tiap variasi kecepatan.....	91
Tabel 4. 2 Besar gaya pada posisi peletakan <i>piezoelectric</i> pada tiap variasi kecepatan	92
Tabel 4. 3 Nilai RMS respon percepatan variasi kecepatan aliran dan posisi peletakan <i>piezoelectric</i>	113
Tabel 4. 4 Nilai RMS respon perpindahan <i>piezoelectric</i> variasi kecepatan aliran dan posisi peletakan <i>piezoelectric</i>	113
Tabel 4. 5 Nilai RMS voltase bangkitan variasi kecepatan aliran dan posisi peletakan <i>piezoelectric</i>	113
Tabel 4. 6 Nilai RMS voltase bangkitan sistem <i>piezoelectric</i> variasi debit aliran dan peletakkan <i>piezoelectric</i> hasil eksperimen	116
Tabel 4. 7 Error nilai RMS voltase bangkitan	117

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Getaran mudah sekali kita temukan dari berbagai sumber, contohnya getaran pada pipa yang disebabkan fluida yang mengalir di dalamnya. Gesekan antara fluida dengan dinding pipa dapat menimbulkan getaran pada pipa. Apabila amplitudo getaran pipa tersebut besar, maka akan menghambat aliran fluida di dalamnya menyebabkan debit aliran tidak konstan. Amplitudo getaran tertinggi terjadi pada saat resonansi, dimana frekuensi natural sama dengan frekuensi eksitasinya. Potensi energi dari getaran yang tinggi ini dapat dimanfaatkan oleh *cantilever piezoelectric* sebagai elemen *energy harvesting*. Listrik dapat dihasilkan dari defleksi *cantilever piezoelectric* yang bergerak naik turun disebabkan oleh getaran yang terjadi.

Penelitian mengenai *energy harvesting* dari getaran pipa telah banyak dilakukan, salah satunya oleh Arafa, M. *et al* tentang *energy harvesting* dari getaran pipa gas. Pada penelitian tersebut, terlebih dahulu disimulasikan elemen *harvesting*nya kemudian dilakukan eksperimen guna validasi. Pipa yang digunakan merupakan pipa lurus berbahan tembaga dengan panjang 1,7 m diameter luar 0,05 m dan ketebalan 0,6 mm, yang dialiri udara oleh *blower* berkecepatan 35 – 42 m/s, dimana elemen *harvesting* yang dipakai merupakan piezoelektrik tipe *cantilever*. *Piezoelectric* strip aktuator merk APC dengan panjang 50 mm, lebar 20 mm, dan permitivitas $3,98 \times 10^{-8}$ F/m dipasangkan pada suatu base yang terhubung pada pipa, dengan ujung strip diberi massa 1,5 g.

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka dilakukan analisa *energy harvesting* getaran menggunakan *cantilever piezoelectric* sebagai penghasil listrik pada pipa. Sumber getaran adalah air yang dipompa melalui sistem perpipaan. Analisa ini dilakukan dengan menyimulasikan sistem terkait menggunakan *software* ANSYS Fluent dan Matlab Simulink. Proses *energy harvesting* dilakukan menggunakan *cantilever*

piezoelectric Minisense 100 vibration sensor dimana akibat adanya efek *piezoelectric*, tekanan mekanik akibat adanya defleksi dapat menghasilkan energi listrik. *Piezoelectric* diletakkan di atas klem pipa kemudian klem dipasangkan pada pipa. Peletakan *piezoelectric* divariasikan menjadi peletakan pada pipa lurus, pipa *elbow outlet*, dan pipa *elbow bend*. Pada penelitian ini juga dilakukan 3 variasi kecepatan aliran air yaitu 0,3 m/s; 0,5 m/s; 0,7 m/s untuk melihat pengaruhnya terhadap voltase yang dibangkitkan oleh elemen *energy harvesting*.

1.2 Rumusan Masalah

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

1. Bagaimana merancang model dinamis dari sistem *energy harvesting* pada sistem perpipaan dengan eksitasi fluida yang mengalir di dalamnya?
2. Bagaimana pengaruh variasi posisi peletakkan *cantilever piezoelectric* pada sistem perpipaan terhadap voltase yang dihasilkan?
3. Bagaimana pengaruh variasi kecepatan aliran fluida di dalam pipa terhadap voltase yang dihasilkan oleh *cantilever piezoelectric*?

1.3 Tujuan

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

1. Mengetahui model dinamis dari sistem *energy harvesting* pada sistem perpipaan dengan eksitasi fluida yang mengalir di dalamnya.
2. Mengetahui pengaruh variasi posisi peletakkan *cantilever piezoelectric* pada sistem perpipaan terhadap voltase yang dihasilkan.
3. Mengetahui pengaruh variasi kecepatan aliran fluida di dalam pipa terhadap voltase yang dihasilkan oleh *cantilever piezoelectric*.

1.4 Batasan Masalah

Batasan yang digunakan untuk memfokuskan penelitian sesuai dengan ruang lingkup pada penjelasan latar belakang di atas, antara lain:

1. Aliran fluida adalah *transient viscous incompressible flow*.
2. Getaran dari luar mekanisme diabaikan.
3. Penelitian dititikberatkan pada alat *energy harvesting* getaran.
4. Putaran dari pompa dianggap konstan.
5. Getaran yang terjadi dengan arah transversal.
6. Konstanta redaman pipa dan *cantilever piezoelectric* diabaikan.
7. *Headloss* sebelum area analisa diabaikan.

1.5 Manfaat

Manfaat yang dapat diperoleh dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

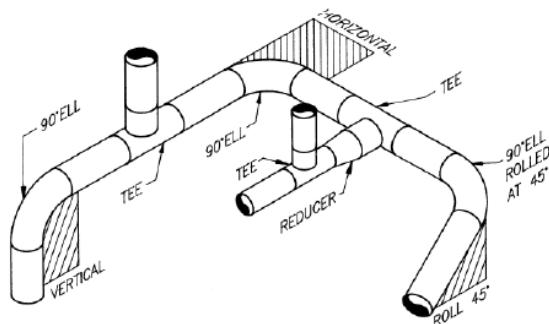
1. Sebagai referensi dan literatur untuk penelitian *cantilever piezoelectric* dalam memanen energi getaran akibat aliran fluida di dalam sistem perpipaan.
2. Sebagai inovasi untuk pemanfaatan energi getaran yang terbuang agar dapat dimanfaatkan kembali.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Perpipaan

Sistem perpipaan adalah suatu sistem yang digunakan untuk melakukan transportasi fluida kerja antar peralatan (*equipment*) dalam suatu pabrik (*plant*) atau dari suatu tempat ke tempat yang lain sehingga proses produksi berlangsung. Sistem perpipaan (*pipng system*) dilengkapi dengan komponen-komponen seperti katup, flens, tikungan (*elbow*), percabangan, *nozzle*, *reducer*, tumpuan, isolasi dan lain-lain. Dalam dunia industri, biasanya dikenal beberapa istilah mengenai sistem perpipaan seperti *pipng* dan *pipeline*. *Pipng* adalah sistem perpipaan di suatu *plant*, sebagai fasilitas untuk mengantarkan fluida (cair atau gas) antara satu peralatan ke peralatan lainnya untuk melewati proses-proses tertentu. *Pipng* ini tidak akan keluar dari satu wilayah *plant*. Sedangkan *pipeline* adalah sistem perpipaan untuk mengantarkan atau mengalirkan fluida antara satu *plant* ke *plant* lainnya yang biasanya melewati beberapa daerah. Ukuran panjang pipa biasanya memiliki panjang lebih dari 1 km tergantung jarak antar *plant*. Sistem perpipaan dapat ditemukan hampir pada semua jenis industri, dari sistem pipa tunggal yang sederhana sampai sistem perpipaan bercabang yang sangat kompleks.



Gambar 2. 1 Sistem perpipaan (Hertanto, 2009)

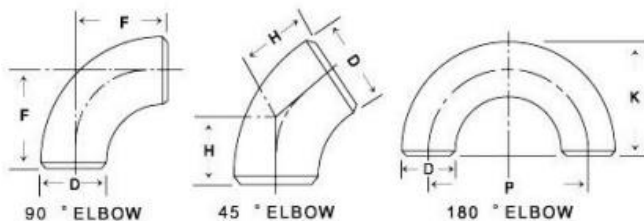
2.1.1 Bahan-bahan Pipa Secara Umum

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

2.1.2 Sambungan Tipe Elbow

Sambungan (*fitting*) adalah merupakan bagian dari suatu instalasi perpipaan yang berfungsi sebagai penyambung antar pipa dan sebagai akhir perpipaan atau *outlet fitting*. 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*



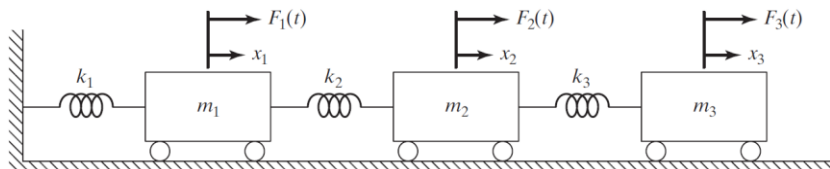
Gambar 2. 2 *Fitting Elbow 90°, 45°, dan 180°* (Putranto, 2017)

2.2 Mekanika Getaran

2.2.1 *Multi Degree of Freedom (MdoF)*

Pada sistem mekanik *multi degree of freedom* sering menggunakan hukum newton kedua untuk membuat persamaan gerak. 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 2.3 sebagai berikut:



Gambar 2. 3 Ilustrasi sistem *undamped* dengan tiga derajat kebebasan (Rao, 2011)

Dari ilustrasi diatas, didapatkan matriks dari persamaan gerak untuk setiap massa sesuai dengan hukum newton kedua.

$$m_i \ddot{x}_i + k_i x_i = \sum F_i \quad (2.1)$$

Dari persamaan (2.1) di atas dimana $i = 1$, $i = 2$, dan $i = 3$ sehingga didapatkan matriks dari persamaan gerak untuk skema pada gambar 2.3 sebagai berikut:

$$[m]\ddot{x} + [k]x = [F] \quad (2.2)$$

Dimana,

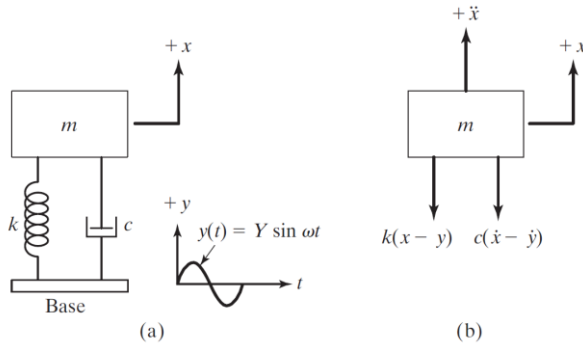
$$[m] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix}, [k] = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 \\ 0 & -k_3 & k_3 \end{bmatrix},$$

$$\text{dan } [F] = \begin{Bmatrix} F_1(t) \\ F_2(t) \\ F_3(t) \end{Bmatrix}$$

Sehingga didapatkan persamaan matriks yang dituliskan pada persamaan (2.3) sebagai berikut:

$$\begin{Bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_3 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 \\ 0 & -k_3 & k_3 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1(t) \\ F_2(t) \\ F_3(t) \end{Bmatrix} \quad (2.3)$$

2.2.2 Base Motion Vibration



Gambar 2.4 (a) *Base excitation*, (b) *Base excitation free body diagram* (Rao, 2011)

Gerak harmonik merupakan gerakan berulang dari sebuah sistem yang terdiri dari massa, pegas, dan peredam. Sedangkan *base of motion* yaitu pergerakan massa terhadap *base*, maka *harmonic motion of the base* merupakan pergerakan massa secara berulang terhadap *base* yang didukung oleh pegas dan peredam dalam suatu interval waktu. Gambar 2.4 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 $\dot{x} - \dot{y}$.

Dari *free body diagram* pada gambar 2.2 (b), didapatkan persamaan gerak sebagai berikut:

$$m\ddot{x} + c(\dot{x} - \dot{y}) + k(x - y) = 0 \quad (2.4)$$

Jika $y(t) = Y \sin \omega t$ maka persamaan (2.4) menjadi:

$$\begin{aligned} m\ddot{x} + c\dot{x} + kx &= c\dot{y} + ky \\ &= kY \sin \omega t + c\omega Y \cos \omega t \\ &= A \sin(\omega t - \alpha) \end{aligned} \quad (2.5)$$

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:

$$x_p(t) = \frac{Y\sqrt{k^2 + (c\omega)^2}}{\sqrt{(k - m\omega^2)^2 + (c\omega)^2}} \sin(\omega t - \phi_1 - \alpha) \quad (2.6)$$

$$\phi_1 = \tan^{-1} \left(-\frac{c\omega}{k - m\omega^2} \right) \quad (2.7)$$

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

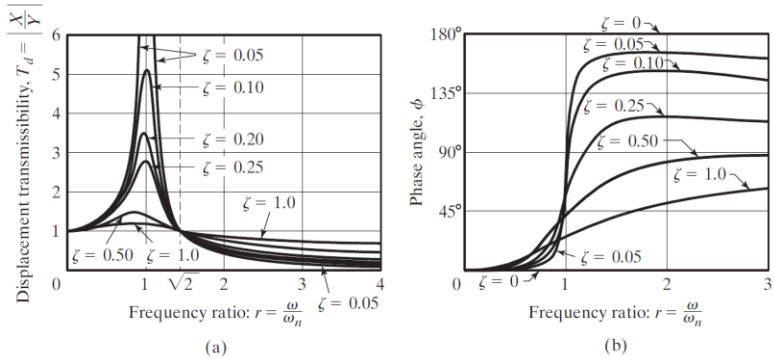
$$x_p(t) = X \sin(\omega t - \phi) \quad (2.8)$$

Dimana nilai X dan ϕ didapat dari:

$$\frac{X}{Y} = \frac{\sqrt{k^2 + (c\omega)^2}}{\sqrt{(k - m\omega^2)^2 + (c\omega)^2}} \text{ dan } \phi = \tan^{-1} \left(\frac{m c \omega^2}{k(k - m\omega^2) - (c\omega)^2} \right) \quad (2.9)$$

Dimana $\frac{X}{Y}$ merupakan *displacement transmissibility*.

Gambar 2.5 di bawah merupakan grafik hubungan *displacement transmissibility* dan sudut fase dengan rasio frekuensi pada sistem *base motion vibration*.



Gambar 2. 5 Grafik hubungan (a) Amplitudo ratio dengan *frequency ratio*, (b) *Phase angle* dengan *frequency ratio* (Rao, 2011)

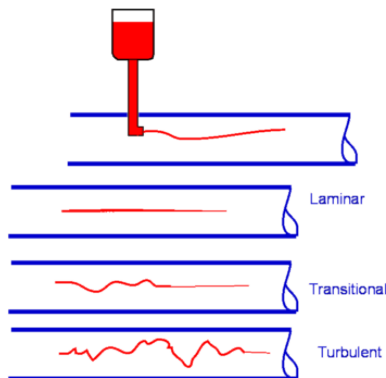
2.3 Fluida

Macam-macam jenis aliran dalam mekanika fluida dibedakan oleh sifat-sifat fluida yang membuat situasi karakteristik fisik. Faktor-faktor pengontrol dinyatakan dalam bentuk besaran tertentu seperti kecepatan benda dalam fluida, *density* fluida, viskositas fluida, dan lain-lain. Macam-macam fluida secara umum dapat diklasifikasikan sebagai:

- **Fluida Ideal**
Fluida ini dianggap tidak berviskositas (viskositasnya nol) dan *incompressible* (densitasnya konstan), sehingga gaya tangensial antara lapisan yang berdekatan tidak ada.
- ***Viscous Incompressible Fluid***
Teori *viscous incompressible fluids*, yang mana massa jenis fluida dianggap konstan, mempunyai kegunaan yang luas seperti pada aliran suatu cairan (khususnya air) dan aliran udara bertekanan rendah.

2.3.1 Tipe Aliran

Dua macam aliran: laminer dan turbulen, pertama kali diperlihatkan oleh Osborn Reynold pada tahun 1883. Dia menyemprotkan zat pewarna yang mempunyai *density* sama ke dalam air yang mengalir dari tangki. Suatu katup pengatur memungkinkan kecepatan aliran diubah-ubah. Ketika suatu kecepatan di dalam tabung memperlihatkan bahwa partikel-partikel zat warna dalam garis-garis lurus, hal ini menunjukkan bahwa partikel air mengalir dalam keadaan sejajar dan lurus. Tetapi begitu kecepatan dinaikkan maka bentuk aliran menjadi berubah. Pertama dalam bentuk bergelombang, kemudian pada daerah dekat *entrance* mereka putus menjadi sejumlah *vortices*. Gambar 2.6 menunjukkan aliran laminer dan turbulen.



Gambar 2. 6 Tipe aliran (Sydney, University , 2005)

Untuk suatu kasus normal dari suatu aliran yang mengalir dalam pipa lurus yang diameternya uniform dan kekasarannya normal maka aliran tetap dalam kondisi laminer pada angka Reynold di bawah 2000. Lebih dari nilai tersebut aliran akan menjadi turbulen. Adapun besarnya angka Reynold adalah:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (2.10)$$

dimana,

ρ = massa jenis fluida

D = diameter pipa

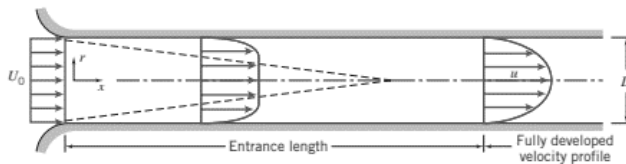
V = kecepatan aliran dalam pipa

μ = viskositas dinamis dari fluida

Selain turbulen dan laminar, dikenal juga aliran *steady* dan uniform. Suatu aliran dikatakan *steady* bila semua kondisi pada sembarang titik pada suatu arus akan tetap konstan terhadap waktu, tetapi kondisi-kondisi ini berbeda antara titik yang satu dengan titik yang lain. Aliran uniform adalah suatu aliran yang mana kecepatan dan arahnya sama pada setiap titik dalam fluida tersebut.

2.3.2 Aliran Fluida di Dalam Pipa

Gaya-gaya gesek antara partikel-partikel fluida dan dinding-dinding batas dan antara partikel-partikel itu sendiri timbul karena adanya kekentalan (*viscosity*) fluida.



Gambar 2. 7 Aliran di dalam pipa (Meutiarani, 2012)

Dikarenakan adanya tegangan geser di dalam pipa, maka rumus Bernoulli (kecepatan dan tekanan aliran akan selalu konstan pada pipa lurus) tidak berlaku karena adanya kehilangan energi atau yang disebut dengan *headloss*. Maka persamaan yang berlaku adalah:

$$\left(\frac{p_1}{\rho} + \alpha_1 \frac{\overline{V_1^2}}{2} + gz_1 \right) - \left(\frac{p_2}{\rho} + \alpha_2 \frac{\overline{V_2^2}}{2} + gz_2 \right) = h_{lT} \quad (2.11)$$

dimana,

p = tekanan

V = kecepatan

g = percepatan gravitasi

z = ketinggian

α = koefisien energi kinetik

h_{IT} = *headloss* total

Headloss Total merupakan jumlah dari *headloss major* dan *headloss minor*. *Headloss major* adalah kerugian yang terjadi sepanjang penampang pipa sedangkan *headloss minor* adalah kerugian yang terjadi secara local disebabkan oleh *fitting* yang terpasang pada pipa. *Headloss major* didapat melalui persamaan:

$$h_l = f \frac{L}{D} \frac{\overline{V^2}}{2} \quad (2.12)$$

dimana,

f = *friction factor* (fungsi dari Re dan kekasaran relatif $\frac{e}{D}$)

L = panjang pipa

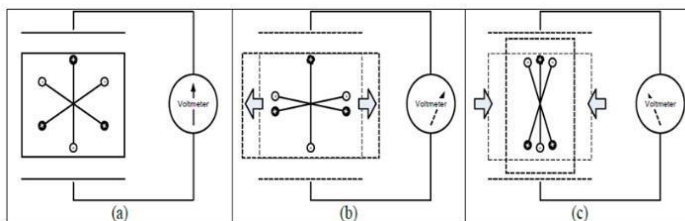
Sedangkan untuk *Headloss minor* didapat melalui persamaan:

$$h_{lm} = f \frac{L_e}{D} \frac{\overline{V^2}}{2} \quad (2.13)$$

dimana,

$\frac{L_e}{D}$ = panjang ekivalen pipa terhadap diameter pipa

berlaku, yaitu bila diberi tegangan listrik, kristal *piezoelectric* bergetar (*inverse piezoelectric*). Kristal *piezoelectric* menghasilkan tegangan listrik ketika terjadi perubahan polaritas muatan listrik akibat perubahan dimensinya. Gambar 2.8 (a). memperlihatkan susunan muatan positif dan negatif yang tersebar merata bila kristal *piezoelectric* tidak menerima pengaruh gaya luar. Namun bila menerima gaya tekan atau gaya tarik, posisi muatan berubah sehingga menghasilkan polarisasi muatan dan tegangan listrik. Gambar 2.8 (b). memperlihatkan saat *piezoelectric* menerima gaya tarik sehingga memendek dan melebar. Muatan positif dan negatif tertarik ke bagian samping dan saling menetralkan sehingga terbentuk kutub negatif dan kutub positif di bagian atas dan bawah. Gambar 2.8 (c). memperlihatkan saat *piezoelectric* menerima gaya tekan sehingga memanjang dan menyempit. Muatan terbagi pada dua sisi. Masing-masing sisi mengalami kelebihan muatan sehingga terbentuk kutub positif dan kutub negatif. Kutub-kutub ini menimbulkan perbedaan potensial listrik. Perbedaan potensial ini berlangsung sesaat (impuls) dan segera kembali ke keadaan netral. Bila kedua kutub bahan *piezoelectric* dihubungkan dalam rangkaian listrik tertutup, perbedaan potensial yang terjadi dapat disalurkan dalam bentuk impuls arus listrik. Apabila kedua kutub ini tidak dihubungkan dengan rangkaian listrik, maka muatan *piezoelectric* akan kembali pada posisi netral dengan sendirinya (Wira Hidayatullah, 2016).



Gambar 2. 8 Perubahan distribusi muatan bahan *piezoelectric* (a) Tanpa gaya luar, (b) Bila diberi gaya tarik, (c) Bila diberi gaya tekan (Wira Hidayatullah, 2016)

2.4.1 Energi Bangkitan *Piezoelectric*

Untuk mendapatkan besar nilai tegangan yang dibangkitkan (V) dari elemen *piezoelectric* digunakan persamaan

$$V_o = g_{3n} X_n t \quad (n = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (2.14)$$

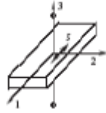
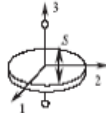
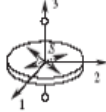
Dimana,

g_{3n} = koefisien *piezoelectric* sesuai sumbu tegangan

X_n = tegangan yang diberikan pada arah yang sama

t = ketebalan *piezoelectric*

Tabel 2. 2 Energi bangkitan, *displacement* dan kapasitansi pada *piezoelectric* (Krisdianto, 2011)

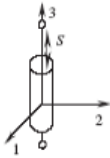
Action Mode (L , length; W , width; T , thickness; D , diameter)	Generated Voltage, V	Displacement, ΔL (ΔT)	Capacitance, C
Transverse length mode: $L > 3W > 3T$	$V = \frac{g_{31} F}{W}$	$\Delta l = \frac{d_{31} L}{T} V$	$C = \frac{\epsilon_2^T L W}{T}$
			
Thickness extension mode: $D > 5T$	$V = \frac{4Tg_{33} F}{\pi D^2}$	$\Delta T = d_{33} V$	$C = \frac{\pi \epsilon_3^T D^2}{4T}$
			
Radial mode: $D > 5T$	Not applied	$\Delta D = \frac{d_{31} D}{T} V$	$C = \frac{\pi \epsilon_3^T K_3^2 e_0 D^2}{4T}$
			

Longitudinal mode: $L > 3D$

$$V = \frac{4L}{\pi D^2 g_{33}} F$$

$$\Delta L = d_{33} V$$

$$C = \frac{\pi D^2}{4L} K_t^T \epsilon_0$$

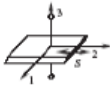


Thickness shear mode: $W > 5T, L > 5T$

$$V = \frac{8L^2}{W} F$$

$$\Delta x = d_{15} V$$

$$C = \frac{LW}{T} K_t^T \epsilon_0$$



Note: F is the force and ϵ_3^T is dielectric permittivity of the material at constant stress in direction 3, K_t^T is relative dielectric constant ($K_t^T = \epsilon_3^T / \epsilon_0$), and ϵ_0 is dielectric permittivity in vacuum.

Tabel 2. 3 Perbandingan material *piezoelectric* (Krisdianto, 2011)

Property	Units	PVDF Film	PZT	BaTiO ₃
Density	10 ³ kg/m ³	1.78	7.5	5.7
Relative Permittivity	ϵ / ϵ_0	12	1,200	1,700
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
Acoustic Impedance	(10 ⁶)kg/m ² -sec.	2.7	30	30

Piezoelectric voltage constant (g) adalah medan listrik yang dibangkitkan oleh material *piezoelectric* per unit tegangan mekanik yang diberikan. Persamaan yang dapat digunakan untuk menentukan *piezoelectric voltage constant* adalah:

$$g_{33} = d / \epsilon T_{33} \quad (2.15)$$

Dimana,

g_{33} = *piezoelectric voltage constant* (V m/N)

d = *piezoelectric charge constant* (C/N)

ϵ = *permittivity* (f/m)

Piezoelectric charge constant (d) adalah polarisasi yang dibangkitkan per-unit tegangan mekanik (T) yang diaplikasikan pada material *piezoelectric*, atau pengertian lainnya adalah regangan mekanik (S) yang terjadi pada material *piezoelectric* per unit medan listrik yang diberikan. *Permittivity* atau *dielectric constant* (ϵ) merupakan perpindahan dielektrik per-unit medan listrik. ϵ^t adalah *permittivity* pada tegangan konstan, sedangkan ϵ^s adalah *permittivity* pada regangan konstan. Dari table 2.2, diketahui hubungan antara *permittivity* dan kapasitansi. Sehingga dapat diketahui *permittivity* melalui persamaan:

$$\epsilon^t = \frac{C t}{A} \quad (2.16)$$

Dimana,

C = kapasitansi (f)

A = luasan aktif *piezoelectric* (m)

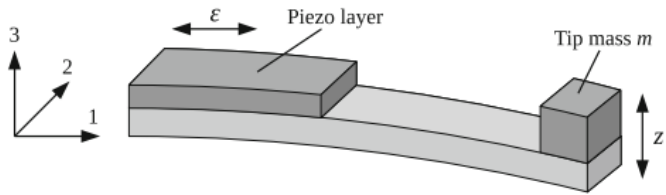
t = tebal *piezoelectric* (m)

Voltase *output* bias didapat melalui persamaan:

$$V_O = \frac{d_{3n} X_n t A}{C} \quad (2.17)$$

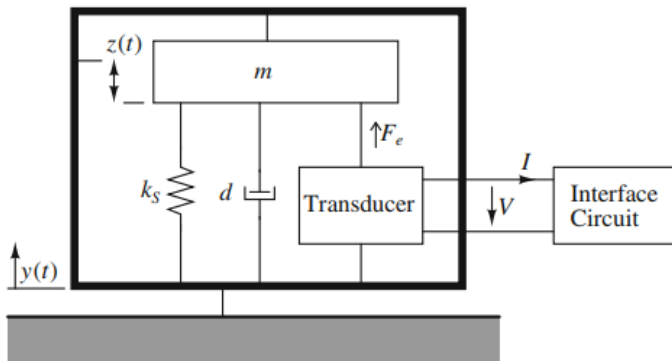
2.4.2 Cantilever Piezoelectric

Cantilever piezoelectric adalah *piezoelectric* yang berbentuk *cantilever* dengan bagian atas dan bawah *cantilever* terdapat material *piezoelectric transducers* (PZT) (Sharma, 2006). Material *cantilever piezoelectric* dapat dimodelkan sebagai pegas *cantilever beam* yang dilengkapi dengan massa pada ujungnya sebagai *tip mass*. Defleksi yang terjadi pada material searah dengan sumbu z, dan regangan yang terjadi searah sumbu x, sedangkan gaya yang diterima *piezoelectric* adalah pada arah sumbu z. Diilustrasikan sebagai berikut.



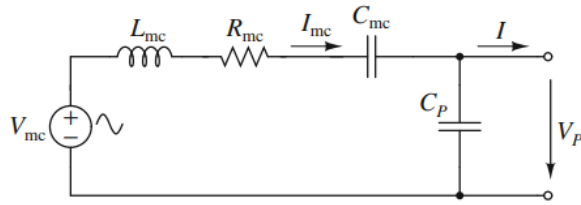
Gambar 2. 9 *Cantilever piezoelectric* (Thorsten Hehn, 2015)

Untuk model dinamis pemanen energi kinetik dari *cantilever piezoelectric* dapat dimodelkan sebagai susunan massa pegas dilengkapi dengan rangkaian listrik pemanen energi seperti pada gambar 2. 10.



Gambar 2. 10 Model dinamis *cantilever piezoelectric* (Thorsten Hehn, 2015)

Dari gambar 2.10 di atas didapat rangkaian listrik ekuivalen pada gambar 2.11.



Gambar 2. 11 Rangkaian listrik ekuivalen pemanen *piezoelectric* (Thorsten Hehn, 2015)

Persamaan rangkaian listrik pada gambar 2.11 di atas dapat dirumuskan sebagai:

$$V_{mc} = L_{mc} \frac{dI_{mc}}{dt} + R_{mc} I_{mc} + \frac{1}{C_{mc}} \int I_{mc} dt + V_p \quad (2.18)$$

$$F_e = n\Gamma V_p$$

Dimana:

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

$$\Gamma = \sqrt{k_{31} k_p C_p} \quad (2.19)$$

Dengan:

d_p = Konstanta *damping piezoelectric*

k_p = Konstanta pegas *piezoelectric*

C_p = Kapasitansi *piezoelectric*

M = Massa *piezoelectric*

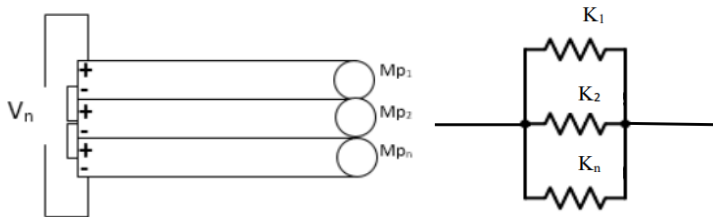
F_e = Gaya elektromagnetik

n = Jumlah *piezoelectric*

Γ = Electromechanical factor *piezoelectric*

2.4.3 Susunan *Piezoelectric*

Piezoelectric dapat disusun secara seri dan paralel. Susunan dari *piezoelectric* ini dapat merubah sifat mekanik dan elektrik dari *piezoelectric* yang bergantung dari bentuk susunan dari *piezoelectric* tersebut. Susunan material *piezoelectric* secara paralel dapat dilihat pada gambar 2.12 (a). Karena *piezoelectric* disusun secara paralel, maka konstanta pegas dari material *piezoelectric* juga akan disusun secara paralel seperti yang terlihat pada gambar 2.12 (b). Sehingga material *piezoelectric* yang disusun secara paralel akan memiliki sifat mekanik sebagai berikut:



Gambar 2. 12 (a) Susunan paralel material *piezoelectric* (b) Konstanta pegas disusun paralel (Efendy, 2017)

- Untuk satu material *piezoelectric*

$$F_k = K \cdot x \quad (2.20)$$
- Untuk *piezoelectric* yang disusun secara paralel dengan jumlah n

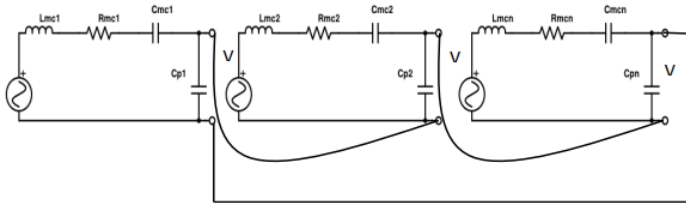
$$F_k = K_{eq} \cdot x \quad (2.21)$$

dengan: $K_{eq} = n \cdot K$
- Untuk keseluruhan jumlah massa M_{eq} dapat dirumuskan dengan:
$$M_{eq} = M_1 + M_2 + \dots + M_n$$

atau,

$$M_{eq} = n \cdot M \quad (2.22)$$

Selanjutnya, tinjauan elektris untuk susunan material *piezoelectric* secara seri dapat dilihat seperti pada Gambar 2.13.



Gambar 2. 13 *Piezoelectric* disusun secara seri (Efendy, 2017)

Voltase bangkitan yang dihasilkan oleh *piezoelectric* jika disusun secara seri adalah:

$$V_n = V_{p1} + V_{p2} + \dots + V_{pn} \quad (2.23)$$

Jika $V_{p1} = V_{p2} = V_{pn}$, maka:

$$V_n = n \cdot V_1 \quad (2.24)$$

Dan arus yang dihasilkan oleh *piezoelectric* jika disusun secara seri adalah:

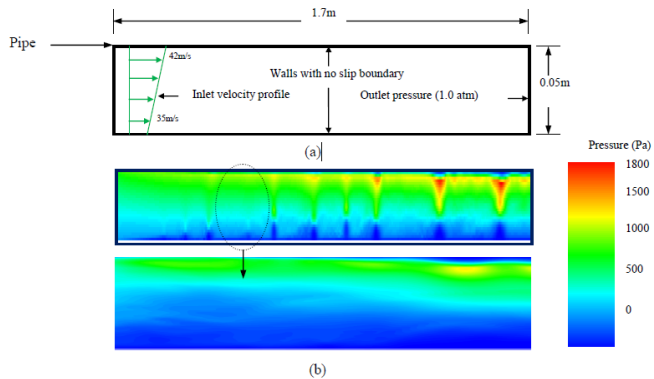
$$I_n = I_1 = I_2 = \dots = I_n \quad (2.25)$$

Dari persamaan pada rangkaian seri dapat disimpulkan bahwa dengan menyusun *piezoelectric* secara seri, maka voltase yang dihasilkan akan semakin meningkat. Sedangkan untuk arus yang dihasilkan akan tetap seiring dengan bertambahnya jumlah material *piezoelectric*.

2.5 Tinjauan Pustaka

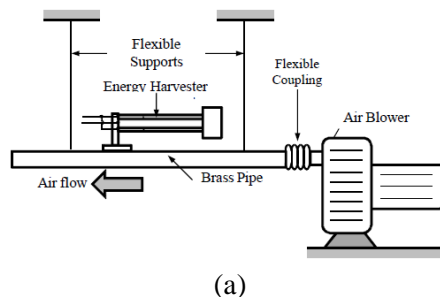
Penelitian terdahulu yang digunakan sebagai referensi diantaranya penelitian mengenai *cantilever piezoelectric* dan memodelkan vibrasi pada pipa disebabkan aliran fluida. Penelitian sebelumnya tentang *cantilever piezoelectric* dilakukan oleh **M. Arafa** (Arafaa, Aklb, Majeedc, Al-Hussaind, & Baz1e, 2010) dengan judul “*Energy Harvesting of Gas Pipeline Vibration*”. Penelitian tersebut meneliti terkait usaha untuk memanen energi melalui getaran pipa yang di dalamnya mengalir gas. Penelitian

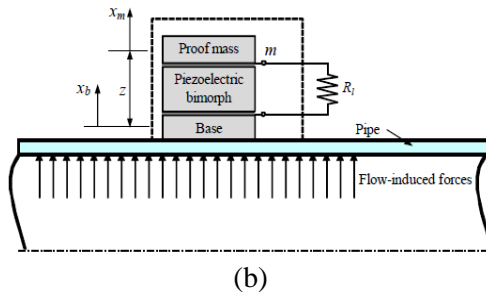
diawali dengan mensimulasikan aliran fluida menggunakan ANSYS Fluent untuk mengetahui distribusi tekanan di dalam pipa.



Gambar 2.14 (a) Parameter yang dibutuhkan (b) Distribusi tekanan (Arafaa, Aklb, Majeedc, Al-Hussaind, & Bazle, 2010)

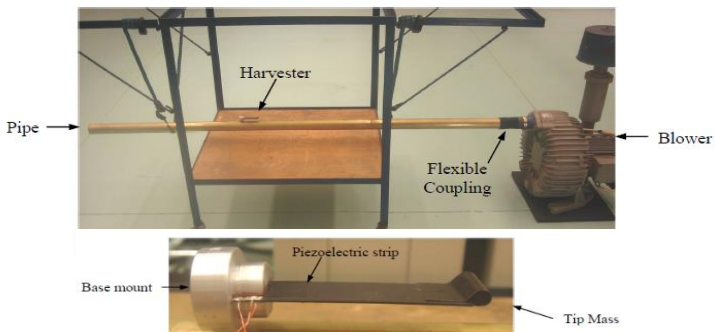
Pipa yang digunakan berbahan tembaga dengan ketebalan pipa 0.6 mm dengan fluida berupa udara dengan temperatur 300 K dimodelkan dengan metode *Large Eddy Simulation* (LES) dengan *timestep* 2×10^{-5} sekon. Mesh dengan 923.721 elemen *quadrilateral*. Kecepatan inlet pada jarak 35 m/s-42 m/s. Setelah didapatkan distribusi tekanan di dalam pipa, selanjutnya adalah memodelkan sistem *electromechanical*. Rancang bangun dan sistem dinamis ditunjukkan gambar sebagai berikut:





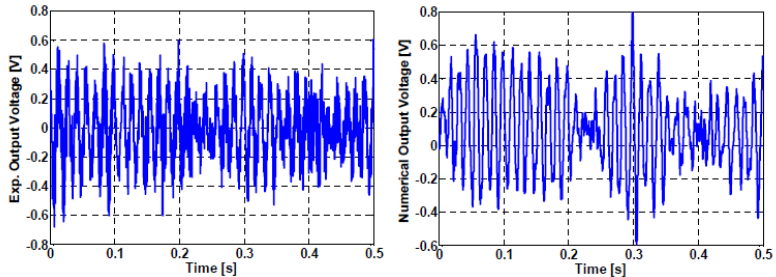
Gambar 2. 15 (a)Rancang Bangun Sistem Utama (b)Sistem Dinamis Sistem Utama (Arafaa, Aklb, Majeedc, Al-Hussaind, & Baz1e, 2010)

Persamaan gerak sistem dinamis tersebut adalah: $m\ddot{x}_m = \Sigma forces = -F_p - F_d$. Kemudian dilakukan eksperimen dengan kondisi serupa simulasi guna memvalidasi hasil dari proses simulasi. Panjang pipa adalah 50 mm dengan *blower* pada ujung pipa untuk menggerakkan udara. *Cantilever piezoelectric* dipasangkan di atas pipa yang tersusun dari *piezoelectric strip* dijepit pada *base mount* dengan ujung *piezoelectric* dikenai massa tambahan untuk meningkatkan defleksi.



Gambar 2. 16 *Setup* eksperimen (Arafaa, Aklb, Majeedc, Al-Hussaind, & Baz1e, 2010)

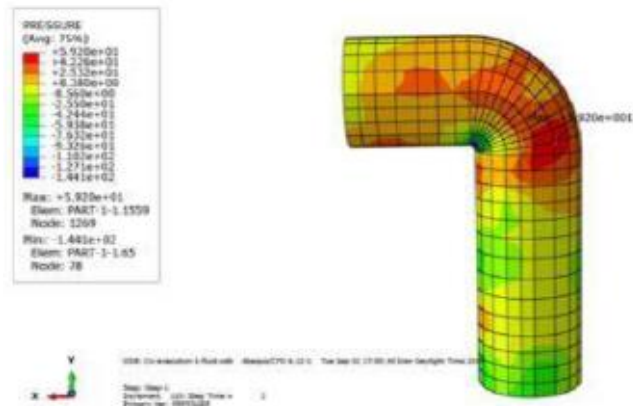
Hasil dari simulasi dan eksperimen disajikan dalam grafik *output voltage* terhadap waktu. Grafiknya sebagai berikut:



Gambar 2. 17 Output voltase eksperimen dan simulasi (Arafaa, Aklb, Majeedc, Al-Hussaind, & Baz1e, 2010)

Penelitian selanjutnya dilakukan oleh **H. Keshtkar** (Keshtkar & Jafari, 2017) berjudul “*Vibration Analysis of a Turbulent Fluid Passing Inside an Elbow Shaped*” membahas tentang simulasi analisa vibrasi pipa *elbow* yang mengalir fluida turbulen di dalamnya. Fluida yang digunakan pada simulasi ini merupakan air dikarenakan 70% volume dari bumi merupakan air yang mana merupakan fluida paling murah dan umum. Temperatur fluida 20°C, memiliki rapat massa 1000 kg/m³, viskositas dinamis 1.002 × 10³ N S/m², dan viskositas dinamis 1.004 × 10⁻⁶ m²/S. Air merupakan *newtonian fluid*, maka pada simulasi ini diasumsikan *incompressible*. *Software* yang digunakan adalah Abaqus. Disimulasikan aliran turbulen mengalir di dalam pipa *elbow*, masuk dengan kecepatan tertentu dan keluar pada tekanan atmosfer. Panjang pipa 190 mm dan memiliki diameter konstan 43 mm dengan tebal pipa 2 mm. Material pipa adalah ST-37 besi homogen dengan modulus elastisitas 210 GPa, modulus elastisitas 250 GPa, *poisson's ratio* 0.34 dan rapat massa 7860 kg/m². Untuk mendapatkan distribusi tekanan perlu dilakukan analisis implisit dinamis, dan simulasi dijalankan dengan 0.002 s *timestep* selama 2 sekon. Pada waktu 2 sekon aliran sudah dianggap *fully developed flow*. Kecepatan awal fluida divariasikan menjadi 0,2 m/s; 0,5 m/s;

0,7 m/s; 1 m/s; dan 1,5 m/s. Tidak ada gaya eksternal diaplikasikan pada pipa. Distribusi tekanan ditunjukkan oleh gambar 2.18.



Gambar 2. 18 Distribusi tekanan pada pipa *elbow* (Keshtkar & Jafari, 2017)

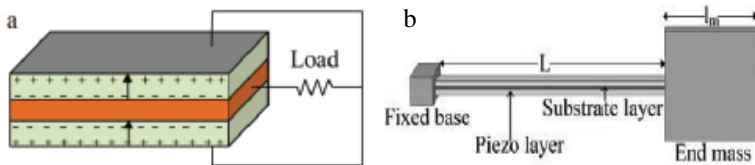
Pada penelitian tersebut dapat disimpulkan bahwa dengan meningkatkan kecepatan fluida, frekuensi vibrasi juga akan meningkat. Maka apabila akan dirancang sebuah pipa dengan *properties* material dan dimensi seperti yang disebutkan, perlu diatur kecepatan fluida agar tidak menyentuh angka 0,2 m/s – 0,3 m/s karena dapat menyebabkan pipa beresonansi. Tabel 2.4 di bawah menyajikan data frekuensi vibrasi terhadap variasi kecepatan:

Tabel 2. 4 Frekuensi vibrasi terhadap kecepatan fluida

Fluid velocity	1 st vibration mode	2 nd vibration mode	3 rd vibration mode	4 th vibration mode	5 th vibration mode
0.2 m/s	0.3282 Hz	0.3371 Hz	0.3551 Hz	0.3766 Hz	0.3917 Hz
0.5 m/s	0.3624 Hz	0.3693 Hz	0.3882 Hz	0.4050 Hz	0.4261 Hz
0.7 m/s	0.3963 Hz	0.4005 Hz	0.4214 Hz	0.4356 Hz	0.4566 Hz
1 m/s	0.4090 Hz	0.4124 Hz	0.4356 Hz	0.4480 Hz	0.4689 Hz
1.5 m/s	0.4706 Hz	0.4751 Hz	0.5068 Hz	0.5185 Hz	0.4689 Hz

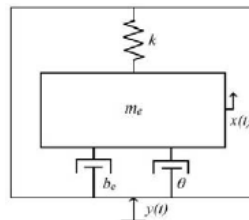
Penelitian selanjutnya yang dilakukan oleh **Sushanta Kundu** (Kundua & Nemadea, 2016) dengan judul “*Modeling and*

Simulation of a Piezoelectric Vibration Energy Harvester". Pemanen energi yang dimodelkan adalah *cantilever piezoelectric* berbahan komposit tersusun dari 3 lapisan dengan ujungnya terpasang massa secara simetris. Lapisan tengah berupa kuningan yang di-*sandwich* diantara lapisan PZT-5H. Momen akibat pergerakan massa ujung memberikan tekanan pada material *piezoelectric* yang mana menghasilkan muatan pada elektroda logam. Arah getaran *input* diasumsikan dari sumbu y saja (vertikal) dan lapisan *piezoelectric* mengalami tegangan geser pada sumbu x (horizontal).



Gambar 2. 19 (a) *Bimorph layer cantilever* (b) Skematik diagram dari *energy harvester* (Kundua & Nemadea, 2016)

Pemanen energi kemudian disimulasikan terhadap suatu getaran dengan beban resistansi yang bervariasi. Tujuannya adalah untuk menemukan nilai optimum dari beban resistansi agar energi yang dipanen maksimal. Pemodelan dilakukan menggunakan 2 software yaitu MATLAB dan COMSOL. Sistem dinamisnya adalah:



Gambar 2. 20 Sistem dinamis *piezoelectric* (Kundua & Nemadea, 2016)

Jika $y(t)$ adalah perpindahan *base* akibat adanya *input* getaran dan $z(t)$ adalah perpindahan massa ujung relatif terhadap getaran *base*, maka persamaan gerak dari masa ujung adalah:

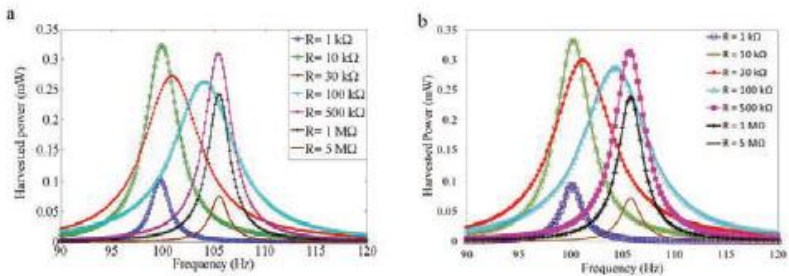
$$m\ddot{z}(t) = b_e\dot{z}(t) + kz(t) + \theta v = m\ddot{y}(t) \quad (2.26)$$

$$\ddot{z}(t) = 2\zeta_m\omega_n\dot{z}(t) + \omega_n^2z(t) + \frac{\theta}{m}v = \ddot{y}(t) \quad (2.27)$$

Dimana v adalah voltase yang dihasilkan, ζ_m adalah *damping ratio* mekanis, dan ω_n adalah frekuensi natural dari osilasi.

$$\frac{v}{R} + C_p \frac{dv}{dt} = \theta \frac{dz}{dt} \quad (2.28)$$

Dimana θ adalah *electrically induced damping coefficient* dan C_p kapasitansi dari satu lembar *piezoelectric*. Persamaan (2.27) dan persamaan (2.28) disebut dengan *electromechanically coupled governing equations*. Daya yang dihasilkan didapatkan dari model matematis untuk *load resistance* yang berbeda-beda ditunjukkan oleh gambar 2.21.



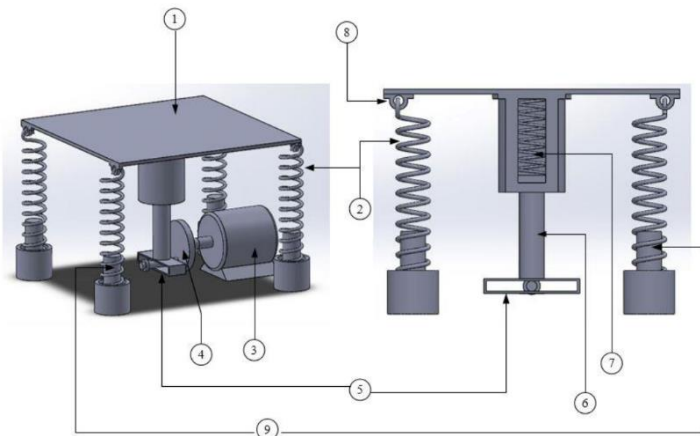
Gambar 2. 21 Power terhadap frekuensi hasil a) MATLAB b) COMSOL (Kundua & Nemadea, 2016)

Hasil akhir dari simulasi yang telah dilakukan merupakan nilai maksimum dari energi yang dipanen dengan beban resistansi optimal. Tipe sirkuit dibedakan menjadi *short circuit* dan *open circuit* dan pula software yang digunakan, yaitu antara MATLAB dengan COMSOL.

Tabel 2. 5 Perbandingan hasil (Kundua & Nemadea, 2016)

Parameters	Results by solving model in MATLAB	Results from simulation in COMSOL
Short circuit resonant frequency	99.80 Hz	100.00 Hz
Open circuit resonant frequency	105.50 Hz	105.75 Hz
Displacement of end mass at optimal load	127 μm	134 μm
Harvested power at optimal load	0.323 mW	0.334 mW

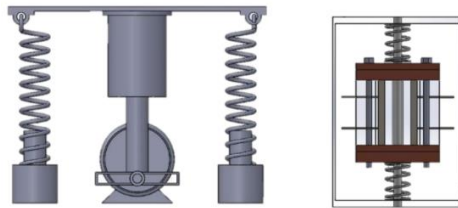
Penelitian CPVA yang dilakukan oleh **Wahyu Rachma Efendy** (Efendy, 2017) pada tahun 2016 yaitu tentang perancangan sebuah CPVA yang dapat mereduksi getaran dan menghasilkan energi listrik yang disimulasikan pada sistem utama. Variasi yang digunakan yaitu, variasi amplitudo massa eksentrik sebesar 0,025 m, 0,030 m, dan 9,935 m. Kecepatan putaran motor sebesar 20.61 rad/s (frekuensi natural), 22.05 rad/s (frekuensi panen), dan 25 rad/s (frekuensi lembah). Sedangkan variasi jumlah cantilever piezoelectric sebanyak 2600, 2800, dan 3000 buah. Berikut adalah rancangan mekanisme utama dan CPVA yang penulis rancang:



Gambar 2. 22 Pemodelan sederhana rancangan sistem utama (Efendy, 2017)

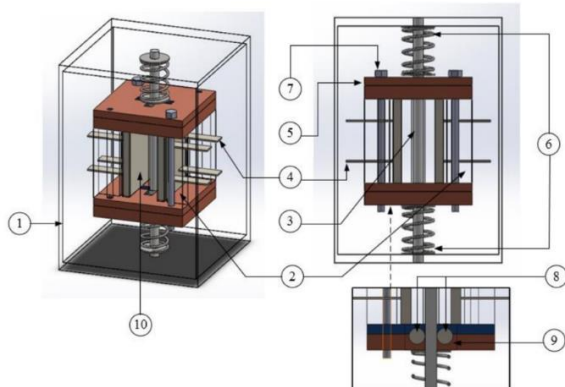
Keterangan:

- | | |
|-------------------------|---------------------|
| 1. Plat datar | 6. Batang penggerak |
| 2. Pegas shock absorber | 7. Pegas penggerak |
| 3. Motor DC | 8. Engsel |
| 4. Massa eksentrik | 9. Batang pengarah |
| 5. Slot massa eksentrik | |



Gambar 2. 23 Model analisa dari (a) sistem utama sebagai simulator getaran dan (b) CPVA (Efendy, 2017)

Gambar 2.24 merupakan rancangan pemodelan sederhana sistem utama dan CPVA. Rancangan alat yang asli memiliki dimensi panjang 500 mm, lebar 500 mm, dan tinggi 300 mm.

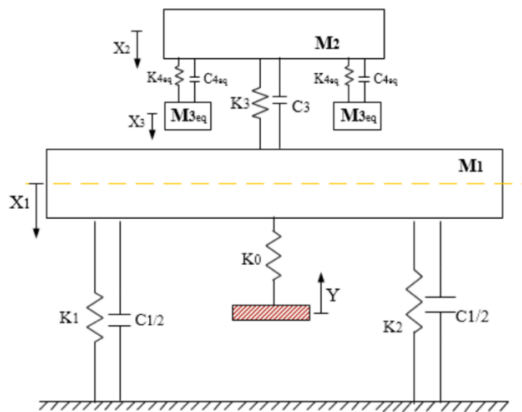


Gambar 2. 24 Pemodelan sederhana rancangan sistem CPVA (Efendy, 2017)

Keterangan:

- | | |
|------------------------------------|---|
| 1. <i>Box</i> penutup luar CPVA | 6. Pegas <i>absorber</i> |
| 2. Massa absorber | 7. Baut penyangga |
| 3. Batang pengarah | 8. Roller bearing |
| 4. <i>Cantilever Piezoelectric</i> | 9. Rumah bearing |
| 5. Penutup dalam CPVA | 10. Plat penyangga <i>piezoelectric</i> |

Dimensi asli dari rancangan alat CPVA adalah panjang 100 mm, lebar 100 mm, dan tinggi 200 mm. Dari rancangan sistem utama dan CPVA diatas, dapat dibuat pemodelan yang disederhanakan untuk analisa model dinamis dari sistem utama yang telah ditambahkan CPVA seperti gambar 2.25.



Gambar 2. 25 Sistem dinamis dari sistem utama dengan ditambahkan CPVA (Efendy, 2017)

Setelah itu dilakukan analisa perhitungan untuk mendapatkan nilai frekuensi natural dari sistem dengan penambahan CPVA. Hasil nilai frekuensi natural sistem yang telah ditambahkan CPVA ditunjukkan pada tabel 2.6.

Tabel 2. 6 Frekuensi natural sistem dengan CPVA (Efendy, 2017)

Jumlah PZT (n)	$M_3 = (n \times 0.0006)$ Kg	$M_2 = (0.02 + M_3)$ Kg	Frekuensi natural sistem utama tanpa CPVA (rad/s)	Frekuensi natural sistem dengan CPVA (rad/s)		
				ω_{n1}	ω_{n2}	ω_{n3}
2600	1.56	1.58	20.61	5.6	21.2	87
2800	1.68	1.7		7.9	21.4	102
3000	1.8	1.82		9.7	21.5	115

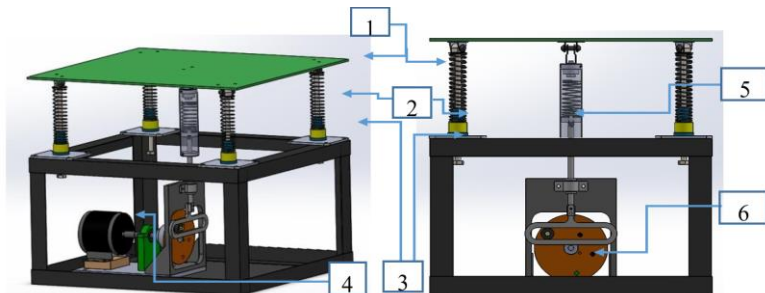
Dari grafik *bode diagram* sistem utama yang dioperasikan pada amplitudo 0.025 m tersebut memiliki variasi jumlah PZT, dimana semakin besar jumlah PZT yang dipasang, presentase reduksi getaran menjadi lebih besar.

Kemudian didapatkan presentase reduksi dari massa utama (X_1) dengan frekuensi operasi sebesar 20.61 rad/s yang telah ditambahkan CPVA dengan jumlah *piezoelectric* sebesar 1400 buah. Serta voltase bangkitan listrik dari *piezoelectric*. Pada presentase reduksi dan daya bangkitan listrik pada tabel 2.2, dapat diketahui bahwa semakin besarnya nilai amplitudo yang diberikan, maka nilai reduksi dan voltase juga semakin meningkat.

Tabel 2. 7 RMS reduksi respon perpindahan dan daya bangkitan sistem CPVA pada frekuensi 20.61 rad/s dengan jumlah 1400 buah piezoelectric dari hasil simulasi (Efendy, 2017)

Amplitudo (m)	Frekuensi (rad/s)	Reduksi (%)	Daya (watt)
0.025	20.61	21.76	4.08E-07
0.03	20.61	21.68	5.73E-07
0.035	20.61	22.75	7.18E-07

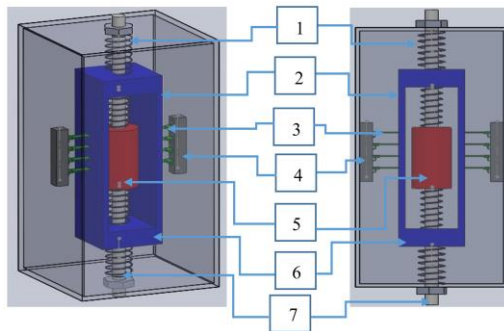
Penelitian terkait mekanisme *cantilever piezoelectric double vibration absorber* (CPDVA) pada sistem utama dilakukan pada tahun 2017 oleh **Bambang** (Bambang, 2018) berjudul “Pemodelan dan Analisis Mekanisme *Cantilever Piezoelectric Double Vibrarion Absorber* (CPDVA) sebagai peredam getaran translasi dan penghasil energi listrik”. Penelitian tersebut memiliki tujuan yaitu membuat rancang pemodelan simulator getaran yang memiliki arah gerak translasi dan dapat menghasilkan variasi frekuensi dan amplitudo getaran. Selain itu, penelitian tersebut bertujuan untuk membuat rancang pemodelan CPDVA untuk mereduksi getaran dan menghasilkan listrik dan juga untuk mengetahui pengaruh jumlah *cantilever piezoelectric*, amplitudo, dan frekuensi getaran terhadap reduksi getaran dan listrik yang dihasilkan. Pada penelitian ini dirancang pemodelan mekanisme dari CPDVA yang dapat mereduksi getaran dan menghasilkan listrik dengan menggunakan aplikasi MATLAB simulink. Rancangan sistem utama dapat dilihat pada gambar 2.26 dan rancangan CPDVA dapat dilihat pada gambar 2.27.



Gambar 2. 26 Rancangan sistem utama (a) tampak isometri dan (b) tampak depan (Bambang, 2018)

Keterangan :

- | | |
|------------------|----------------------|
| 1. Massa utama | 4. Motor DC |
| 2. Pegas | 5. Pegas penunjuk |
| 3. <i>Damper</i> | 6. <i>Disc Motor</i> |

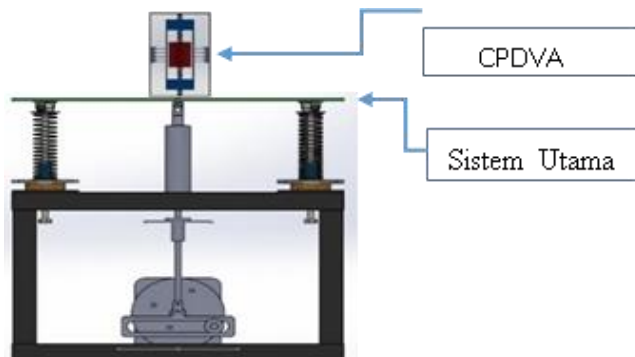


Gambar 2. 27 Rancangan CPDVA (a) tampak isometri dan (b) tampak depan (Bambang, 2018)

Keterangan :

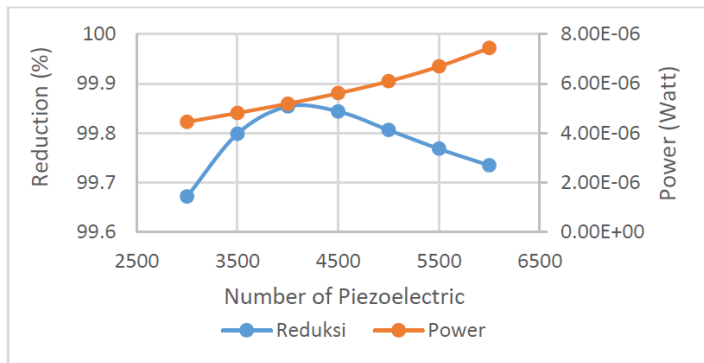
- | | |
|---------------------|---------------------|
| 1. Pegas absorber 1 | 5. Massa absorber 2 |
| 2. Pegas absorber 2 | 6. Massa absorber 1 |
| 3. PZT cantilever | 7. Poros Pengarah |
| 4. PCB | |

Ketika rancangan sistem utama dan CPDVA digabung, maka sistem gabungannya adalah seperti berikut:



Gambar 2. 28 Rancangan sistem utama dengan CPDVA (Bambang, 2018)

Dari hasil simulasi MATLAB *simulink* didapatkan karakteristik CPDVA pada variasi jumlah *piezoelectric* yaitu dapat dilihat pada gambar 2.29.



Gambar 2. 29 Grafik RMS reduksi getaran dan daya terhadap jumlah *piezoelectric* (Bambang, 2018)

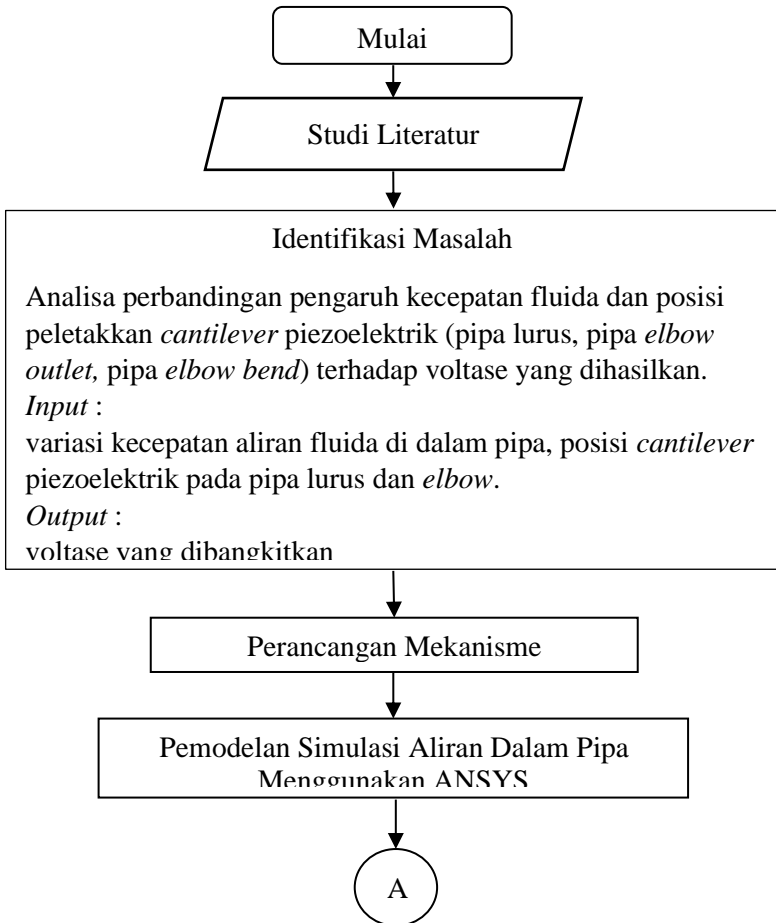
Dari gambar 2.29 didapatkan bahwa karakteristik CPDVA pada variasi jumlah *piezoelectric* yaitu memiliki presentase reduksi dan daya bangkitan listrik yang optimum pada jumlah *piezoelectric* sebanyak 4000 buah yang disimulasikan pada amplitude eksentrik motor 0,02 m dan frekuensi operasi 36,544 rad/s. Pada jumlah *piezoelectric* 4000 buah didapatkan presentase reduksi terbesar pada 99,85 % dan daya bangkitan *piezoelectric* sebesar $5,18 \times 10^{-6}$ watt.

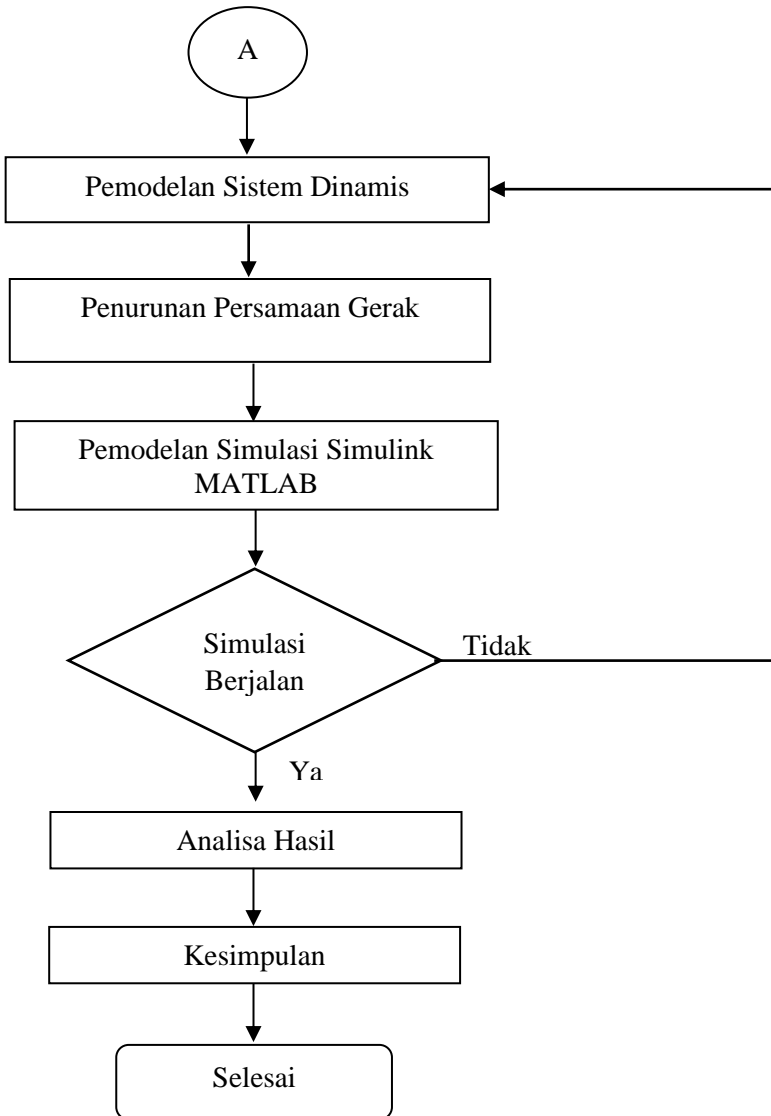
“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB III METODOLOGI

3.1 *Flowchart* Penelitian

Terdapat langkah-langkah yang dilakukan dalam penelitian tugas akhir ini yang ditunjukkan pada *flowchart* penelitian yaitu gambar 3.1 berikut





Gambar 3. 1 Diagram alir simulasi

3.2 Metode Pengerjaan

Metode pelaksanaan penelitian tugas akhir ini secara umum dijelaskan oleh gambar 3.1 yang terdiri dari beberapa tahap pengerjaan. Namun untuk memperoleh hasil yang diinginkan, maka perlu dilakukan pemahaman terhadap metode-metode yang dilakukan tersebut.

3.2.1 Studi Literatur

Sebelum penelitian tugas akhir ini dilakukan, maka perlu adanya studi literatur dan mencari referensi yang terkait dengan penelitian ini. Literatur dan referensi tersebut antara lain mengenai sistem perpipaian, *multi-degree of freedom*, *base motion vibration*, fluida, dan *piezoelectric*. Berbagai sumber tersebut didapatkan dari buku, tugas akhir dan jurnal internasional.

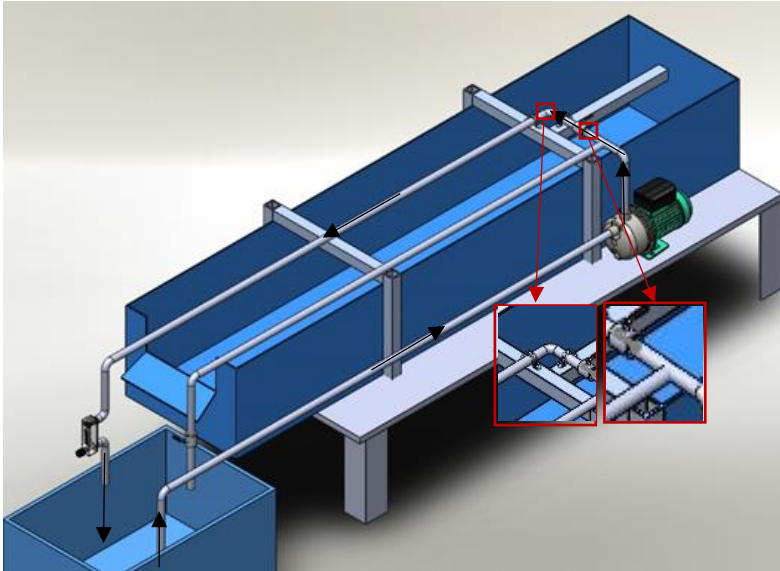
3.2.2 Identifikasi Masalah

Pada penelitian tugas akhir ini, masalah yang diidentifikasi dibagi menjadi dua bagian, yaitu *input* dan *output*. *Input* merupakan suatu masukan yang diberikan pada simulasi, yaitu berupa variasi kecepatan fluida dan posisi peletakkan *cantilever piezoelectric*. Sedangkan *output* merupakan hasil yang didapatkan dalam simulasi ini, yaitu berupa voltase yang dihasilkan dari kegiatan *energy harvesting*.

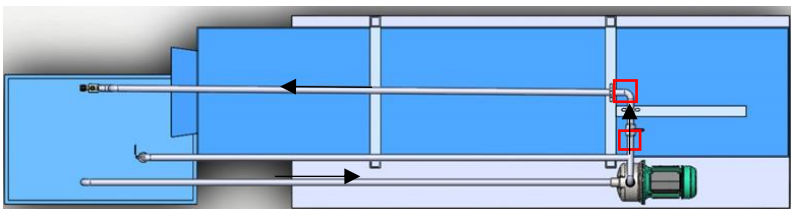
3.2.3 Perancangan Mekanisme

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

Jenis pipa	: Pipa lurus dan pipa <i>elbow</i> 90°
<i>Merk</i>	: Rucika
Tipe	: AW
Bahan	: PVC
Diameter	: 1 inci



(a)



(b)

Gambar 3. 2 Rangkaian sistem perpipaan dan bagian yang ditinjau (a) tampak isometrik (b) tampak atas

Arah aliran sepanjang sistem perpipaan ditunjukkan oleh tanda panah. Air dialirkan dengan kecepatan 0,3 m/s; 0,5 m/s; 0,7 m/s kecepatan tersebut dipilih untuk menyesuaikan dengan eksperimen yang ada. 0,7 m/s merupakan kecepatan maksimum

yang dapat dibaca oleh *flowmeter* alat eskperimen. Untuk mengetahui tipe aliran yang terjadi pada sistem utama, dilakukan perhitungan bilangan Reynold menggunakan persamaan (2.10) sebagai berikut:

Dikarenakan diameter pipa lurus dan diameter pipa *elbow* berbeda, maka perhitungan bilangan Reynold dibagi menjadi pipa lurus dan pipa *elbow*.

A. Pipa Lurus

- Kecepatan 0,3 m/s

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} = \frac{998,2 \times 0,3 \times 0,028}{0,001003} = 8359$$

- Kecepatan 0,5 m/s

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} = \frac{998,2 \times 0,5 \times 0,028}{0,001003} = 13933$$

- Kecepatan 0,7 m/s

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} = \frac{998,2 \times 0,7 \times 0,028}{0,001003} = 19506$$

B. Pipe *Elbow*

- Kecepatan 0,3 m/s

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} = \frac{998,2 \times 0,3 \times 0,032}{0,001003} = 9554$$

- Kecepatan 0,5 m/s

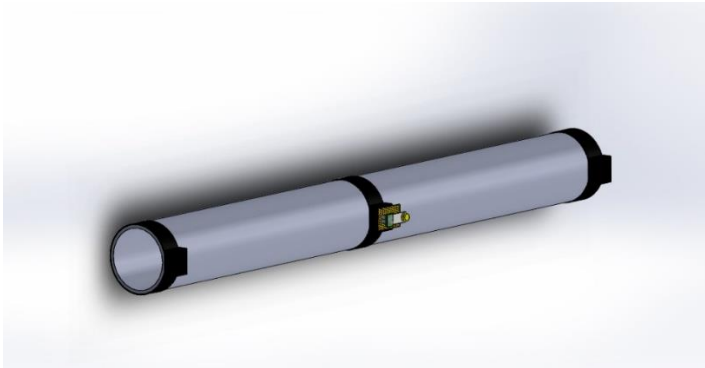
$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} = \frac{998,2 \times 0,5 \times 0,032}{0,001003} = 15923$$

- Kecepatan 0,7 m/s

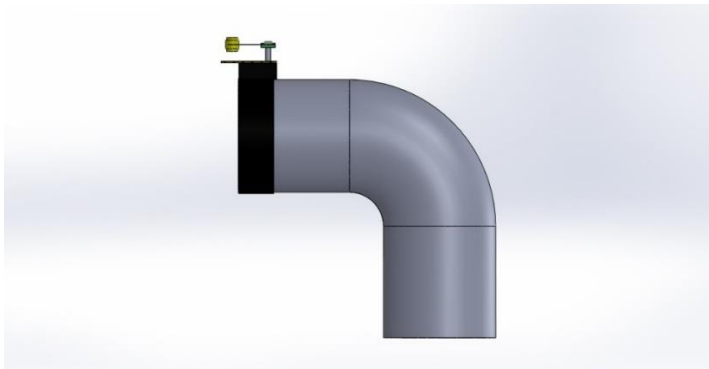
$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} = \frac{998,2 \times 0,7 \times 0,032}{0,001003} = 22292$$

Semua bilangan Reynold pada pipa lurus maupun pipa *elbow* pada semua kecepatan bernilai lebih dari 4000, artinya tipe aliran pada semua posisi dan kecepatan merupakan aliran turbulen.

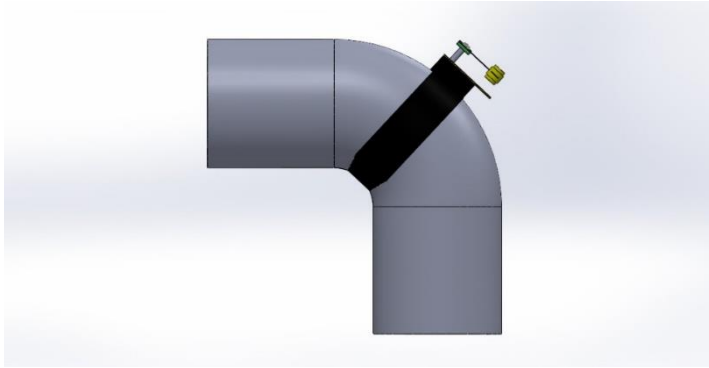
Posisi peletakan *piezoelectric* yang dianalisa pada penelitian ini yaitu pada pipa lurus dan *elbow*, ditunjukkan oleh gambar 3.3.



(a)



(b)



(c)

Gambar 3. 3 (a) Posisi Pipa Lurus (b) Posisi Pipa *Elbow Outlet*
(c) Posisi Pipa *Elbow Bend*

Elemen *harvesting* yang digunakan adalah *cantilever piezoelectric* merk *minisense 100 vibration sensor*. *Cantilever piezoelectric* diletakkan pada klem *custom* berbahan *polylactic acid* yang sudah dipasang PCB (*Printed Circuit Board*) untuk menyambungkan rangkaian *piezoelectric* dan mengalirkan listrik yang dihasilkan.



(a)

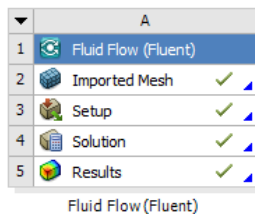


(b)

Gambar 3. 4 (a) *Minisense 100 vibration sensor* (b) *Cantilever piezoelectric* dipasang pada klem

3.2.4 Pemodelan Simulasi Aliran Dalam Pipa Menggunakan ANSYS

Untuk mengetahui besarnya getaran yang dihasilkan oleh aliran fluida, maka perlu dilakukan simulasi aliran itu sendiri. Simulasi aliran dilakukan menggunakan software Fluent ANSYS dengan analisa *transient flow*. Alur simulasi pada Workbench ANSYS ditunjukkan pada gambar 3.5, dimana analisis yang digunakan adalah *Fluid Flow (Fluent)*. Disimulasikan aliran turbulen dengan analisa *k-epsilon reliable wall* dan dengan parameter yang akan dijelaskan pada halaman selanjutnya. Hasil dari simulasi ini adalah *output* gaya terhadap sumbu.

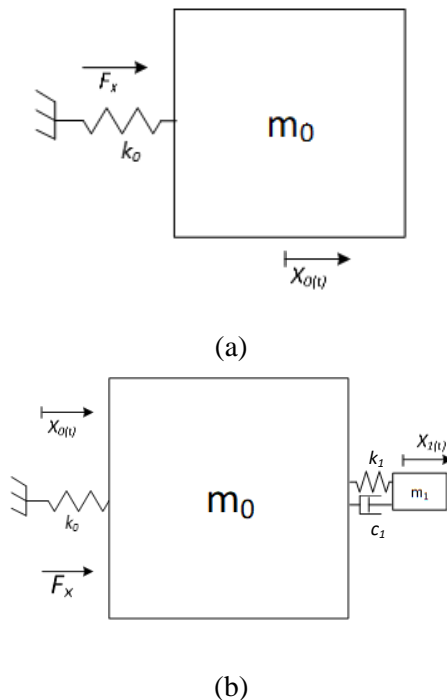


Gambar 3. 5 Skema analisis pada Workbench ANSYS

3.2.5 Pemodelan Sistem Dinamis

Model dinamis dari sistem utama dilakukan untuk memudahkan dalam penentuan *Free Body Diagram* (FBD). Gambar 3.6 berikut merupakan pemodelan sistem dinamis pada sistem utama tanpa *piezoelectric* dan sistem utama dengan *piezoelectric*

3.2.5.1 Pemodelan Sistem Dinamis Pipa Lurus



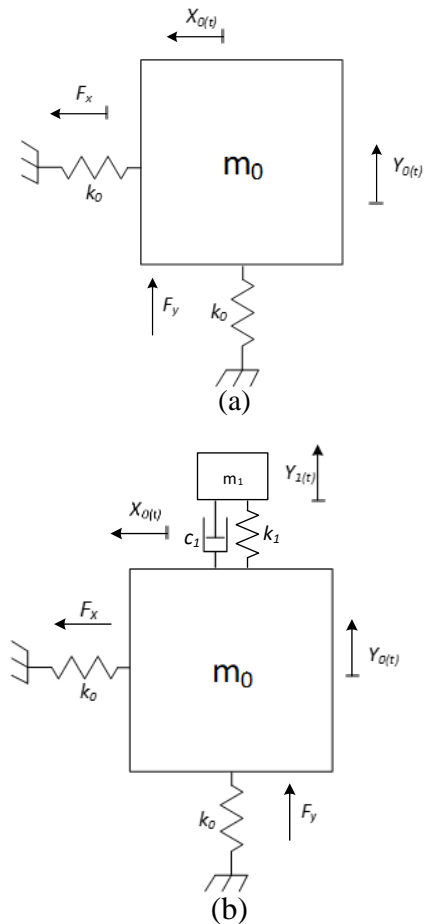
Gambar 3. 6 Model dinamis pipa lurus (a) Tanpa *piezoelectric*
(b) Dengan *piezoelectric*

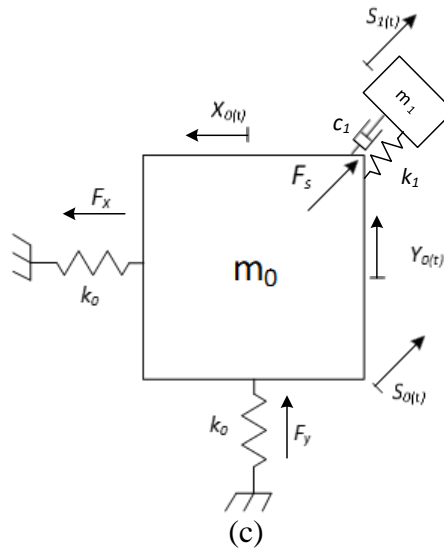
Keterangan :

- 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

3.2.5.2 Pemodelan Sistem Dinamis Pipa Elbow





Gambar 3.7 Model dinamis pipa *elbow* (a) Tanpa *piezoelectric* (b) Dengan *piezoelectric* pada posisi *outlet* (c) Dengan *piezoelectric* pada *bend*

Keterangan :

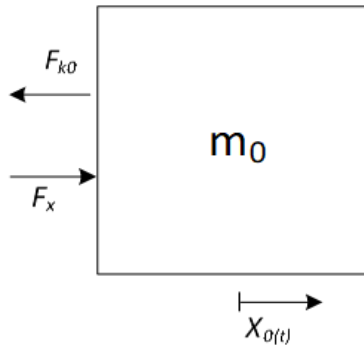
- m_0 : Massa utama
- m_1 : Massa *piezoelectric*
- k_0 : Konstanta pegas massa utama
- k_1 : Konstanta pegas *piezoelectric*
- c_1 : Konstanta redaman *piezoelectric*
- F_x : Gaya eksitasi dari fluida arah X
- F_y : Gaya eksitasi dari fluida arah Y
- F_s : Gaya eksitasi dari fluida di tikungan *elbow*

3.2.6 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 dengan *piezoelectric* dan tanpa *piezoelectric*:

3.2.6.1 Sistem Utama Tanpa *Piezoelectric*

A. Pipa lurus



Gambar 3. 8 *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

Besarnya masing-masing gaya yaitu:

$$F_{k_0} = k_0 x_0$$

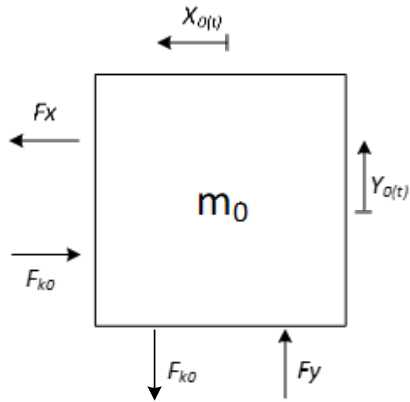
Berdasarkan persamaan diatas, maka didapat persamaan gerak translasi terhadap sumbu x pada pipa (m_0) sebagai berikut :

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

$$F_x - F_{k_0} = m_0 \ddot{x}_0$$

$$m_0 \ddot{x}_0 + k_0 x_0 = F_x \quad (3.1)$$

B. Pipa elbow



Gambar 3. 9 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

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 :

$$\begin{aligned} +\leftarrow \sum F &= m_0 \ddot{x}_0 \\ F_x - F_{k_{0x}} &= m_0 \ddot{x}_0 \\ m_0 \ddot{x}_0 + k_0 x_0 &= F_x \end{aligned} \quad (3.2)$$

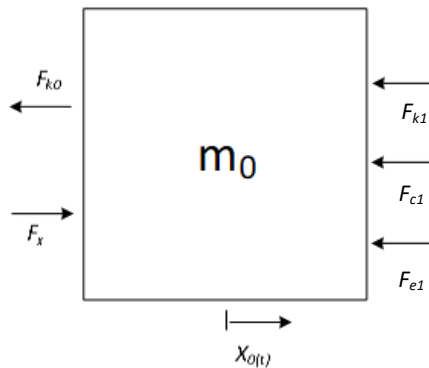
Berdasarkan persamaan diatas, maka didapat persamaan gerak translasi terhadap sumbu y pada pipa (m_0) sebagai berikut :

$$\begin{aligned} +\uparrow \sum F &= m_0 \ddot{y}_0 \\ F_y - F_{k_{0y}} &= m_0 \ddot{y}_0 \\ m_0 \ddot{y}_0 + k_0 y_0 &= F_y \end{aligned} \quad (3.3)$$

3.2.6.2 Sistem Utama Pipa Lurus dengan *Piezoelectric*

A. Pipa lurus

- Persamaan Gerak Massa Pipa (m_0)



Gambar 3. 10 *Free Body Diagram* massa pipa lurus

Keterangan:

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

F_{e1} : Gaya elektromekanik ekuivalen dari *piezoelectric*

Besarnya masing-masing gaya yaitu:

$$F_{k_0} = k_0 x_0$$

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

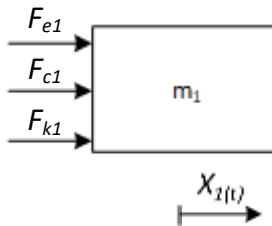
$$F_{c_1} = c_2 (\dot{x}_0 - \dot{x}_1)$$

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

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

$$\begin{aligned}
 + \rightarrow \sum F &= m_0 \ddot{x}_0 \\
 F_x - F_{k_0} - F_{k_1} - F_{c_1} - F_{e_1} &= m_0 \ddot{x}_0 \\
 m_0 \ddot{x}_0 + c_1 (\dot{x}_0 - \dot{x}_1) + k_0 x_0 + k_1 (x_0 - x_1) + n \Gamma k_v (x_0 - x_1) &= F_x \\
 m_0 \ddot{x}_0 + c_1 \dot{x}_0 - c_1 \dot{x}_1 + (k_0 + k_1 + n \Gamma k_v) x_0 - (k_1 + n \Gamma k_v) x_1 &= F_x \quad (3.5)
 \end{aligned}$$

- Persamaan Gerak *Piezoelectric* (m_1)



Gambar 3. 11 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*

Besarnya masing-masing gaya yaitu:

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

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

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

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

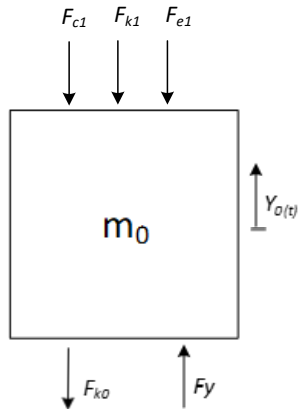
$$\begin{aligned} +\rightarrow \sum F &= m_1 \ddot{x}_1 \\ F_{k_1} + F_{c_1} + F_{e_1} &= m_1 \ddot{x}_1 \\ m_1 \ddot{x}_1 - c_1(\dot{x}_0 - \dot{x}_1) - k_1(x_0 - x_1) - n \Gamma k_v(x_0 - x_1) &= 0 \\ m_1 \ddot{x}_1 - c_1 \dot{x}_0 + c_1 \dot{x}_1 - (k_1 + n \Gamma k_v)x_0 + (k_1 + n \Gamma k_v)x_1 &= 0 \end{aligned} \quad (3.6)$$

Matriks dari persamaan diatas adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} m_0 & 0 \\ 0 & m_1 \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_0 \\ \ddot{x}_1 \end{Bmatrix} + \begin{pmatrix} c_1 & -c_1 \\ -c_1 & c_1 \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_0 \\ \dot{x}_1 \end{Bmatrix} \\ + \begin{pmatrix} (k_0 + k_1 + n \Gamma k_v) & -(k_1 + n \Gamma k_v) \\ -(k_1 + n \Gamma k_v) & k_1 + \Gamma k_v \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} x_0 \\ x_1 \end{Bmatrix} \\ = \begin{pmatrix} F_x \\ 0 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (3.7)$$

B. Pipa Elbow di Posisi Outlet

- Persamaan Gerak Pipa Elbow (m_0)



Gambar 3. 12 *Free Body Diagram* massa pipa elbow

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 X

F_{e1} : Gaya elektromekanik dari *piezoelectric*

Besarnya masing-masing gaya yaitu:

$$F_{k_0} = k_0 y_0$$

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

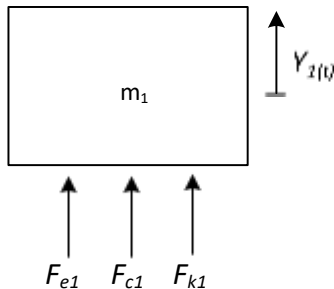
$$F_{c_1} = c_1 (\dot{y}_0 - \dot{y}_1)$$

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

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

$$\begin{aligned}
 +\uparrow \sum F &= m_0 \ddot{y}_0 \\
 F_y - F_{k_0} - F_{k_1} - F_{c_1} - F_{e_1} &= m_0 \ddot{y}_0 \\
 m_0 \ddot{y}_0 + c_1(\dot{y}_0 - \dot{y}_1) + k_0 y_0 + k_1(y_0 - y_1) + \\
 n \Gamma k_v(y_0 - y_1) &= F_y \\
 m_0 \ddot{y}_0 + c_1 \dot{y}_0 - c_1 \dot{y}_1 + (k_0 + k_1 + n \Gamma k_v) y_0 - (k_1 + \\
 n \Gamma k_v) y_1 &= F_y \quad (3.8)
 \end{aligned}$$

- Persamaan Gerak *Piezoelectric* (m_1)



Gambar 3. 13 *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*

Besarnya masing-masing gaya yaitu:

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

Berdasarkan persamaan diatas, maka didapat persamaan gerak translasi terhadap sumbu Y pada benda kerja (m_1) sebagai berikut

:

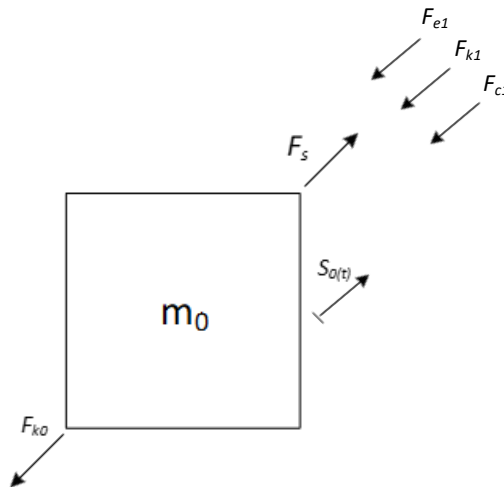
$$\begin{aligned}
 +\uparrow \sum F &= m_0 \ddot{y}_1 \\
 F_{k_1} + F_{c_1} + F_{e_1} &= m_1 \ddot{y}_1 \\
 m_1 \ddot{y}_1 - c_1 (\dot{y}_0 - \dot{y}_1) - k_1 (y_0 - y_1) - n \Gamma k_v (y_0 - y_1) &= 0 \\
 m_1 \ddot{y}_1 - c_1 \dot{y}_0 + c_1 \dot{y}_1 - (k_1 + n \Gamma k_v) y_0 + (k_1 + n \Gamma k_v) y_1 &= 0 \quad (3.9)
 \end{aligned}$$

Matriks dari persamaan diatas adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 \begin{pmatrix} m_0 & 0 \\ 0 & m_1 \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{y}_0 \\ \ddot{y}_1 \end{Bmatrix} + \begin{pmatrix} c_1 & -c_1 \\ -c_1 & c_1 \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{y}_0 \\ \dot{y}_1 \end{Bmatrix} \\
 + \begin{pmatrix} k_0 + k_1 + n \Gamma k_v & -(k_1 + n \Gamma k_v) \\ -(k_1 + n \Gamma k_v) & k_1 + n \Gamma k_v \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} y_0 \\ y_1 \end{Bmatrix} \\
 = \begin{pmatrix} F_y \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.10)
 \end{aligned}$$

C. Pipa *Elbow* di Posisi *Bend*

- Persamaan Gerak Pipa *Elbow* (m_0)



Gambar 3. 14 *Free Body Diagram* massa pipa *elbow*

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 tikungan *elbow*

F_{e_1} : Gaya elektromekanik dari *piezoelectric*

Besarnya masing-masing gaya yaitu:

$$F_s = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$$

$$F_{k_{ox}} = k_0 s_0$$

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

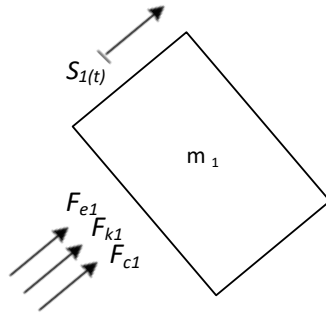
$$F_{c_1} = c_1 (\dot{s}_0 - \dot{s}_1)$$

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

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

$$\begin{aligned} +\nearrow \sum F &= m_0 \ddot{s}_0 \\ F_s - F_{k_0} - F_{k_1} - F_{c_1} - F_{e_1} &= m_0 \ddot{s}_0 \\ m_0 \ddot{s}_0 + k_0 s_0 + k_1 (s_0 - s_1) + c_1 (\dot{s}_0 - \dot{s}_1) + n \Gamma k_v (s_0 - s_1) &= F_s \\ m_0 \ddot{s}_0 + (k_0 + k_1 + n \Gamma k_v) s_0 - (k_1 + n \Gamma k_v) s_1 + c_1 \dot{s}_0 - c_1 \dot{s}_1 &= F_s \\ m_0 \ddot{s}_0 + c_1 \dot{s}_0 - c_1 \dot{s}_1 + (k_0 + k_1 + n \Gamma k_v) s_0 - (k_1 + & n \Gamma k_v) s_1 = F_s \end{aligned} \quad (3.11)$$

- Persamaan Gerak *Piezoelectric* (m_1)



Gambar 3. 15 *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*

Besarnya masing-masing gaya yaitu:

$$\begin{aligned}
 F_{k_1} &= k_1(s_0 - s_1) \\
 F_{c_1} &= c_1(\dot{s}_0 - \dot{s}_1) \\
 F_{e_1} &= n \Gamma k_v(s_0 - s_1)
 \end{aligned}$$

Berdasarkan persamaan diatas, maka didapat persamaan gerak translasi terhadap sumbu x pada *piezoelectric* 2 (m_2) sebagai berikut :

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

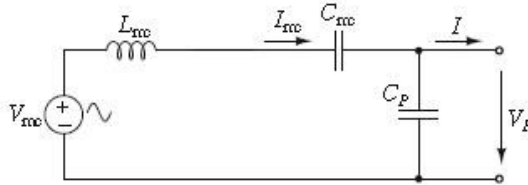
$$m_1 \ddot{s}_1 - c_1 \dot{s}_0 + c_1 \dot{s}_1 - (k_1 + n \Gamma k_v) s_0 + (k_1 + n \Gamma k_v) s_1 = 0 \quad (3.12)$$

Matriks dari persamaan diatas adalah sebagai berikut:

$$\begin{pmatrix} m_0 & 0 \\ 0 & m_1 \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{s}_0 \\ \ddot{s}_1 \end{Bmatrix} + \begin{pmatrix} c_1 & -c_1 \\ -c_1 & c_1 \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{s}_0 \\ \dot{s}_1 \end{Bmatrix} + \begin{pmatrix} (k_0 + k_1 + n \Gamma k_v) & -(k_1 + n \Gamma k_v) \\ -(k_1 + n \Gamma k_v) & (k_1 + n \Gamma k_v) \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} s_0 \\ s_1 \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} F_s \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.13)$$

3.2.7 Pemodelan Kelistrikan *Piezoelectric*

Gambar 3.15 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 akan dirumuskan voltase bangkitan mekanisme pada 3.13. Nilai gaya elektromekanik piezoelectric F_e dirumuskan pada 3.14.



Gambar 3. 16 Diagram sirkuit elektromagnetik *cantilever piezoelectric*

$$V_p = \frac{3d_{31}E_p w_p t}{4C} X_p \quad (3.14)$$

$$F_e = \Gamma V_p \quad (3.15)$$

$$= K_{pe} X_p \quad (3.16)$$

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*
 n = Jumlah *piezoelectric*
 Γ = *electromechanical factor piezoelectric*
 K_{pe} = Konstanta pegas *piezoelectric* ekuivalen

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

$$V_{mc} = L_{mc} \frac{dI_{mc}}{dt} + R_{mc} I_{mc} + \frac{1}{C_{mc}} \int I_{mc} dt + V_p \quad (3.17)$$

$$I_{mc} = \frac{1}{L_{mc}} (V_{mc} - R_{mc} I_{mc} - \frac{1}{C_{mc}} \int I_{mc} dt - V_p) \quad (3.18)$$

dimana:

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

dengan :

M = Massa (Kg)

dp = Konstanta damping ekuivalen *piezoelectric* (Ns/m)

kp = Konstanta pegas ekuivalen *piezoelectric* (N/m)

Cp = kapasitansi *piezoelectric* (Farad)

Sehingga daya bangkitan dari *piezoelectric* dapat dirumuskan dengan :

$$P = V_p I_{mc} \quad (3.19)$$

dimana :

P = Daya bangkitan *piezoelectric* (Watt)

I_{mc} = Arus bangkitan *piezoelectric* (Ampere)

3.2.8 Pemodelan Simulasi Simulink Matlab

Hasil persamaan state variable dari permodelan dinamis kemudian diubah ke dalam bentuk blok diagram simulasi dengan menggunakan software MATLAB Simulink. Simulasi ini dilakukan untuk mendapatkan penyelesaian persamaan matematis dari pemodelan sistem utama pipa lurus dan *elbow* yang dipasangkan rangkaian *piezoelectric*.

3.2.9 Simulasi

Pada pemodelan sistem utama dengan *cantilever piezoelectric* proses simulasi dimulai dengan *input force* yang didapatkan dari simulasi ANSYS yang sudah dijelaskan pada subbab 3.2.4, *output*-nya adalah displacement pada massa utama (m_0) yang akan menjadi *input* pada rangkaian *piezoelectric* (m_1, m_2, m_3). Rangkaian *piezoelectric* ini yang akan mengeluarkan *output* berupa displacement (x_1, x_2, x_3) dan voltase listrik bangkitan.

3.2.10 Analisa Hasil

Dari simulasi yang dilakukan akan didapatkan grafik dari analisa energy density *cantilever piezoelectric* oleh masing-masing variasi. Grafik yang akan diperoleh adalah energy density terhadap variasi peletakan (*elbow* & pipa lurus) dan *energy density* terhadap variasi kecepatan aliran fluida. Selain itu hasil dari penelitian ini nantinya akan dijadikan acuan untuk penelitian selanjutnya.

3.2.11 Kesimpulan

Dari hasil analisis yang telah dilakukan akan dibuat kesimpulan. Kesimpulan berupa pembahasan hasil yang menjawab rumusan masalah dan tujuan penelitian. Dari kesimpulan penelitian ini diharapkan dapat menjadi literatur dan referensi untuk penelitian yang serupa.

3.3 Penentuan Parameter Penelitian

Sebelum simulasi dilakukan, parameter yang dibutuhkan untuk menjalankan simulasi harus terlebih dahulu diketahui. Nilai massa utama diperoleh melalui rumus massa jenis, sedangkan nilai panjang dapat diperoleh dengan pengukuran dengan menggunakan mistar atau jangka sorong. Nilai dari koefisien pegas pipa didapatkan dari perhitungan menggunakan momen. Parameter dari pemodelan *cantilever piezoelectric* didapatkan dari hasil perhitungan dan studi literatur. Parameter untuk simulasi ANSYS dapat dilihat dari Tabel 3.1. Tabel 3.2 adalah parameter sistem utama. Sedangkan Tabel 3.3 merupakan parameter dari *cantilever piezoelectric*.

Tabel 3. 1 Parameter ANSYS

Parameter	Nilai
Pipa	
<i>Elastic modules</i>	3000 N/mm ² (3 Gpa)
<i>Poisson's rasio</i>	0,410
<i>Density</i>	1400 kg/m ³
<i>Roughness Constant</i>	0,0015
Fluida	
Jenis Fluida	Air
Kecepatan fluida	0,3 m/s ; 0,5 m/s ; 0,7 m/s
<i>Temperature</i>	20°C
<i>Density</i>	1000 kg/m ³
<i>Dynamic viscosity</i>	1,002 x 10 ⁻³ kg/m.s
<i>Kinematic viscosity</i>	1,003 x 10 ⁻⁶ m ² /s
Gravitasi	9,81 m ² /s
<i>Initial Pressure</i> pipa lurus	195984.4 Pa
<i>Initial Pressure</i> pipa elbow	195955.2 Pa

Tabel 3. 2 Parameter sistem utama

Keterangan	Parameter	Nilai	
Massa pipa	m_0	Pipa Lurus	<i>Elbow</i>
		0,098 kg	0,1609 kg
Massa <i>piezoelectric</i>	m_1	6×10^{-4} kg	
Konstanta pegas pipa	k_0	Pipa Lurus	<i>Elbow</i>
		980166 <i>N/mm</i>	50977,4 <i>N/mm</i>
Konstanta pegas <i>piezoelectric</i>	k_1	$5,75 \times 10^{-1}$ <i>N/m</i> ²	

Tabel 3. 3 Parameter cantilever *piezoelectric*

Keterangan	Parameter	Nilai
Massa <i>piezoelectric</i>	m_{pzt}	6×10^{-4} kg
Tebal <i>piezoelectric</i>	t_{pzt}	1×10^{-3} m
Lebar <i>piezoelectric</i>	w_{pzt}	6×10^{-3} m
Panjang piezoelektrik	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
Electromechanical coupling factor	k_{31}	12 %
Konstanta pegas	k_{pzt}	$5,75 \times 10^{-1}$ N/m
Modulus young	E	3×10^9 N/m ²
Frekuensi resonansi	fr	75 Hz

3.3.1 Menentukan Parameter Massa

Parameter massa pipa lurus dan elbow didapatkan dari penimbangan pipa ditambah massa air yang mengisi rongga pipa. Massa di dalam pipa didapatkan dengan menghitung volume pipa lurus dan elbow, kemudian dikalikan dengan massa jenis air, maka didapatkan massa air.

- Massa Pipa Lurus

$$M_{fluid} = v \times \rho$$

$$v = A \times L$$

$$v = \frac{\pi}{4} \times D_i^2 \times L$$

$$v = \frac{\pi}{4} \times (0,028)^2 \times 0,1054$$

$$v = 6,49 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$M_{fluid} = v \times \rho = 6,49 \times 10^{-5} \times 1000 = 0,065 \text{ kg}$$

$$\begin{aligned} \text{Massa pipa lurus} &= M_{timbang} + M_{fluid} \\ &= 0,033 + 0,065 \\ &= 0,098 \text{ kg} \end{aligned}$$

- Massa elbow

$$M_{fluid} = v \times \rho$$

$$v = A \times L$$

$$v = \left(\pi \left[\left(\frac{1}{4} \times D_i^2 \times SR \right) + \left(\frac{1}{4} \times D_i^2 \times L \right) + \left(\frac{1}{4} \times D_i^2 \times L \right) \right] \right)$$

$$v = \left(\pi \left[\left(\frac{1}{4} \times (0,0325)^2 \times 0,0254 \right) + \left(\frac{1}{2} \times (0,0325)^2 \times 0,04 \right) \right] \right)$$

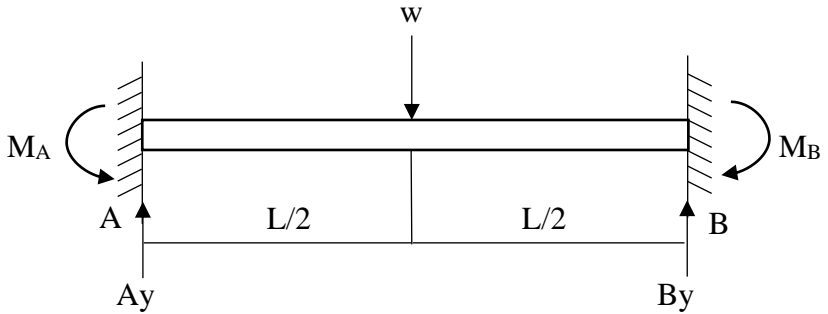
$$v = 8,743 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$M_{fluid} = v \times \rho = 8,743 \times 10^{-5} \times 1000 = 0,08743 \text{ kg}$$

$$\begin{aligned} \text{Massa elbow} &= M_{timbang} + M_{fluid} \\ &= 0,0735 + 0,08743 \\ &= 0,1609 \text{ kg} \end{aligned}$$

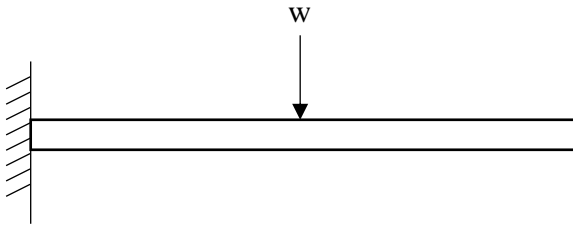
3.3.2 Menentukan Parameter Kekakuan (k)

3.3.2.1 Pipa Lurus



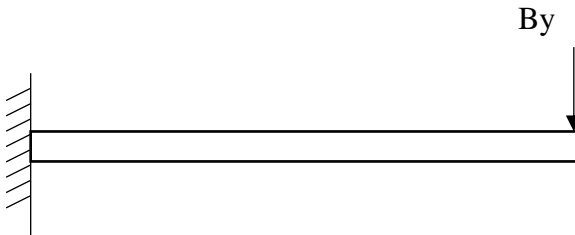
Gambar 3. 17 *Free Body Diagram* pipa lurus

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



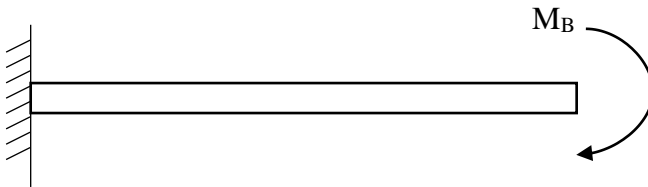
Gambar 3. 18 *Free Body Diagram* hanya dengan gaya berat

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



Gambar 3. 19 *Free Body Diagram* hanya dengan gaya reaksi titik B

$$\theta'' = \frac{By L^2}{2 E I} \quad v'' = \frac{By L^3}{3 E I}$$



Gambar 3. 20 *Free Body Diagram* hanya dengan momen titik B

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

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

$$\frac{w L^2}{8 E I} + \frac{By L^2}{2 E I} + \frac{M_B L}{E I} = 0 \quad (3.20)$$

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

$$\frac{5 w L^3}{48 E I} + \frac{By L^3}{3 E I} + \frac{M_B L^2}{2 E I} = 0 \quad (3.21)$$

Substitusi dan eliminasi persamaan (3.20) & (3.21)

$$\begin{aligned} \frac{wL}{8} + \frac{ByL}{2} + M_B = 0 \quad | \times 2 | \quad \frac{wL}{4} + 2M_B = 0 \\ \frac{5wL}{48} + \frac{ByL}{3} + \frac{M_B}{2} = 0 \quad | \times 3 | \quad \frac{15wL}{4} + \frac{3M_B}{2} = 0 \\ -\frac{wL}{16} + \frac{M_B}{2} = 0 \\ \frac{M_B}{2} = \frac{1}{16}wL \\ M_B = \frac{1}{8}wL \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{wL}{8} + \frac{ByL}{2} + M_B = 0 \\ \frac{wL}{8} + \frac{ByL}{2} + \frac{1}{8}wL = 0 \\ \frac{ByL}{2} + \frac{1}{4}wL = 0 \\ \frac{ByL}{2} = -\frac{1}{4}wL \\ By = -\frac{1}{2}w \end{aligned}$$

- Gaya-gaya pada sumbu Y

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

$$FA_y + FB_y - w = 0$$

$$FA_y = w - FB_y$$

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

$$FA_y = \frac{w}{2} \tag{3.22}$$

- Momen pada titik A

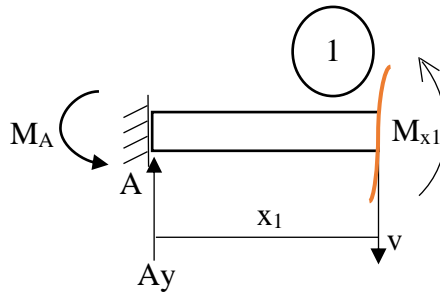
$$+\curvearrowright \Sigma M_A = 0$$

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

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

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

- Potongan 1



Gambar 3. 21 Potongan 1 *free body diagram* pipa lurus

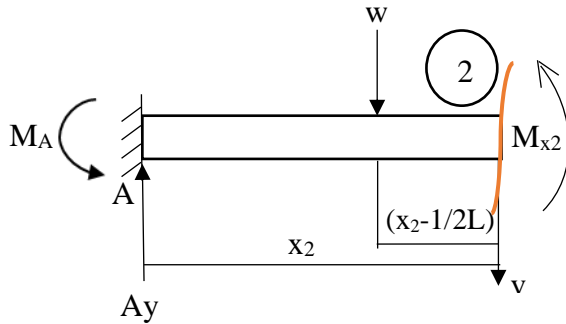
$$\text{Untuk } 0 \leq x_1 \leq \frac{L}{2}$$

$$+\curvearrowright \Sigma M_{x1} = 0$$

$$M_{x1} + M_A - A_y x_1 = 0$$

$$M_{x1} = A_y x_1 - M_A \quad (3.24)$$

- Potongan 2



Gambar 3. 22 Potongan 2 free body diagram pipa lurus

Untuk $0 \leq x_1 \leq L$

$$+\curvearrowright \Sigma M_{x_2} = 0$$

$$M_{x_2} + M_A - Ay x_2 + w(x_2 - \frac{L}{2}) = 0$$

$$M_{x_2} = Ay x_2 - wx_2 + \frac{wL}{2} - M_A \quad (3.25)$$

Metode *double integral*:

- Slope : $EI \frac{dv_1}{dx_1} = \frac{Ay x_1^2}{2} - M_A + c_1 \quad (3.26)$

- Defleksi : $EI v_1 = \frac{Ay x_1^3}{6} - \frac{M_A x_1^2}{2} + c_1 x_1 + c_2 \quad (3.27)$

- Slope : $EI \frac{dv_2}{dx_2} = \frac{Ay x_2^2}{2} - \frac{w x_2^2}{2} + \frac{wL x_2}{2} - M_A + c_3 \quad (3.28)$

- Defleksi : $EI v_2 = \frac{Ay x_2^3}{6} - \frac{w x_2^3}{6} + \frac{wL x_2^2}{4} - \frac{M_A x_2^2}{2} + c_3 x_2 + c_4 \quad (3.29)$

➤ $v_1 = 0$ saat $x_1 = 0$

$$c_2 = 0 \quad (3.30)$$

$$\begin{aligned}
 &\triangleright v_2 = 0 \text{ saat } x_2 = L \\
 0 &= \frac{Ay L^3}{6} - \frac{wL^3}{6} + \frac{w L^3}{4} - \frac{M_A L^2}{2} + c_3 L + c_4 \\
 0 &= \frac{Ay L^3}{6} + \frac{wL^3}{12} - \frac{M_A L^2}{2} + c_3 L + c_4 \quad (3.31)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &\triangleright \frac{dv_1}{dx_1} = \frac{dv_2}{dx_2} \text{ saat } x_1 = x_2 = \frac{1}{2} L \\
 \frac{Ay x_1^2}{2} - M_A x_1 + c_1 &= \frac{Ay x_2^2}{2} - \frac{w x_2^2}{2} + \frac{wL x_2}{2} \\
 &\quad - M_A x_2 + c_3 \\
 \frac{Ay x_1^2}{8} + c_1 &= \frac{Ay L^2}{4} - \frac{wL^2}{8} + \frac{wL^2}{4} + c_3 \\
 c_3 &= -\frac{Ay L^2}{8} - \frac{wL^2}{8} + c_1 \quad (3.32)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &\triangleright v_1 = v_2 \text{ saat } x_1 = x_2 = L/2 \\
 \frac{Ay x_1^3}{6} - \frac{M_A x_1^2}{2} + c_1 x_1 &= \frac{Ay x_2^3}{6} - \frac{w x_2^3}{6} \\
 &\quad + \frac{wL x_2^2}{4} - \frac{M_A x_2^2}{2} + c_3 x_2 + c_4 \\
 \frac{c_1 L}{2} &= -\frac{wL^3}{48} + \frac{w L^3}{16} + \frac{c_3 L}{2} + c_4 \\
 \frac{c_1 L}{2} &= \frac{wL^3}{24} + \frac{c_3 L}{2} + c_4 \\
 c_4 &= \frac{c_1 L}{2} - \frac{wL^3}{24} - \frac{c_3 L}{2} \quad (3.33)
 \end{aligned}$$

Persamaan (3.33) \rightarrow (3.32)

$$c_4 = \frac{c_1 L}{2} - \frac{wL^3}{24} + \frac{Ay L^3}{16} + \frac{wL^3}{16} - \frac{c_1 L}{2}$$

$$c_4 = \frac{wL^3}{48} + \frac{Ay L^3}{16} \quad (3.34)$$

Persamaan (3.34) \rightarrow (3.31)

$$0 = \frac{Ay L^3}{6} + \frac{wL^3}{6} - \frac{M_A L^2}{2} + c_3 L + \frac{wL^3}{48} + \frac{Ay L^3}{16}$$

$$0 = -\frac{11Ay L^3}{48} - \frac{5wL^3}{48} + \frac{M_A L^2}{2} + c_3 L$$

$$c_3 L = \frac{11Ay L^3}{48} + \frac{5wL^3}{48} + \frac{M_A L^2}{2}$$

$$c_3 = -\frac{11Ay L^2}{48} - \frac{5wL^2}{48} + \frac{M_A L}{2} \quad (3.35)$$

Persamaan (3.35) \rightarrow (3.32)

$$-\frac{11Ay L^2}{48} - \frac{5wL^2}{48} + \frac{M_A L}{2} = -\frac{Ay L^2}{8} - \frac{wL^2}{8} + c_1$$

$$c_1 = -\frac{5Ay L^2}{48} + \frac{wL^2}{48} + \frac{M_A L}{2} \quad (3.36)$$

Persamaan (3.36) dan (3.30) \rightarrow (3.27)

$$EI v_1 = \frac{Ay x_1^3}{6} - \frac{M_A x_1^2}{2} + c_1 x_1 + c_2$$

$$EI v_1 = \frac{Ay x_1^3}{6} - \frac{M_A x_1^2}{2} - \frac{5Ay L^2}{48} x_1 + \frac{wL^2}{48} x_1 + \frac{M_A L}{2} x_1$$

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

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

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

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

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

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

$$v_1 = \frac{w L^3}{192 EI} \quad (3.37)$$

- Momen

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

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

$$x = 0 \rightarrow M_{x_1} = -\frac{wL}{8} = -0,125 wL$$

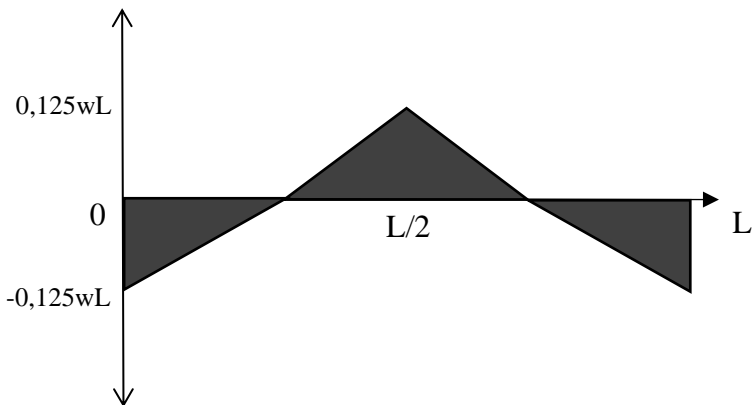
$$x = \frac{L}{2} \rightarrow M_{x_1} = \frac{wL}{8} = 0,125 wL$$

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

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

$$x = L/2 \rightarrow M_{x_1} = \frac{wL}{8} = 0,125 wL$$

$$x = L \rightarrow M_{x_1} = -\frac{wL}{8} = -0,125 wL$$



Gambar 3. 23 Diagram momen pipa lurus

Mencari nilai kekakuan

$$F = k \Delta x$$

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

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

$$k = \frac{192 EI}{L^3} \quad (3.38)$$

Rumus inersia pipa:

$$\begin{aligned} I &= \frac{\pi}{64} (d_o^4 - d_i^4) \\ &= \frac{\pi}{64} (32^4 - 28^4) \\ &= \frac{\pi}{64} (1048576 - 614656) \\ &= 21300 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

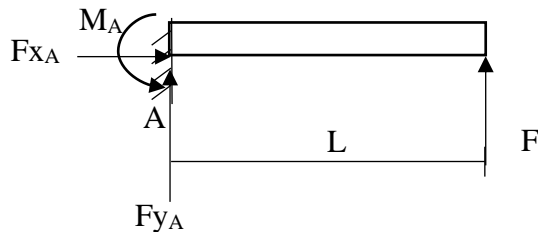
$$E = 3000 \text{ N/mm}^2$$

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

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

$$= 980166 \text{ N/m}$$

3.3.2.2 Pipa Elbow



Gambar 3. 24 *Free Body Diagram* pipa elbow

Dari gambar skema 3.22 dapat dilakukan perhitungan untuk menemukan persamaan besarnya momen seperti berikut:

- Gaya-gaya pada sumbu X

$$+\rightarrow \Sigma F_x = 0$$

$$F_{x_A} = 0$$

$$(3.39)$$

- Gaya-gaya pada sumbu Y

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

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

$$F_{y_A} = -F$$

$$(3.40)$$

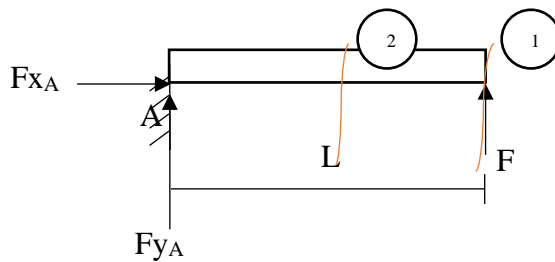
- Momen pada titik A

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

$$M_A - FL = 0$$

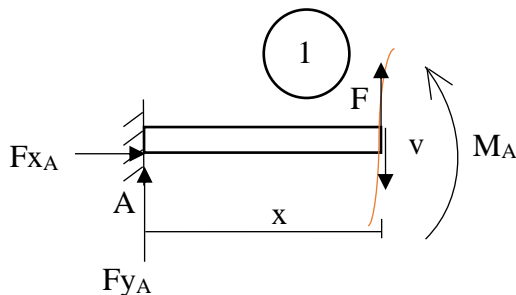
$$M_A = -F$$

$$(3.41)$$



Gambar 3. 25 Potongan *free body diagram* pipa elbow

- Potongan 1



Gambar 3. 26 Potongan 1 *free body diagram* pipa elbow

Untuk $0 \leq x_1 \leq L$

- Gaya pada sumbu Y

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

$$F_{y_A} - V = 0$$

$$F_{y_A} = V$$

(3.42)

- Momen pada titik A

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

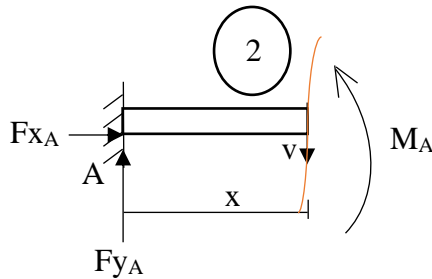
$$M_A - F_{y_A} x_1 = 0$$

$$M_A = F_{y_A} x_1$$

$$M_A = -F x_1$$

(3.43)

- Potongan 2



Gambar 3. 27 Potongan 2 *free body diagram* pipa elbow

Untuk $0 \leq x_2 \leq L/2$

- Momen untuk

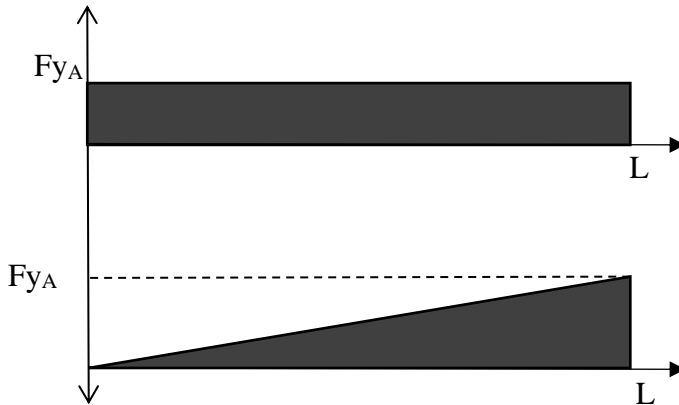
$$+\curvearrowright \Sigma M = 0$$

$$M_A - F_{y_A} x_2 = 0$$

$$M_A = F_{y_A} x_2$$

$$M_A = -F x_2$$

(3.44)



Gambar 3. 28 Diagram *shear* dan diagram momen pipa lurus

Dari gambar 3.26 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 $0 \leq x_1 \leq L$

$$EI v \frac{d^2v}{dx^2} = M(x)$$

$$EI v \frac{d^2v}{dx^2} = -Fx$$

$$EI v \frac{dv}{dx} = -\frac{F}{2} x^2 + C_1$$

$$EI v = \frac{F}{6} x^3 + C_1x + C_2 \quad (3.45)$$

Mencari nilai C_1 dan C_2

Untuk $\theta = \frac{dv}{dx} = 0$ pada $x = L$

$$EI v \frac{dv}{dx} = -\frac{F}{2} x^2 + C_1$$

$$0 = -\frac{F}{2} (l)^2 + C_1$$

$$C_1 = -\frac{FL^2}{2} \quad (3.46)$$

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

$$\begin{aligned} EI v &= -\frac{F}{6} x^3 + C_1 x + C_2 \\ 0 &= -\frac{F}{6} (0) + C_1(0) + C_2 \\ C_2 &= 0 \end{aligned} \quad (3.47)$$

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 :

$$\begin{aligned} EI v &= -\frac{F}{6} x^3 + C_1 x + C_2 \\ EI v &= -\frac{F}{6} (l)^3 + \frac{FL^2}{2} L + 0 \\ EI v &= -\frac{FL^3}{6} + \frac{FL^3}{2} \\ EI v &= -\frac{FL^3}{6} + \frac{3FL^3}{6} \\ EI v &= \frac{2FL^3}{6} \\ EI v &= \frac{FL^3}{3} \\ v &= \frac{FL^3}{3EI} \\ \Delta &= \frac{FL^3}{3EI} \end{aligned} \quad (3.48)$$

Sehingga persamaan 3.48 digunakan untuk mendapatkan nilai dari konstanta kekakuan di titik maksimum. Dimana persamaan untuk mencari nilai kekakuan ditunjukkan oleh persamaan 3.49 berikut ini

$$F = k \Delta X$$

$$\begin{aligned}
 k &= \frac{F}{\Delta X} \\
 k &= \frac{F}{\frac{FL^3}{3EI}} \\
 k &= \frac{3EI}{L^3} \tag{3.49} \\
 I &= \frac{\pi}{64} (d_o^4 - d_i^4) \\
 &= \frac{\pi}{64} (40^4 - 32,5^4) \\
 &= \frac{\pi}{64} (2560000 - 1115664,063) \\
 &= 70898,7 \text{ mm}^4 \\
 E &= 3000 \text{ N/mm}^2 \\
 k &= \frac{3(3000)(70898,7)}{232,185^3} \\
 k &= 50,9774 \text{ N/mm} \\
 &= 50977,4 \text{ N/m}
 \end{aligned}$$

3.3.2.3 Piezoelectric

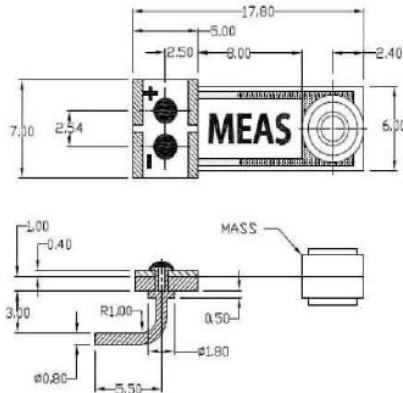
Untuk mengetahui konstanta kekakuan pegas dari *piezoelectric* dapat digunakan persamaan (3.49).

$$k_p = \frac{3EI}{l^3}$$

$$I = \frac{1}{12}bh^3$$

Nilai *Modulus Young* (E) dan dimensi *piezoelectric* dapat diketahui dari spesifikasi material *piezoelectric* yang digunakan. Dimensi *piezoelectric Minisense 100 Vibration Sensor* dapat

dilihat pada gambar 3.27. Maka nilai kekakuan *piezoelectric* adalah $5,75 \times 10^{-1} \text{ N/m}^2$.



Gambar 3. 29 Dimensi *piezoelectric Minisense 100 Vibration Sensor*

3.3.3 Menentukan Frekuensi Natural

Frekuensi natural sistem merupakan frekuensi natural bagian pipa dari sistem utama. Untuk pipa lurus termasuk *one degree of freedom* karena perpindahan hanya ditinjau pada sumbu *y*. Melalui persamaan berikut dapat diketahui nilai frekuensi natural:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_{eq}}{M_{eq}}} \quad (3.50)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{980166}{0.098}} = 3162,5 \frac{\text{rad}}{\text{s}} = 503,32 \text{ Hz}$$

Sedangkan *elbow* termasuk ke dalam *two degree of freedom* karena perpindahan ditinjau pada sumbu *x* dan sumbu *y*.

$$\begin{pmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{Bmatrix} + \begin{pmatrix} k & 0 \\ 0 & k \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

$$\det \begin{pmatrix} k - m\omega^2 & 0 \\ 0 & k - m\omega^2 \end{pmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

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

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:

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

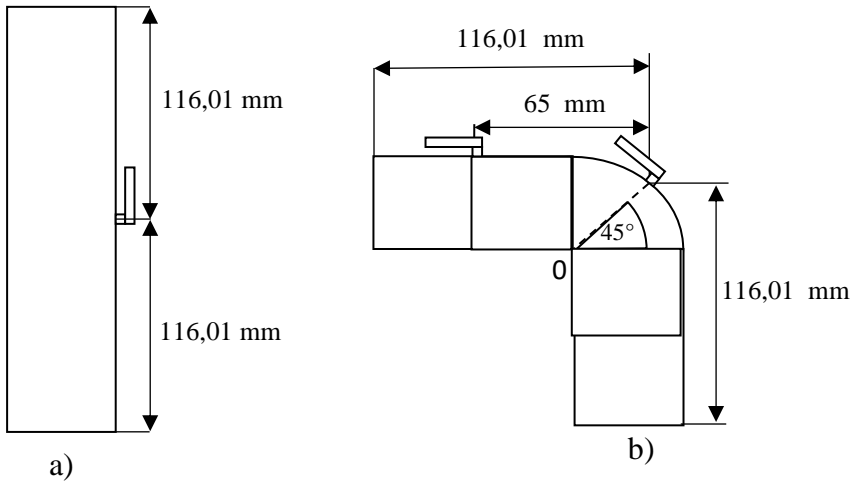
$$\lambda = \frac{k}{m}$$

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

$$\omega_n = \sqrt{\frac{50977.4}{0,1609}} = 562,87 \frac{\text{rad}}{\text{s}} = 89,5 \text{ Hz}$$

3.3.4 Posisi Peletakkan *Piezoelectric* dan Jumlah *Cantilever Piezoelectric*

Pada simulasi ini terdapat 3 variasi letak penempatan *piezoelectric*, yaitu pada pipa *elbow* posisi 1, pipa *elbow* posisi 2, dan pipa lurus. Di masing-masing titik terdapat sebuah *piezoelectric*. Pada pipa lurus titik penempatan *piezoelectric* berada tepat di tengah pipa pada bagian samping seperti yang ditunjukkan oleh gambar 3. 30 (a). Posisi *piezoelectric elbow* berada 45° pada tikungan *elbow* dan juga berada pada *outlet elbow* dengan jarak 65 mm dari posisi *piezoelectric* berada 45° pada tikungan *elbow* seperti ditunjukkan pada gambar 3. 28 (b).



Gambar 3. 30 Tampak atas posisi peletakkan rangkaian *piezoelectric* pada (a) Pipa lurus (b)Pipa *elbow*

Tabel 3. 4 Tabel data hasil simulasi

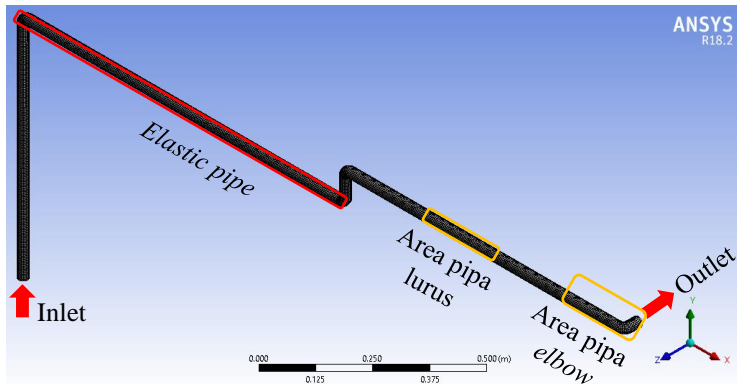
Kecepatan Fluida	Voltase Bangkitan (volt)		
	Posisi Pipa Lurus	Posisi Pipa <i>Elbow Outlet</i>	Posisi Pipa <i>Elbow Bend</i>
0,3 m/s			
0,5 m/s			
0,7 m/s			

BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN

4.1 Simulasi Aliran di Dalam Pipa

4.1.1 Membuat *Meshing* Pipa

Simulasi aliran menggunakan *software* ANSYS Fluent yang merupakan *software finite element*, maka dari itu diperlukan *meshing* dari volume pipa lurus dan pipa *elbow*. Lebih baik dibuat *meshing* pipa dari pompa sampai ke posisi pipa *elbow* yang ditinjau untuk lebih presisi menyimulasikan alirannya, namun geometri yang dibuat akan menjadi besar. Apabila dilakukan metode *meshing* pada geometri pipa dari pompa ke pipa *elbow* yang ditinjau, seperti yang dilakukan pada pembuatan *meshing* pipa lurus dan pipa *elbow*, maka akan membutuhkan memori yang banyak dan butuh waktu simulasi yang sangat lama. Ditampilkan *meshing* tersebut pada gambar 4. 1.

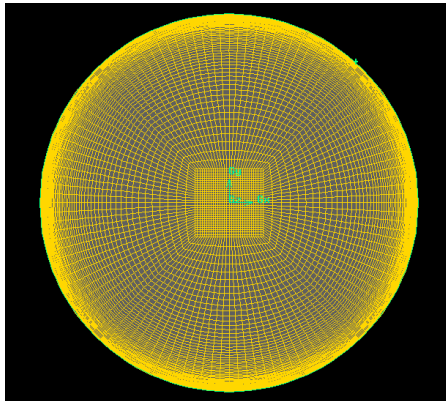


Gambar 4. 1 *Meshing* pipa dari pompa hingga pipa *elbow*

Maka dari itu *meshing* pada gambar 4. 1 hanya digunakan untuk melihat *initial pressure* yang akan dimasukkan pada *meshing* pipa lurus dan pipa *elbow*. Pada *meshing* yang dibuat terdapat tambahan *elastic pipe* menyesuaikan dengan eksperimen yang ada. *Elastic pipe* ini bertujuan untuk meredam getaran yang dihasilkan pompa.

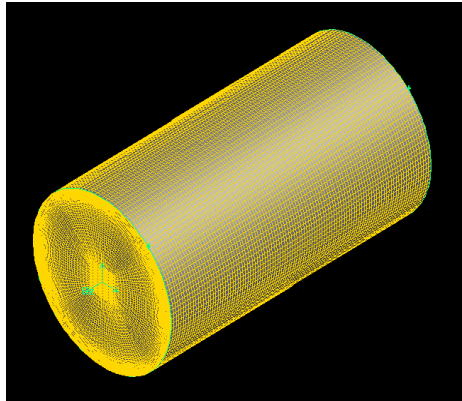
Diasumsikan orientasi *elastic pipe* horizontal dan *roughness constant* pipa ini sama dengan pipa *PVC* untuk mempermudah simulasi. Pada meshing pipa lurus dan pipa elbow memiliki kualitas meshing yang lebih tinggi sehingga simulasi dapat lebih difokuskan pada area yang ditinjau.

Pembuatan *meshing* pipa lurus dan pipa *elbow* menggunakan *software* ANSYS Gambit 2.4.6 agar hasil *meshing* bisa lebih baik. *Meshing* hasil dari *software* ANSYS Gambit dapat dilihat pada gambar 4. 2.

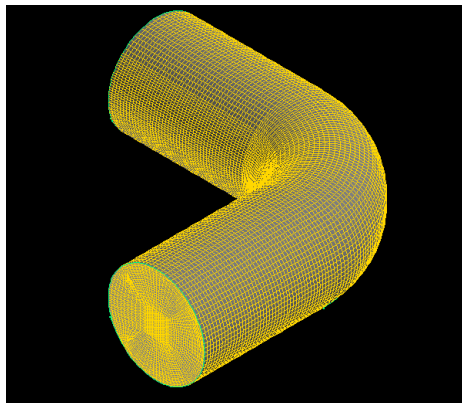


Gambar 4. 2 *Meshing* permukaan pipa

Digunakan teknik menambahkan geometri imajiner berbentuk persegi pada bagian tengah permukaan pipa dengan tujuan meningkatkan kualitas *meshing*. Bagian *meshing* yang berada di dekat dinding memiliki elemen lebih banyak untuk menangkap fenomena yang terjadi pada dinding khususnya *boundary layer*.



Gambar 4. 3 *Meshing* pipa lurus



Gambar 4. 4 *Meshing* pipa elbow

Mesh untuk pipa lurus memiliki 282000 elemen dengan kualitas ortogonal 0,7255 sedangkan *mesh* untuk pipa *elbow* memiliki 976500 elemen dengan kualitas ortogonal 0,7606. Tipe *meshing* yang digunakan adalah tipe hexahedron.

4.1.2 Simulasi ANSYS Fluent

Meshing yang telah dibuat kemudian dijadikan *input* untuk simulasi ANSYS Fluent 18.2. Tipe aliran yang disimulasikan adalah aliran *transient* dengan memperhitungkan pengaruh gravitasi, besar gravitasi adalah $9,81 \text{ m/s}^2$. *Viscous* model yang digunakan adalah k-epsilon model *reliable* dengan *standard wall function*. K-epsilon merupakan model yang paling umum digunakan untuk kasus aliran turbulen. Material yang dimasukkan adalah air dengan densitas 998.2 kg/m^3 dan viskositas sebesar 0.001003 kg/m s . *Boundary condition* terbagi menjadi tiga bagian yaitu: *inlet*, *outlet*, dan *wall*. Pada *inlet* dimasukkan parameter variasi kecepatan, *initial pressure*, *turbulent intensity*, dan *hydraulic diameter*. *Initial pressure* didapatkan dari perhitungan *head* dari spesifikasi pompa yang digunakan untuk sistem perpipaan. *Headloss major* maupun *headloss minor* hasil perhitungan memiliki nilai yang sangat kecil sehingga pengaruhnya dapat diabaikan, sehingga nilai *initial pressure* sama dengan *pressure* yang diberikan oleh pompa. *Total head* maksimal yang diberikan pompa adalah 20 m, dengan persamaan tekanan statis didapatkan sebagai berikut:

$$p = \rho g h \quad (4.1)$$

Keterangan:

p = tekanan (Pa)

ρ = densitas air (kg/m^3)

g = gravitasi (m/s^2)

h = *head* (m)

$$p = 1000 \times 9,81 \times 20$$

$$p = 196200 \text{ Pa}$$

Konstanta pada persamaan tersebut merupakan konstanta yang didapatkan melalui eksperimen untuk mencari tekanan dari *head*. Fluida yang digunakan adalah air sehingga *specific gravity*

bernilai 1. *Turbulent intensity* yang dimasukkan pada simulasi yaitu sebesar 1% yang termasuk *medium-turbulence case* dimana geometri yang dilewati aliran tidak kompleks dan kecepatan fluida tidak terlalu tinggi. *Hydraulic diameter* merupakan diameter *inlet* pipa lurus dan pipa *elbow*. Pada bagian *wall* konstanta kekasaran disesuaikan dengan kekasaran pipa PVC yaitu sebesar 0,0015. Pada bagian *outlet* diatur sebagai *outflow* karena tidak diketahui *properties* pada *outlet* tersebut. *Reference value* dihitung dari inlet, metode penyelesaian yang digunakan adalah metode *SIMPLE second order* untuk memperkecil error. Inisialisasi simulasi menggunakan metode standard. Penentuan jumlah *timestep size*, *number of iteration*, dan *max iteration per timestep* berdasarkan *CFL number* pada kasus *internal flow*. Besar *CFL number* didapatkan dari persamaan:

$$CFL = \frac{v \Delta t}{x} \quad (4.2)$$

Keterangan:

CFL number < 1

v = kecepatan fluida (m/s)

Δt = timestep size (s)

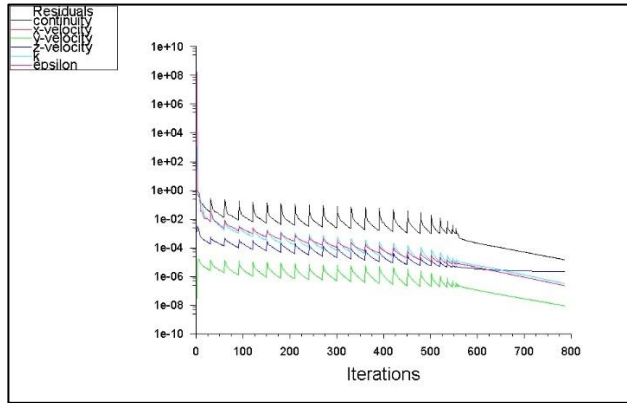
x = panjang elemen mesh terkecil (m)

Dengan menentukan nilai *CFL*, didapatkan *timestep size* untuk simulasi. *Number of timestep* disesuaikan dengan seberapa lama simulasi akan berjalan. Waktu simulasi dapat dirumuskan sebagai:

$$Time = timestep \times number\ of\ timestep \quad (4.3)$$

Melalui persamaan yang telah dijelaskan di atas, untuk simulasi ini membutuhkan *timestep* $2,14 \times 10^{-5}$ s. Simulasi dijalankan selama 5 s, maka dibutuhkan *number of timestep* sebanyak 233644 kali. Dengan angka tersebut membutuhkan waktu yang sangat lama untuk menyelesaikan simulasi. Maka dari itu pada penelitian ini waktu simulasi dipersingkat, dengan metode *trial and error* didapatkan *timestep* dengan nilai lebih rendah

namun hasil dari simulasi Fluent tetap bisa *converged*. Didapatkan *timestep* sebesar 0.02 s dengan *number of iteration* sebanyak 250 kali. Dengan parameter-parameter yang sudah dijelaskan sebelumnya dijalankan simulasi Fluent dengan memperhatikan grafik residual yang ditampilkan:

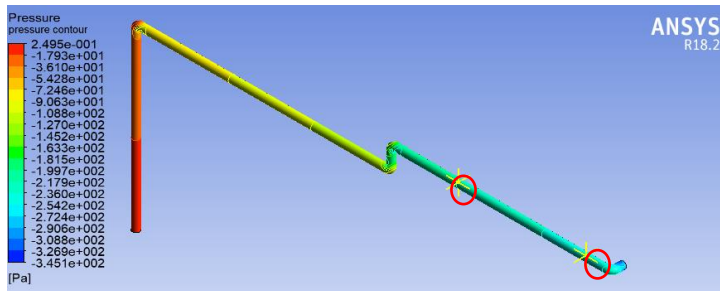


Gambar 4. 5 Contoh grafik residual simulasi pipa lurus kecepatan 0,7 m/s

Dari grafik tersebut dapat dilihat residual error simulasi yang telah dijalankan. Dapat terlihat dari grafik pada awal iterasi terjadi fluktuasi yang berlanjut sampai iterasi ke-550, setelah itu tren grafik terus menurun. Di akhir iterasi error sudah dianggap kecil maka *timestep* yang didapatkan dari hasil *trial and error* dapat digunakan.

4.1.3 Hasil Simulasi ANSYS Fluent

Pertama disimulasikan geometri pipa dari pompa ke pipa *elbow* yang ditinjau. Hasil simulasi *meshing* pada gambar 4. 1 dapat dilihat pada gambar 4. 6.

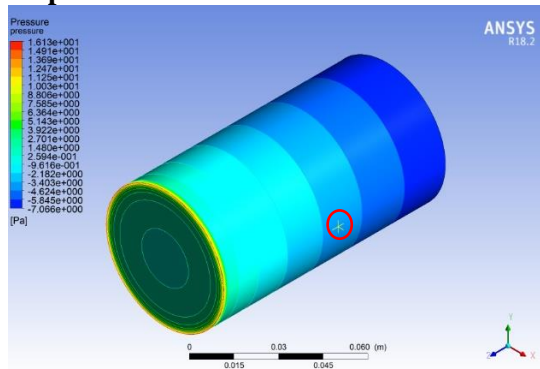


Gambar 4. 6 Hasil simulasi pipa dari pompa hingga pipa *elbow*

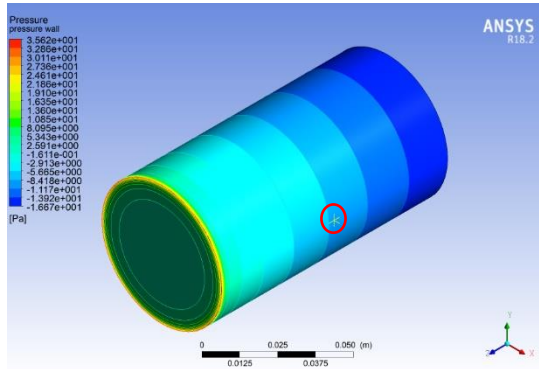
Hasil simulasi berupa *pressure contour* dengan diletakkan 2 titik yang dilingkari menunjukkan *input* dari pipa lurus dan pipa *elbow*. Tekanan hasil simulasi sebesar 195984.4 Pa untuk *input* pipa lurus, sedangkan 195955.2 Pa untuk *input* pipa *elbow*. Terlihat tekanan menurun dari tekanan awal 196200 Pa semakin jauh dari pompa, dikarenakan perbedaan ketinggian pipa, *headloss mayor*, dan *headloss minor*.

Penelitian ini terdapat 2 variasi geometri pipa (lurus dan *elbow*) dengan 3 variasi kecepatan (0,3 ; 0,5 ; 0,7) pada tiap geometri sehingga terdapat 6 hasil simulasi ANSYS Fluent. Gaya berbanding lurus dengan gradien tekanan, maka perlu diperhatikan tekanan yang terjadi pada pipa pada masing-masing kecepatan.

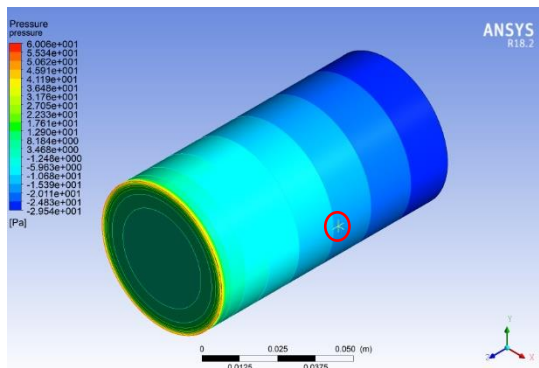
A. Pipa Lurus



(a)



(b)



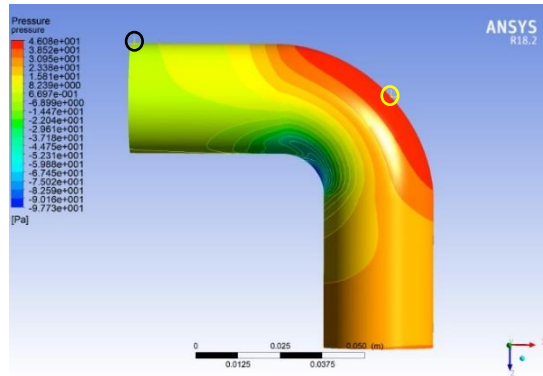
(c)

Gambar 4. 7 *Pressure contour* (a) pipa lurus kecepatan 0,3 m/s (b) pipa lurus kecepatan 0,5 m/s (c) pipa lurus kecepatan 0,7 m/s

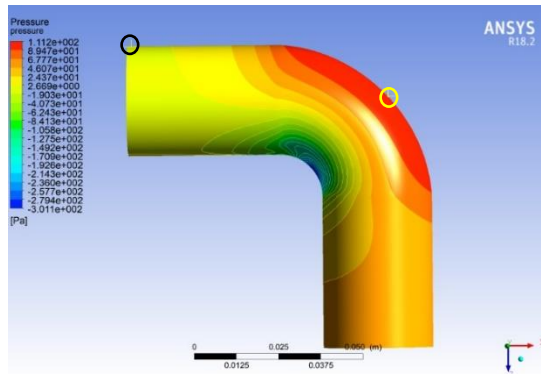
Pada pipa lurus dapat dilihat tren *countour* yang serupa berdasarkan gambar 4. 7, tekanan yang semakin menurun apabila jaraknya semakin jauh dari *inlet* pipa. Penurunan tekanan pada pipa lurus ini disebabkan oleh adanya gaya gesek antara fluida *viscous* dengan dinding pipa disebabkan dinding pipa memiliki konstanta kekasaran. Gaya gesek tersebut menimbulkan *headloss* atau

kehilangan tekanan, *headloss* yang terjadi pada pipa lurus ini merupakan *headloss mayor*. *Headloss mayor* merupakan kehilangan tekanan yang terjadi di sepanjang sistem perpipaan akibat kekasaran pipa.

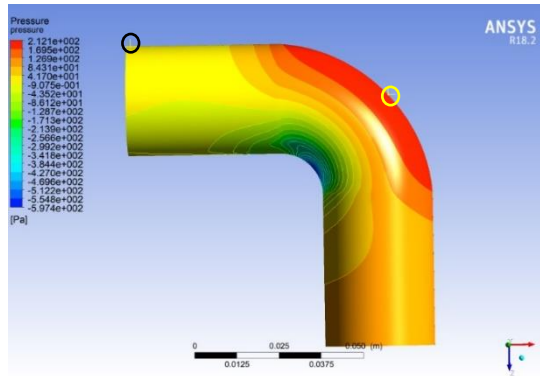
B. Pipa Elbow



(a)



(b)



(c)

Gambar 4. 8 *Pressure contour* (a) pipa *elbow* kecepatan 0,3 m/s
(b) pipa *elbow* kecepatan 0,5 m/s (c) pipa *elbow* kecepatan 0,7 m/s

Dari gambar 4. 8 dapat terlihat pola *contour* yang serupa untuk geometri pipa yang sama. *Contour* pada pipa *elbow* terjadi tekanan paling tinggi pada tikungan yang ditunjukkan oleh warna merah pada gambar, tekanan setelah tikungan kemudian menurun. Faktor utama utama aliran melalui tikungan adalah adanya gradien tekanan radial yang diciptakan oleh gaya sentrifugal yang bekerja pada fluida. Karena itu, fluida di tengah pipa bergerak ke arah luar mendekati dinding dan kembali sepanjang dinding ke arah sisi dalam. Jika kelengkungan tikungan cukup tajam, gradien *adverse pressure* dekat dinding luar pada tikungan dan dinding bagian dalam tepat setelah tikungan dapat menyebabkan separasi aliran pada titik-titik ini akibat *secondary flow*, sehingga menimbulkan peningkatan substansial dalam kehilangan tekanan. Tekanan pada dinding luar mengalami pertumbuhan yang cepat sedangkan tekanan pada dinding bagian dalam mengalami penurunan tajam di bawah tumbukan dari gaya sentrifugal yang dihasilkan dari gerakan melingkar partikel fluida yang diinduksi oleh kelengkungan tikungan pipa. Pada dinding luar, ini disebabkan

oleh kedua gaya sentrifugal dan dampak fluida pada dinding siku karena efek kelengkungan tikungan. Pada dinding bagian dalam, penurunan dan tekanan minimum diinduksi sebagian oleh separasi *boundary-layer*. Setelah daerah ini, tekanan dinding luar mulai berkurang karena efek pantulan partikel fluida dari dinding luar ke dinding dalam. Saat fluida meninggalkan tikungan, alirannya sekarang menjadi tidak teratur lalu fluida akan mulai menstabilkan alirannya.

Lingkaran merah yang terdapat pada gambar 4. 7 merupakan posisi peletakan *piezoelectric* pada pipa lurus, lingkaran hitam pada gambar 4. 8 merupakan posisi peletakan *piezoelectric* pada pipa *elbow outlet*, dan lingkaran kuning pada gambar 4. 8 merupakan posisi peletakan *piezoelectric* pada pipa *elbow bend*. Besar tekanan pada posisi-posisi tersebut hasil simulasi ditunjukkan pada tabel 4. 1:

Tabel 4. 1 Besar tekanan posisi peletakan *piezoelectric* pada tiap variasi kecepatan

Kecepatan	Lurus	<i>Elbow outlet</i>	<i>Elbow bend</i>
0,3 m/s	195980.6 Pa	195955.3 Pa	196001.2 Pa
0,5 m/s	195975.6 Pa	195955.8 Pa	196067.2 Pa
0,7 m/s	195968.9 Pa	195956.0 Pa	196166.9 Pa

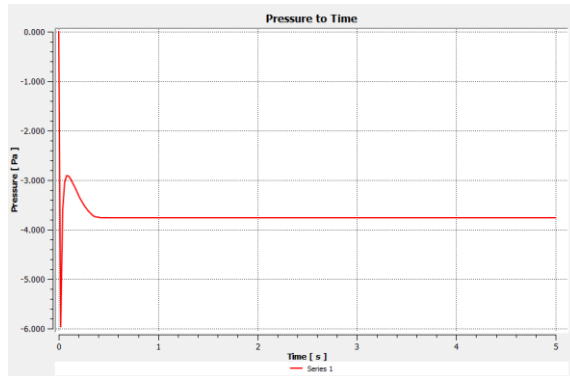
Dari tabel 4. 1 untuk pipa lurus dapat dilihat meningkatnya selisih tekanan seiring dengan bertambahnya kecepatan fluida, yang artinya tekanan pada posisi peletakan pipa lurus semakin kecil dengan bertambahnya kecepatan fluida. Fenomena ini sesuai dengan adanya *headloss mayor* yang nilainya semakin besar apabila kecepatannya semakin besar. Untuk pipa *elbow* tekanan terbesar terjadi pada posisi *elbow bend*. Hal ini diakibatkan oleh geometri *elbow* seperti pada penjelasan sebelumnya.

Output utama dari simulasi Fluent ini adalah mencari gaya eksitasi yang diakibatkan aliran air di dalam pipa. Gaya tersebut ditunjukkan oleh tabel 4. 2 sebagai berikut:

Tabel 4. 2 Besar gaya pada posisi peletakan *piezoelectric* pada tiap variasi kecepatan

Kecepatan	Lurus	<i>Elbow outlet</i>	<i>Elbow bend</i>		
	F _x (N)	F _y (N)	F _x (N)	F _y (N)	$F_s (N)$ $= \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$
0,3 m/s	0.2876	0.2498	0.2460	0.2267	0.3345
0,5 m/s	0.2905	0.2522	0.2484	0.2289	0.3378
0,7 m/s	0.3164	0.2747	0.2704	0.2491	0.3676

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, gradien tekanan berbanding lurus terhadap gaya. Maka dari itu dapat, terlihat semakin besar gradien tekanan pada salah satu posisi peletakan maka akan semakin besar pula gayanya. Gaya ini didapatkan dari *cell "Result"* pada sistem *Fluid flow* yang ditunjukkan pada gambar 3. 5. *Result* ini disebut juga dengan *post-processing* dari simulasi *Fluent* yang telah dilakukan. Ada beberapa *properties* aliran yang dapat diketahui melalui *post-processing* ini dengan cara *export* data yang dikehendaki. Dikarenakan gaya yang dimanfaatkan oleh *cantilever piezoelectric* adalah gaya yang terjadi pada dinding pipa, maka lokasi *export* data dipilih pada dinding pipa atau *wall*. *Export* data gaya akan berupa format *excel* yang memuat besar gaya pada tiap koordinat suatu geometri, seperti ditunjukkan pada gambar 14 di lampiran. Hanya dicontohkan satu *file excel* gaya dikarenakan satu *file* data saja bisa memuat ratusan ribu data gaya. Kemudian disesuaikan koordinat titik seperti yang telah ditunjukkan pada paragraf sebelumnya untuk mengetahui gaya pada titik tersebut.



Gambar 4. 9 Grafik tekanan terhadap waktu di titik peletakan pada posisi pipa lurus kecepatan 0,3 m/s

Pemodelan aliran *transient* awalnya bertujuan untuk melihat fluktuasi gaya eksitasi dari pipa. Namun berdasarkan gambar 4. 9, dapat dilihat fluktuasi tekanan hanya terjadi pada waktu yang sangat singkat yaitu selama 0,4 sekon dari total waktu simulasi selama 5 sekon. Setelah waktu 0,4 sekon tekanan cenderung bernilai konstan, begitu pula *properties* gaya akan memiliki tren yang sama dengan tekanan. Maka dari itu gaya eksitasi diasumsikan sinusoidal dengan persamaan:

$$F = f \sin w t$$

Keterangan:

F = Gaya yang dimasukkan untuk simulasi Simulink (N)

f = Gaya hasil dari simulasi Fluent (N)

w = Frekuensi operasi sistem utama (rad/s)

t = Waktu (s)

Besarnya frekuensi operasi sistem utama dicocokkan dengan frekuensi eksperimen yang ada. Dimana nilainya didapatkan melalui pengambilan data pada sistem utama secara actual.

4.2 Pembuatan Blok Simulasi

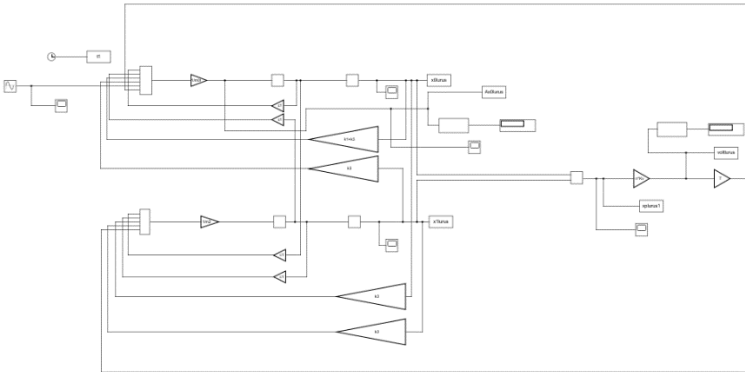
Dalam penelitian simulasi ini, diperlukan suatu persamaan yang berbentuk *state variable* yang kemudian diubah menjadi blok diagram simulasi. Dari blok diagram simulasi tersebut akan didapatkan voltase bangkitan. *Input* simulasi Simulink diasumsikan berupa sinusoidal.

4.2.1 Block Diagram Posisi pada Pipa Lurus

Dari persamaan gerak yang telah dirumuskan sebelumnya pada subbab 3.2.6.2 poin A maka dibuat persamaan berbentuk *state variable* sebagai berikut:

$$\ddot{x}_0 = \frac{1}{m_0} [-c_1 \dot{x}_0 + c_1 \dot{x}_1 - (k_0 + k_1 + n\Gamma k_v)x_0 + (k_1 + n\Gamma k_v)x_1 + F_x]$$

$$\ddot{x}_1 = \frac{1}{m_1} [c_1 \dot{x}_0 - c_1 \dot{x}_1 + (k_1 + n\Gamma k_v)x_0 - (k_1 + n\Gamma k_v)x_1]$$



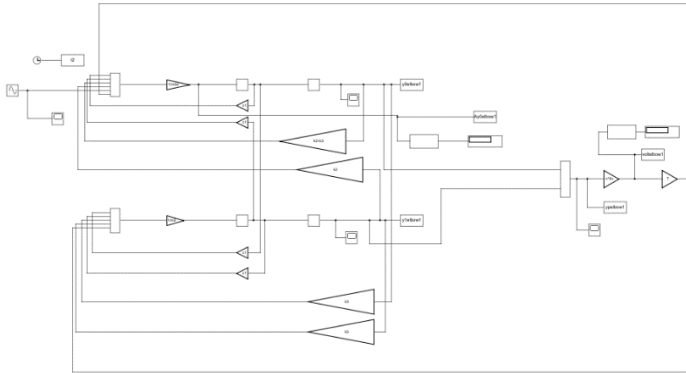
Gambar 4. 10 Block diagram energy harvesting posisi pipa lurus

4.2.2 Block Diagram Posisi pada Pipa Elbow Outlet

Dari persamaan gerak yang telah dirumuskan sebelumnya pada subbab 3.2.6.2 poin B maka dibuat persamaan berbentuk *state variable* sebagai berikut:

$$\ddot{y}_0 = \frac{1}{m_0} [-c_1 \dot{y}_0 + c_1 \dot{y}_1 - (k_0 + k_1 + n\Gamma k_v) y_0 + (k_1 + n\Gamma k_v) y_1 + F_y]$$

$$\ddot{y}_1 = \frac{1}{m_1} [c_1 \dot{y}_0 - c_1 \dot{y}_1 + (k_1 + n\Gamma k_v) y_0 - (k_1 + n\Gamma k_v) y_1]$$



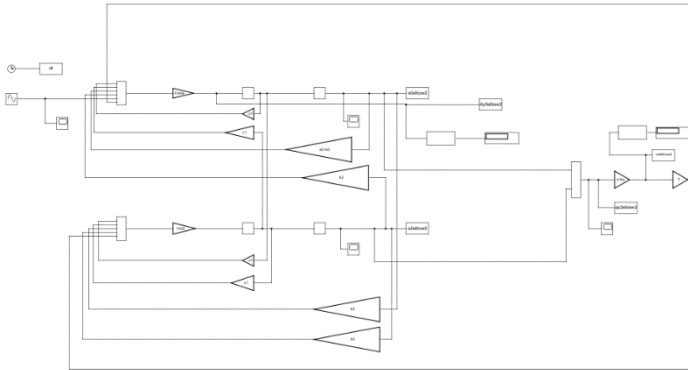
Gambar 4. 11 *Block diagram* energy harvesting posisi pipa elbow keluaran

4.2.3 *Block Diagram* Posisi pada Pipa Elbow Bend

Dari persamaan gerak yang telah dirumuskan sebelumnya pada subbab 3.2.6.2 poin C maka dibuat persamaan berbentuk *state variable* sebagai berikut:

$$\ddot{s}_0 = \frac{1}{m_0} [-c_1 \dot{s}_0 + c_1 \dot{s}_1 - (k_0 + k_1 + n\Gamma k_v) s_0 + (k_1 + n\Gamma k_v) s_1 + F_s]$$

$$\ddot{s}_1 = \frac{1}{m_1} [c_1 \dot{s}_0 - c_1 \dot{s}_1 + (k_1 + n\Gamma k_v) s_0 - (k_1 + n\Gamma k_v) s_1]$$

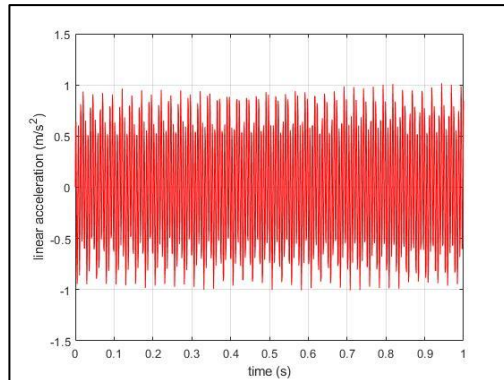


Gambar 4. 12 Block diagram energy harvesting posisi pipa elbow tikungan

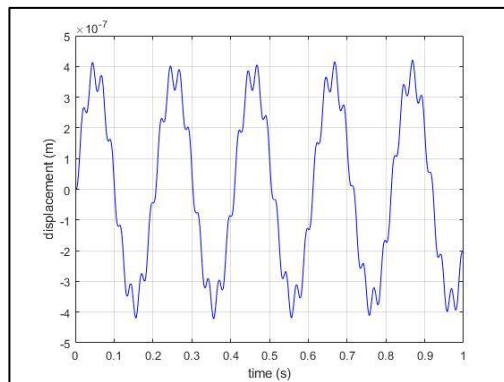
4.3 Analisa Respon dan Voltase Bangkitan dengan Variasi Kecepatan pada Setiap Posisi

Dari *block diagram* yang telah disusun, diperoleh grafik respon berupa respon percepatan pipa, respon perpindahan *piezoelectric*, dan voltase bangkitan. Respon akselerasi pipa diperlukan untuk mengetahui getaran dari pipa. Respon perpindahan dari *piezoelectric* diperlukan karena voltase bangkitan tergantung pada perpindahan *piezoelectric* seperti pada persamaan (3.14).

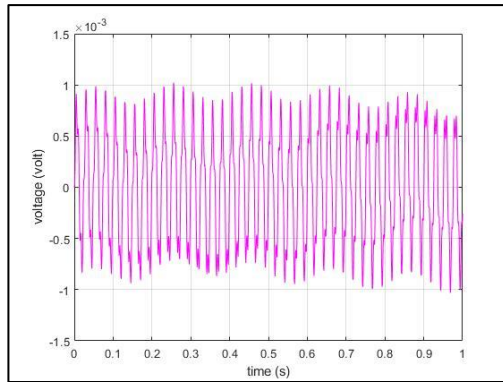
4.3.1 Analisa Respon dan Voltase Bangkitan Pada Pipa Lurus



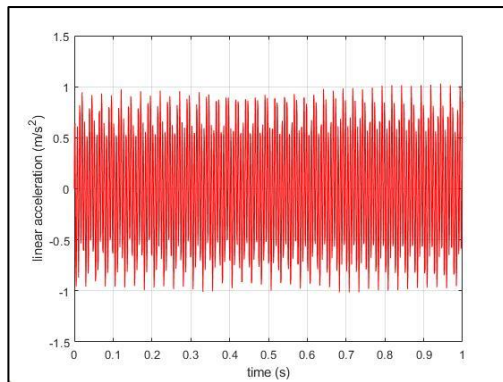
Gambar 4. 13 Respon percepatan pipa lurus pada kecepatan 0,3 m/s



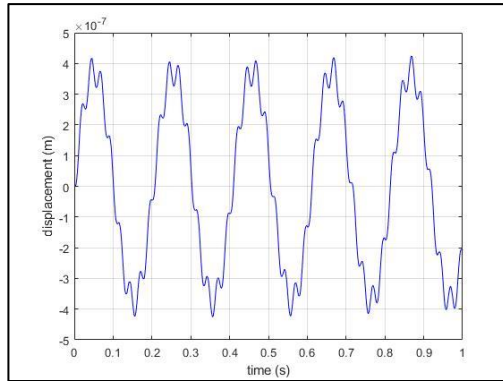
Gambar 4. 14 Respon perpindahan *piezoelectric* posisi pipa lurus pada kecepatan 0,3 m/s



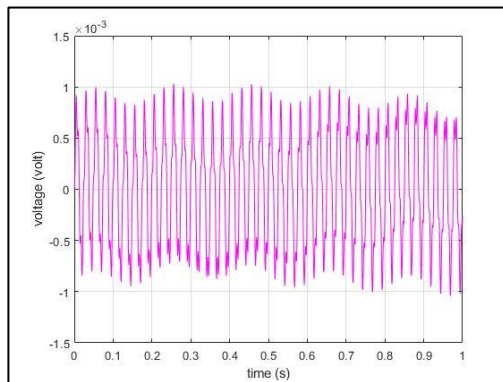
Gambar 4. 15 Voltase pipa lurus pada kecepatan 0,3 m/s



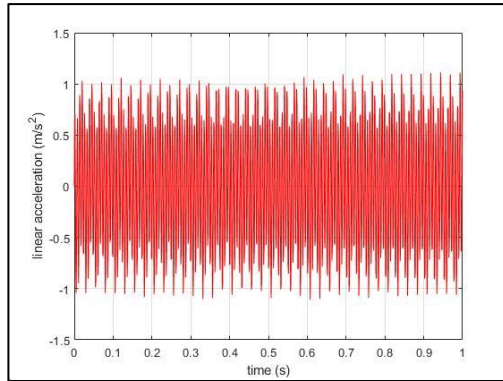
Gambar 4. 16 Respon percepatan pipa lurus pada kecepatan 0,5 m/s



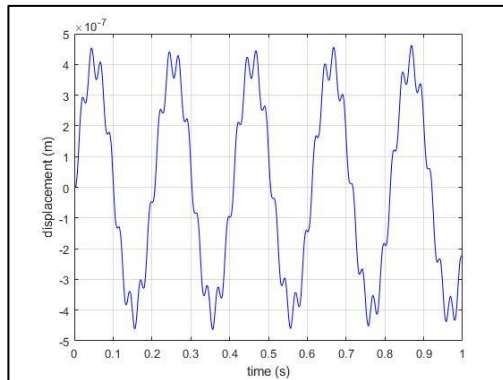
Gambar 4. 17 Respon perpindahan *piezoelectric* posisi pipa lurus pada kecepatan 0,5 m/s



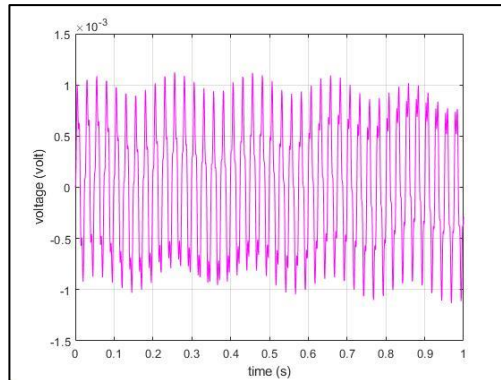
Gambar 4. 18 Voltase pipa lurus pada kecepatan 0,5 m/s



Gambar 4. 19 Respon percepatan pipa lurus pada kecepatan 0,7 m/s



Gambar 4. 20 Respon perpindahan *piezoelectric* posisi pipa lurus pada kecepatan 0,7 m/s

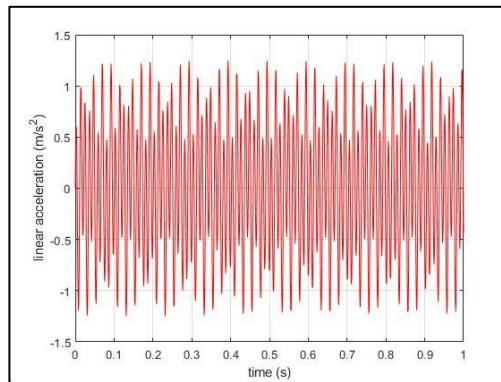


Gambar 4. 21 Voltase pipa lurus pada kecepatan 0,7 m/s

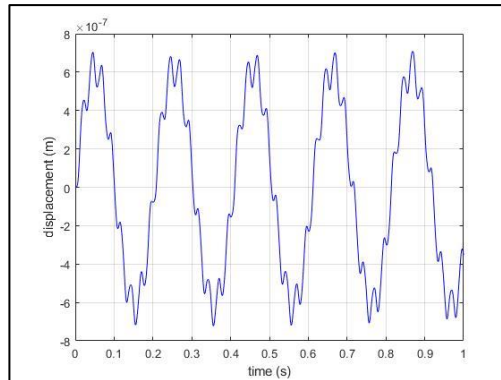
Gambar 4. 13, gambar 4. 16, dan gambar 4. 19 menunjukkan respon percepatan berbentuk sinusoidal sesuai dengan *input* yang diberikan, namun dikarenakan frekuensi operasi yang besar tren sinusoidal kurang dapat terlihat. Bentuk grafik respon percepatan pada masing-masing variasi kecepatan bila diperhatikan secara seksama terdapat perbedaan pada puncaknya. Nilai RMS respon percepatan dari gambar 4. 13, gambar 4. 16, gambar 4. 19 secara berturut-turut adalah: 0.5882 m/s^2 , 0.5940 m/s^2 , dan 0.6468 m/s^2 . Hal ini sesuai dengan teori yang ada dimana semakin tinggi kecepatan fluida yang mengalir di dalam pipa maka akan semakin tinggi pula respon percepatannya. Gambar 4. 14, gambar 4. 17, dan gambar 4. 20 menunjukkan respon perpindahan *piezoelectric*. Grafik berdasarkan gambar tersebut menunjukkan perpindahan secara sinusoidal. Garis yang membentuk grafik terlihat tidak mulus dimana pada puncak terjadi beberapa fluktuasi nilai. Nilai RMS respon perpindahan dari gambar 4. 14, gambar 4. 17, gambar 4. 20 secara berturut-turut adalah: $0,267 \mu\text{m}$, $0,270 \mu\text{m}$, dan $0,294 \mu\text{m}$. Gaya eksitasi yang sudah kecil kemudian teredam oleh kekakuan pipa lurus, ini mengakibatkan kecilnya perpindahan atau defleksi dari *piezoelectric* tersebut. Kemudian berdasarkan gambar 4. 15, gambar 4. 18, dan gambar 4. 21, grafik voltase

bangkitan juga berupa grafik sinusoidal sesuai dengan input yang diberikan, tanda minus menunjukkan voltase yang mengalir merupakan tipe AC (*Alternating Current*) atau arus bolak-balik. Pada tiap grafik secara tren juga memiliki bentuk yang sama dan terdapat perbedaan tinggi puncak pula. Perbedaan ketinggian ini dikarenakan nilai voltase yang dibangkitkan berbeda seiring bertambahnya kecepatan meski selisih perbedaannya kecil. Nilai RMS voltase bangkitan dari gambar 4. 15, gambar 4. 18, gambar 4. 21 secara berturut-turut adalah: 0.000557 volt, 0.000562 volt, dan 0.000612 volt. Waktu yang ditampilkan pada grafik respon percepatan dan voltase bangkitan adalah selama 1 sekon dengan tujuan agar osilasi dapat terlihat. Apabila waktu diperpanjang maka akan sulit terlihat osilasinya dikarenakan frekuensi operasi yang tinggi.

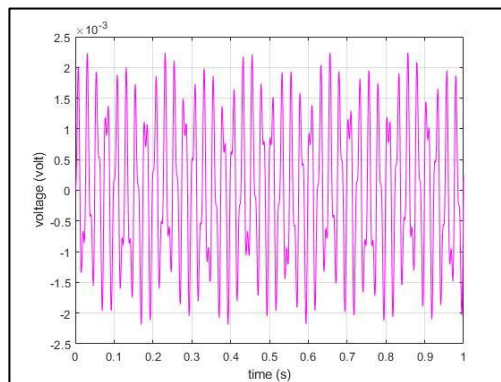
4.3.2 Analisa Voltase Bangkitan Pada Pipa *Elbow outlet*



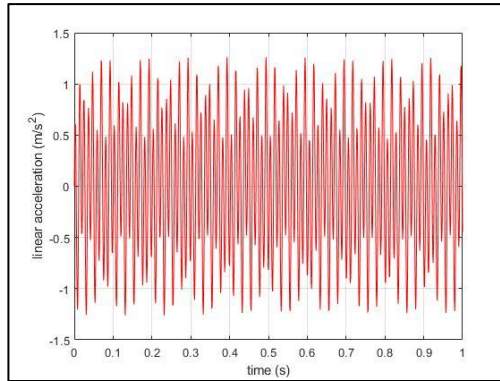
Gambar 4. 22 Respon percepatan pipa *elbow outlet* pada kecepatan 0,3 m/s



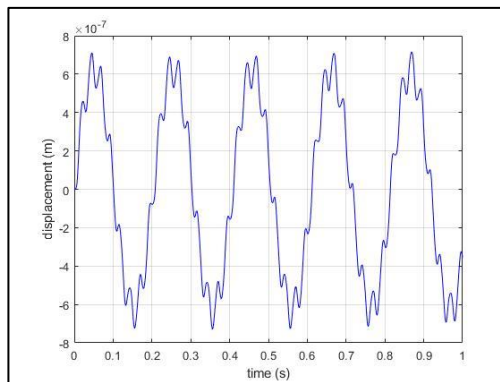
Gambar 4. 23 Respon perpindahan *piezoelectric* posisi pipa *elbow outlet* pada kecepatan 0,3 m/s



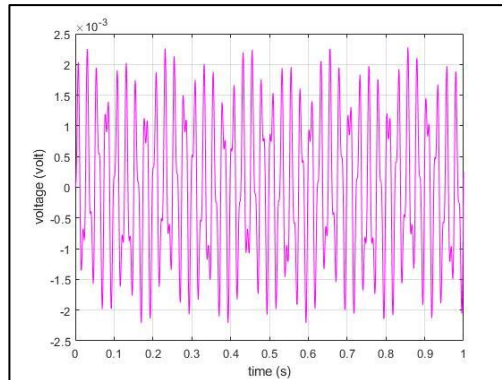
Gambar 4. 24 Voltase pipa *elbow outlet* pada kecepatan 0,3 m/s



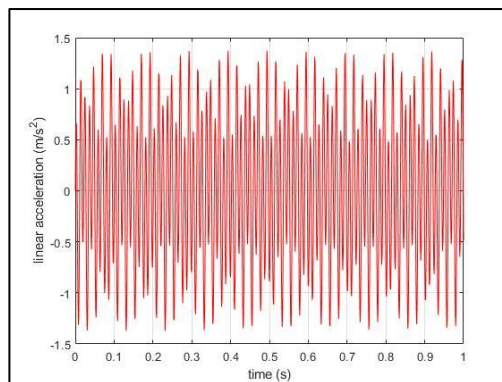
Gambar 4. 25 Respon percepatan pipa *elbow outlet* pada kecepatan 0,5 m/s



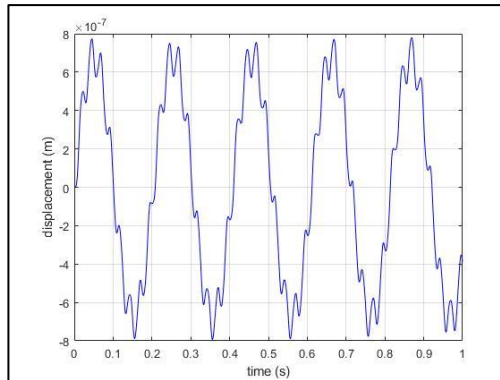
Gambar 4. 26 Respon perpindahan *piezoelectric* posisi pipa *elbow outlet* pada kecepatan 0,5 m/s



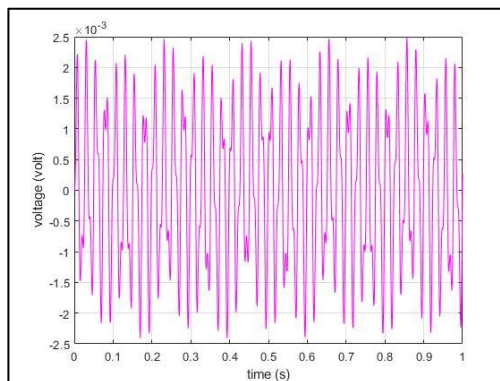
Gambar 4. 27 Voltase pipa *elbow outlet* pada kecepatan 0,5 m/s



Gambar 4. 28 Respon percepatan pipa *elbow outlet* pada kecepatan 0,7 m/s



Gambar 4. 29 Respon perpindahan *piezoelectric* posisi pipa *elbow outlet* pada kecepatan 0,7 m/s

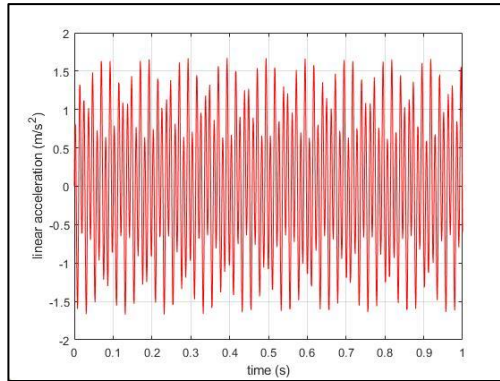


Gambar 4. 30 Voltase pipa *elbow outlet* pada kecepatan 0,7 m/s

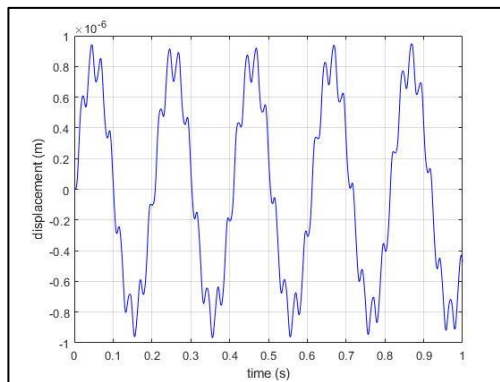
Gambar 4. 22, gambar 4. 25, gambar 4. 28 menunjukkan respon percepatan yang juga berbentuk sinusoidal karena bentuk *input* yang diberikan sama, frekuensi operasi yang dimasukkan bernilai sama. Grafik respon percepatan memiliki tren yang sama dengan perbedaan tinggi pada puncak masing-masing grafik. Nilai RMS respon percepatan dari gambar 4. 22, gambar 4. 25, gambar 4. 28 secara berturut-turut adalah: 0.6680 m/s^2 , 0.6745 m/s^2 , dan

0.7346 m/s². Gambar 4. 23, gambar 4. 26, dan gambar 4. 29 menunjukkan respon perpindahan *piezoelectric*. Nilai RMS respon perpindahan dari gambar 4. 23, gambar 4. 26, gambar 4. 29 secara berturut-turut adalah: 0,448 μm , 0,452 μm , dan 0,493 μm . Grafik berdasarkan gambar tersebut menunjukkan perpindahan secara sinusoidal. Garis yang membentuk grafik terlihat tidak mulus sama seperti pada posisi pipa lurus, dimana pada puncak juga terjadi beberapa fluktuasi nilai. Kemudian berdasarkan gambar 4. 24, gambar 4. 27, gambar 4. 30, grafik voltase bangkitan juga berupa grafik sinusoidal sesuai dengan *input*. Tanda minus menunjukkan voltase yang mengalir merupakan tipe AC (*Alternating Current*) atau arus bolak-balik. Tren grafik pada voltase bangkitan pada posisi pipa *elbow outlet* memiliki tren yang berbeda dengan posisi pipa lurus, dimana osilasi lebih tidak teratur. Hal ini disebabkan karena frekuensi natural pipa *elbow* lebih rendah dibanding pipa lurus, yaitu pada 89,5 Hz. Lebih dekatnya frekuensi natural pipa *elbow* dengan frekuensi operasi menyebabkan getaran yang lebih tinggi dan osilasi yang lebih tidak teratur. Perbedaan antara grafik tersebut lebih sulit dilihat perbedaannya, namun dari nilai RMS grafik-grafik dapat dilihat selisih nilainya. Nilai RMS voltase bangkitan dari gambar 4. 24, gambar 4. 27, gambar 4. 30 secara berturut-turut adalah: 0.001145 volt, 0.001156 volt, dan 0.001260 volt.

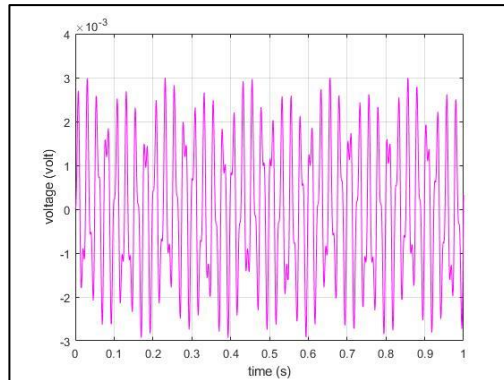
4.3.3 Analisa Voltase Bangkitan Pada Pipa *Elbow Bend*



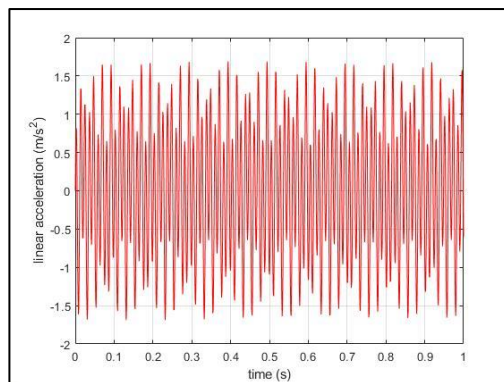
Gambar 4. 31 Respon percepatan pipa *elbow bend* pada kecepatan 0,3 m/s



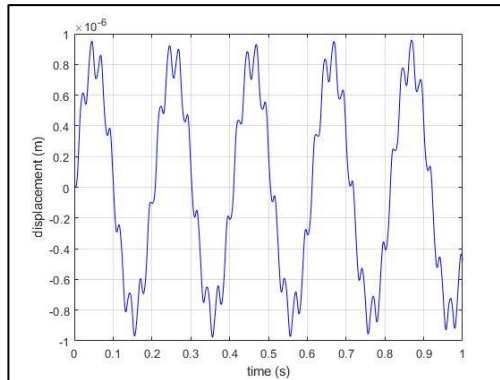
Gambar 4. 32 Respon percepatan pipa *elbow bend* pada kecepatan 0,7 m/s



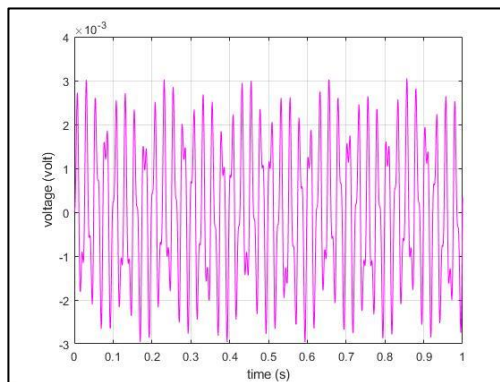
Gambar 4. 33 Voltase pipa *elbow bend* pada kecepatan 0,3 m/s



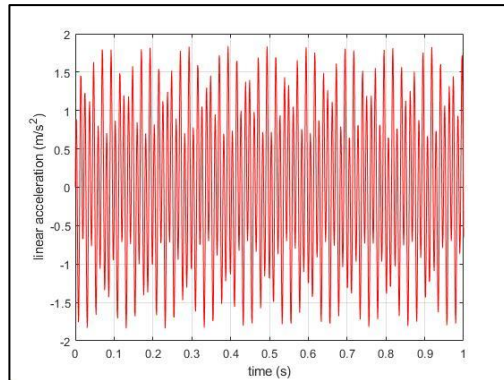
Gambar 4. 34 Respon percepatan pipa *elbow bend* pada kecepatan 0,5 m/s



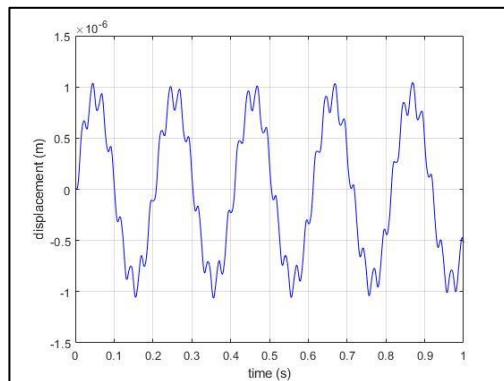
Gambar 4. 35 Respon percepatan pipa *elbow bend* pada kecepatan 0,5 m/s



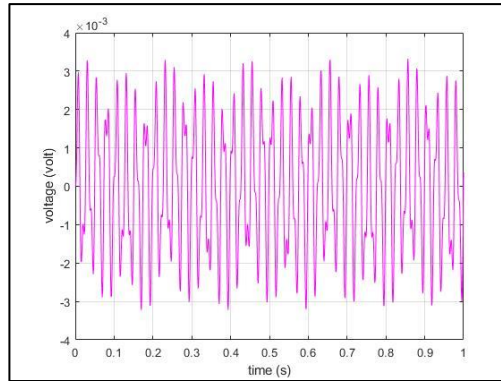
Gambar 4. 36 Voltase pipa *elbow bend* pada kecepatan 0,5 m/s



Gambar 4. 37 Respon percepatan pipa *elbow bend* pada kecepatan 0,7 m/s



Gambar 4. 38 Respon percepatan pipa *elbow bend* pada kecepatan 0,7 m/s



Gambar 4. 39 Voltase pipa *elbow bend* pada kecepatan 0,7 m/s

Gambar 4. 31, gambar 4. 34, gambar 4. 37 menunjukkan respon percepatan yang juga berbentuk sinusoidal karena bentuk *input* yang diberikan sama, frekuensi operasi yang dimasukkan bernilai sama, pada posisi *elbow bend* gaya eksitasi yang dimasukkan paling besar. Grafik respon percepatan memiliki tren yang sama dengan grafik respon percepatan pada posisi *elbow outlet* karena memiliki nilai massa dan kekakuan yang sama. Tren grafik pada masing-masing variasi kecepatan terlihat sama dengan tinggi puncak yang berbeda. Nilai RMS respon percepatan dari gambar 4. 31, gambar 4. 34, gambar 4. 37 secara berturut-turut adalah: 0.8947 m/s^2 , 0.9034 m/s^2 , dan 0.9831 m/s^2 . Gambar 4. 32, gambar 4. 35, dan gambar 4. 38 menunjukkan respon perpindahan *piezoelectric*. Nilai RMS respon perpindahan dari gambar 4. 32, gambar 4. 35, gambar 4. 38 secara berturut-turut adalah: $0,6 \mu\text{m}$, $0,606 \mu\text{m}$, dan $0,659 \mu\text{m}$. Grafik berdasarkan gambar tersebut menunjukkan perpindahan secara sinusoidal. Grafik yang terbentuk pada posisi ini juga berupa sinusoidal dan pada puncak juga terjadi beberapa fluktuasi nilai seperti pada dua posisi sebelumnya. Kemudian berdasarkan gambar 4. 33, gambar 4. 36, gambar 4. 39, grafik voltase bangkitan berupa grafik sinusoidal sesuai dengan input yang diberikan, tanda minus menunjukkan

voltase yang mengalir merupakan tipe AC (*Alternating Current*) atau arus bolak-balik. Tren grafik sama dengan grafik voltase pada posisi pipa *elbow outlet* karena perbedaan hanya terdapat pada *input* gaya eksitasi. Pada grafik dapat terlihat puncak yang berbeda-beda ketinggiannya, semakin tinggi kecepatannya maka puncak voltase akan semakin tinggi. Nilai RMS voltase bangkitan dari gambar 4. 33, gambar 4. 36, gambar 4. 39 secara berturut-turut adalah: 0.001534 volt, 0.001549 volt, dan 0.001686 volt.

Tabel 4. 3 Nilai RMS respon percepatan variasi kecepatan aliran dan posisi peletakan *piezoelectric*

Kecepatan (m/s)	Respon Akselerasi (m/s ²)		
	Posisi Pipa Lurus	Posisi Pipa <i>Elbow Outlet</i>	Posisi Pipa <i>Elbow Bend</i>
0,3	0.5882	0.6680	0.8947
0,5	0.5940	0.6745	0.9034
0,7	0.6468	0.7346	0.9831

Tabel 4. 4 Nilai RMS respon perpindahan *piezoelectric* variasi kecepatan aliran dan posisi peletakan *piezoelectric*

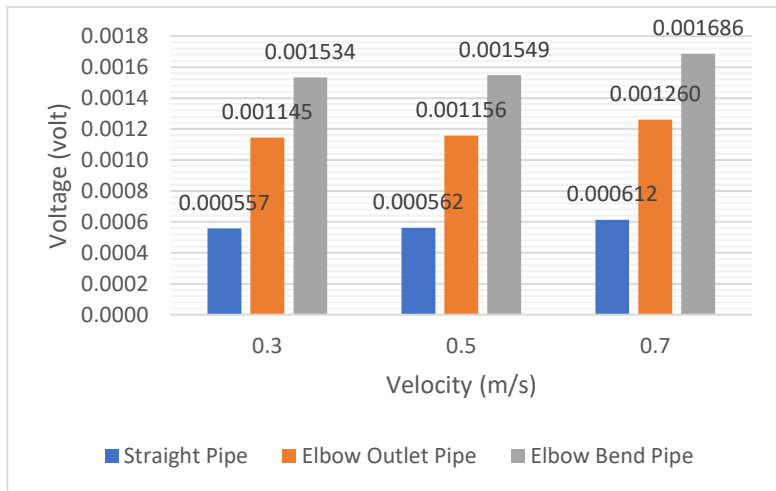
Kecepatan (m/s)	Respon Akselerasi (m)		
	Posisi Pipa Lurus	Posisi Pipa <i>Elbow Outlet</i>	Posisi Pipa <i>Elbow Bend</i>
0,3	2.67E-07	4.48E-07	6.00E-07
0,5	2.70E-07	4.52E-07	6.06E-07
0,7	2.94E-07	4.93E-07	6.59E-07

Tabel 4. 5 Nilai RMS voltase bangkitan variasi kecepatan aliran dan posisi peletakan *piezoelectric*

Kecepatan (m/s)	Voltase Bangkitan (volt)		
	Posisi Pipa Lurus	Posisi Pipa <i>Elbow Outlet</i>	Posisi Pipa <i>Elbow Bend</i>
0,3	5.57E-04	11.45E-04	15.34E-04
0,5	5.62E-04	11.56E-04	15.49E-04
0,7	6.12E-04	12.59E-04	16.86E-04

4.4 Analisa Pengaruh Kecepatan Fluida dan Posisi Peletakan *Piezoelectric*

Dari grafik voltase yang didapatkan pada sub-bab 4. 3 untuk masing-masing variasi, dapat dibuat sebuah grafik yang menunjukkan pengaruh dari variasi kecepatan fluida dan juga variasi posisi peletakan *piezoelectric*.



Gambar 4. 40 Grafik perbandingan pengaruh variasi kecepatan fluida dan posisi peletakan *piezoelectric* hasil simulasi

Dari gambar 4. 40 tersebut dapat terlihat bahwa voltase bangkitan pada posisi pipa *elbow bend* paling tinggi dibandingkan posisi yang lain. Hal ini dikarenakan gaya eksitasi pada posisi tersebut paling besar karena hasil resultan dari dua buah vektor gaya, sehingga gaya yang diberikan kepada *piezoelectric* juga menjadi lebih besar. Pada pipa *elbow outlet*, meskipun gaya eksitasinya lebih kecil dibanding gaya eksitasi pada pipa lurus, namun berdasarkan tabel 4. 5 voltase bangkitan pada pipa *elbow outlet* lebih besar dibanding pada posisi pipa lurus. Pipa lurus memiliki kekakuan yang lebih tinggi dibanding pipa *elbow*,

sehingga dengan gaya eksitasi yang lebih rendah dapat menghasilkan voltase bangkitan yang lebih tinggi. Untuk pengaruh kecepatan, semakin cepat fluida yang mengalir maka akan semakin tinggi pula voltase yang dibangkitkan. Pada gambar 4. 40, kenaikan kecepatan fluida dari 0,3 m/s ke 0,5 m/s terlihat kecil selisih voltase bangkitannya. Pada sub-bab sebelumnya dapat terlihat baik selisih respon percepatan maupun perpindahan *piezoelectric* memang kecil pada perbandingan kedua kecepatan tersebut. Namun apabila dibandingkan kecepatan 0,5 m/s dengan kecepatan 0,7 m/s, selisih voltase bangkitannya lebih besar. Sesuai apabila dilihat respon percepatan dan respon perpindahan *piezoelectricnya*, sehingga pengaruh kecepatan dapat lebih terlihat. Dengan bertambahnya kecepatan fluida maka akan semakin banyak massa yang melewati suatu luasan di dalam pipa dalam satu waktu. Banyaknya massa yang melalui pipa ini dapat menyebabkan bertambahnya gaya eksitasi yang diberikan oleh getaran pipa. Faktor lain adalah *pressure gradient force*, dimana semakin tinggi kecepatan fluida maka akan semakin tinggi perbedaan tekanannya, sehingga gaya yang ditumbulkan akan semakin besar.

4.5 Analisa validasi dengan Hasil Eksperimen

Untuk mengetahui ketepatan dari hasil simulasi yang telah dilakukan, perlu adanya validasi dengan membandingkan nilai voltase bangkitan hasil simulasi dengan voltase bangkitan hasil eksperimen. Data voltase hasil eksperimen adalah sebagai berikut:

Tabel 4. 6 Nilai RMS voltase bangkitan sistem *piezoelectric* variasi debit aliran dan peletakkan *piezoelectric* hasil eksperimen

Variasi Kecepatan Fluida (liter/menit)	Tegangan Bangkitan (Volt)		
	Pipa Lurus	Elbow Posisi 1	Elbow Posisi 2
15	1.53E-04	4.41E-04	7.41E-04
25	1.78E-04	4.58E-04	8.39E-04
35	2.26E-04	4.76E-04	8.49E-04

Mengitung error dari hasil kedua RMS voltase menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\text{Error RMS voltase bangkitan} = \left(\frac{\text{Hasil simulasi} - \text{Hasil eksperimen}}{\text{Hasil simulasi}} \right) \times 100\% \quad (4.3)$$

Contoh perhitungan error voltase bangkitan pada posisi pipa lurus kecepatan 0,3 m/s (15 liter/menit):

$$\begin{aligned} \text{Error RMS voltase bangkitan} \\ = \left(\frac{5,57 \times 10^{-4} - 1,53 \times 10^{-4}}{5,57 \times 10^{-4}} \right) \times 100\% \end{aligned}$$

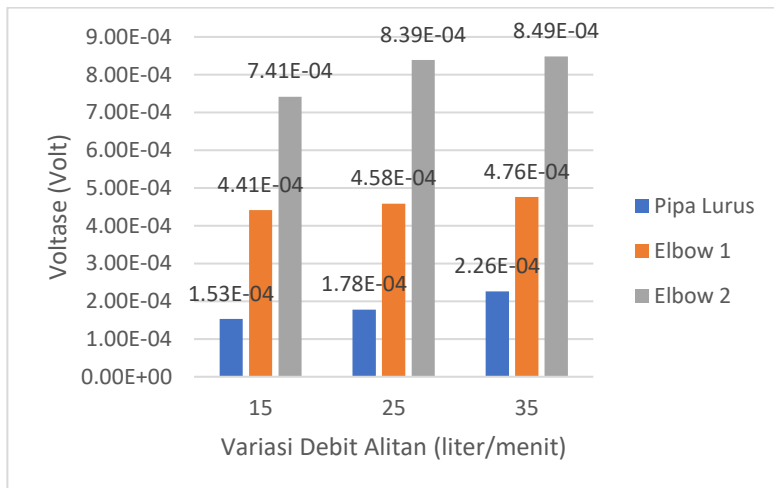
$$\text{Error RMS voltase bangkitan} = 72,51 \%$$

Dengan cara yang sama, dihitung error voltase bangkitan untuk data variasi yang lain:

Tabel 4. 7 Error nilai RMS voltase bangkitan

Kecepatan (m/s)	Error Voltase Bangkitan (%)		
	Pipa Lurus	Pipa <i>Elbow Outlet</i>	Pipa <i>Elbow Bend</i>
0.3	72.51	61.49	51.69
0.5	68.34	60.39	45.83
0.7	63.09	62.22	49.64

Tabel 4. 7 menunjukkan error data voltase bangkitan yang tinggi, dengan error tertinggi pada angka 72,51 %. Meskipun error RMS voltasenya tinggi, tren grafik yang didapatkan pada eksperimen sama seperti tren grafik pada simulasi. Grafik perbandingan pengaruh variasi kecepatan fluida dan posisi peletakan *piezoelectric* hasil eksperimen ditampilkan pada gambar 4. 41 sebagai berikut:



Gambar 4. 41 Grafik perbandingan pengaruh variasi kecepatan fluida dan posisi peletakan *piezoelectric* hasil eksperimen

Dapat dilihat pada gambar 4. 41 tren grafik hasil simulasi dengan eksperimen sudah sesuai dimana voltase bangkitan tertinggi dihasilkan pada posisi pipa *elbow bend* sedangkan voltase bangkitan terendah dihasilkan pada posisi pipa lurus. Semakin tinggi debit atau kecepatan fluida maka voltase bangkitan juga akan semakin besar meskipun perbedaannya kecil.

Error yang tinggi ini dapat disebabkan oleh berbagai faktor, contoh faktornya sebagai berikut:

- Adanya parameter yang berpengaruh yang tidak diikuti di dalam simulasi.
- Simplifikasi geometri *elbow* yang disimulasikan.
- Kesalahan pembacaan alat pada eksperimen.
- Adanya *noise* pada saat pengambilan data eksperimen.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Telah dimodelkan suatu model dinamis yang merepresentasikan terjadinya getaran pada sistem perpipaan dengan spesifikasi pipa tipe AW merk Rucika berbahan PVC dengan diameter 1 inci, area yang dianalisa adalah pipa lurus dan pipa *elbow* 90°. Getaran tersebut kemudian dipanen energinya (*energy harvesting*) menggunakan *cantilever piezoelectric* merk *Minisense 100 vibration sensor* yang ditempelkan pada klem berbahan *polylactic acid*.
2. Didapatkan hasil voltase bangkitan terbesar pada posisi pipa *elbow bend* pada kecepatan tertinggi yaitu 0,7 m/s dengan voltase sebesar $16,86 \times 10^{-4}$ volt, atau 1,686 mV.
3. Didapatkan hasil voltase bangkitan terbesar pada saat kecepatan maksimal 0,7 m/s.

5.2 Saran

Adapun saran dari penelitian yang telah dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Perlunya pendekatan simulasi dengan metode dan *software* yang berbeda untuk mencari hasil yang mendekati keadaan aktual.
2. Perlunya memperhatikan segala parameter yang kemungkinan berpengaruh terhadap hasil simulasi.
3. Geometri yang disimulasikan hendaknya mencakup seluruh sistem utama.

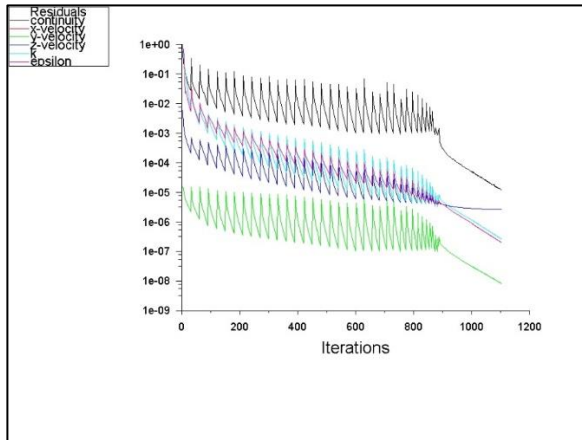
“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR PUSTAKA

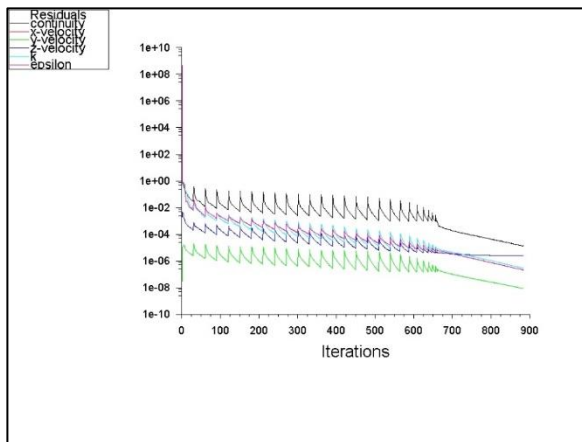
- Arafaa, M., Aklb, W., Majeedc, M., Al-Hussaind, K., & Baz1e, A. (2010). Energy Harvesting of Gas Pipeline Vibration. *7643(76430L-11)*, 1-12.
- Bambang, R. (2018). *Studi Simulasi Reduksi Respon Getaran Translasi dan Energi Listrik Bangkitan Sistem Utama oleh Mekanisme Cantilever Piezoelectric Double Vibration Absorber*. Surabaya: Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Efendy, W. R. (2017). *Pemodelan Dan Analisa Reduksi Respon Getaran Translasi Pada Sistem Utama Dan Energi Listrik yang Dihasilkan Mekanisme Dynamic Vibration Absorber Metode Cantilever Piezoelectric (CPVA)*. Surabaya: Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Hertanto, T. P. (2009). *Buku Pegangan Mahasiswa Pemipaan (Vol. II)*. Jakarta: Universitas Mercu Buana.
- Keshtkar, H., & Jafari, A. (2017). Vibration Analysis of a Turbulent Fluid Passing Inside an Elbow Shaped. *Journal of Applied Mechanical Engineering*, *6(4)*, 1-6.
- Krisdianto, A. N. (2011). *Studi Karakteristik Energi yang Dihasilkan Mekanisme Vibration Energy Harvesting dengan Metode Piezoelectric dengan Pembebanan Frontal dan Lateral*. Surabaya: Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

- Kundua, S., & Nemadea, H. B. (2016). Modeling and Simulation of a Piezoelectric. *12th International Convergence on Vibration Problems*, 585, 1-8.
- Meutiarani, F. (2012). *Pemilihan Pompa Lubrikasi Turbin Di PLTA PT. PJB Up Brantas*. Surabaya: Departemen Teknik Mesin, Fakultas Vokasi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Pritchard, P. J. (2011). *Fox and McDonald's Introduction to Fluid Mechanics*. Danvers: Wiley & sons.inc.
- Putranto, A. A. (2017). *Desain Dan Layouting Instalasi Sistem Perpipaan Dengan Software Plant Design Management System (PDMS) Versi 12.0.SP5* (Vol. I). Yogyakarta: Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.
- Rao, S. S. (2011). *Mechanical Vibration* (Fifth Edition ed.). Upper Saddle River: Pearson Education. Inc.
- Sharma, M. (2006). *Studies on Structural, Dielectric and Piezoelectric Properties of Doped PCT Ceramics*. Patiala: Thapar Institute of Engineering and Technology.
- Sydney, University . (2005). *Aerospace, Mechanical & Mechatronic Engineering*.
- Thorsten Hehn, Y. M. (2015). *CMOS Circuits for Piezoelectric Energy Harvesters*. Freiburg: Springer.
- Wira Hidayatullah, M. S. (2016). Perancangan Prototype Penghasil Energi Listrik Berbahan Dasar Piezoelektrik. *Jurnal Online Teknik Elektro*, 1(3), 1-2.

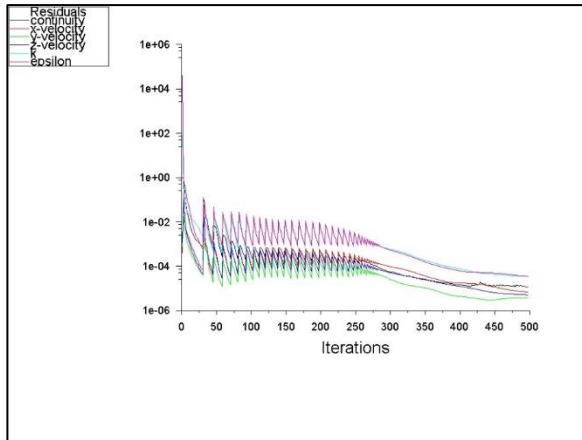
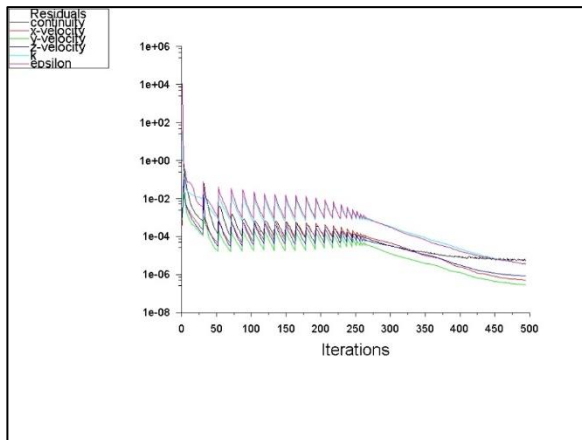
LAMPIRAN

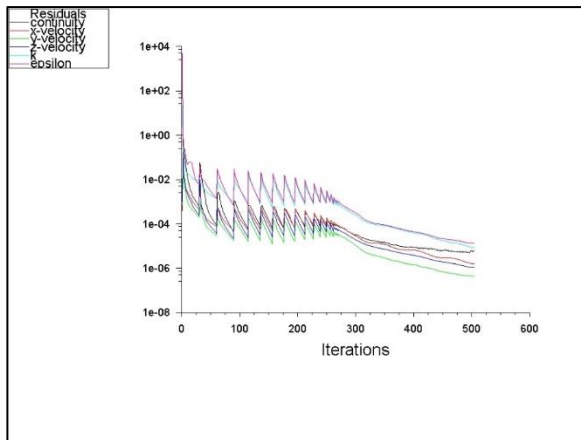


Gambar 1. Grafik residual simulasi pipa lurus kecepatan 0,3 m/s

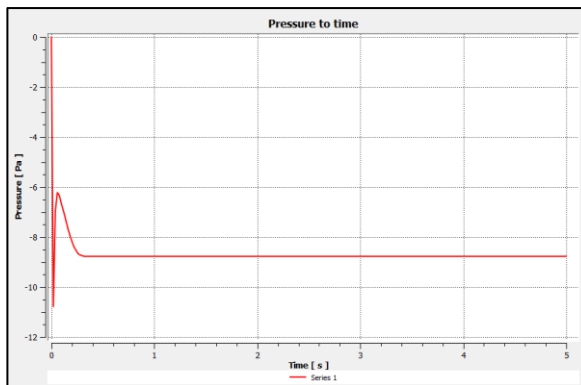


Gambar 2. Grafik residual simulasi pipa lurus kecepatan 0,5 m/s

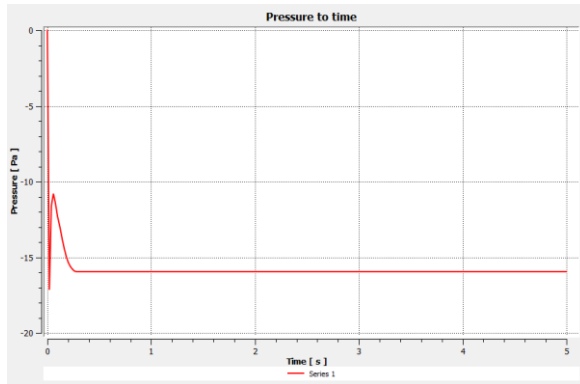
Gambar 3. Grafik residual simulasi pipa *elbow* kecepatan 0,3 m/sGambar 4. Grafik residual simulasi pipa *elbow* kecepatan 0,5 m/s



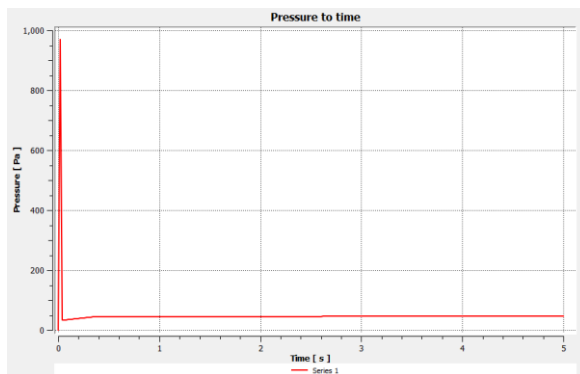
Gambar 5. Grafik residual simulasi pipa *elbow* kecepatan 0,7 m/s



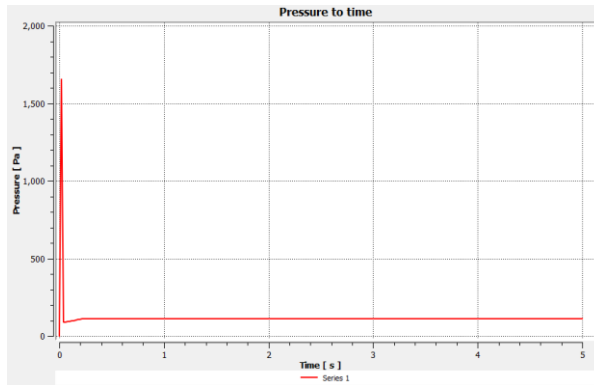
Gambar 6. Grafik tekanan terhadap waktu di titik peletakan pada posisi pipa lurus kecepatan 0,5 m/s



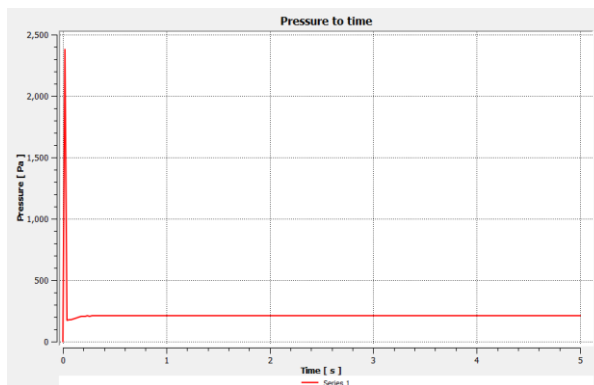
Gambar 7. Grafik tekanan terhadap waktu di titik peletakan pada posisi pipa lurus kecepatan 0,7 m/s



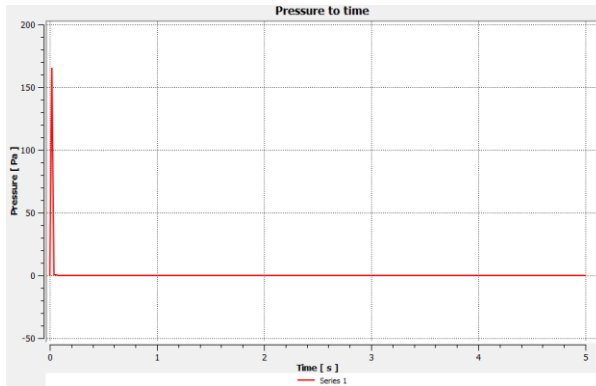
Gambar 8. Grafik tekanan terhadap waktu di titik peletakan pada posisi pipa *elbow bend* kecepatan 0,3 m/s



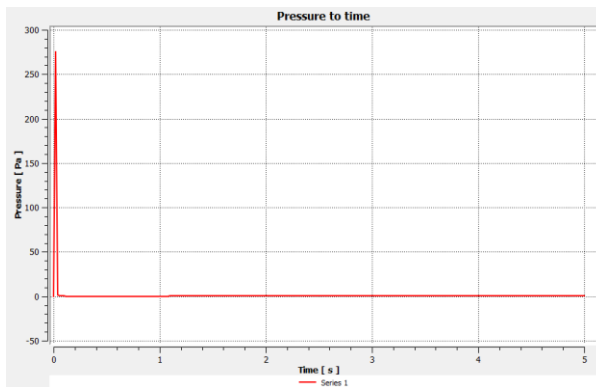
Gambar 9. Grafik tekanan terhadap waktu di titik peletakan pada posisi pipa *elbow bend* kecepatan 0,5 m/s



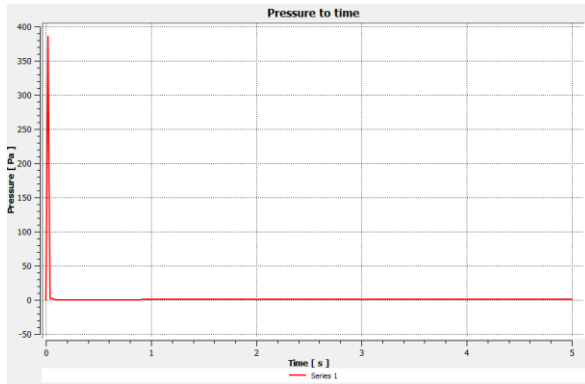
Gambar 10. Grafik tekanan terhadap waktu di titik peletakan pada posisi pipa *elbow bend* kecepatan 0,7 m/s



Gambar 11. Grafik tekanan terhadap waktu di titik peletakan pada posisi pipa *elbow outlet* kecepatan 0,3 m/s



Gambar 12. Grafik tekanan terhadap waktu di titik peletakan pada posisi pipa *elbow outlet* kecepatan 0,5 m/s



Gambar 13. Grafik tekanan terhadap waktu di titik peletakan pada posisi pipa *elbow outlet* kecepatan 0,7 m/s

1	[Name]				
2	forcex				
3					
4	[Data]				
5	X [m]	Y [m]	Z [m]	Force X [N]	
6	0.0198	0.0198	-0.001	0.20354	
7	0.01874	0.02081	-0.00101	0.20354	
8	0.01874	0.02081	0	0.20354	
9	0.0198	0.0198	0	0.20354	
10	0.0198	0.0198	-0.00201	0.20354	
11	0.01874	0.0208	-0.00201	0.20354	
12	0.0198	0.0198	-0.00301	0.20354	
13	0.01874	0.0208	-0.00301	0.20354	
14	0.0198	0.0198	-0.00402	0.20354	
15	0.01874	0.0208	-0.00402	0.20354	
16	0.0198	0.0198	-0.00502	0.20354	
17	0.01874	0.0208	-0.00502	0.20354	
18	0.0198	0.0198	-0.00602	0.20354	
19	0.01874	0.0208	-0.00602	0.20354	
20	0.0198	0.0198	-0.00703	0.20354	
21	0.01874	0.0208	-0.00703	0.20354	
5046	0.02796	0.00145	-0.05822	0.28762	
5047	0.02796	0.00145	-0.05922	0.28762	
5048	0.02796	0.00145	-0.06023	0.28762	
5049	0.02796	0.00145	-0.06123	0.28762	
5050	0.02796	0.00145	-0.06224	0.28762	
5051	0.02796	0.00145	-0.06324	0.28762	

Gambar 14. Contoh hasil *export force* Fluent pada pipa lurus kecepatan 0,3 m/s

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BIODATA PENULIS



Kevin Harris Setiawan dilahirkan di Jakarta, 25 September 1997. Menyelesaikan kuliah dalam program studi S-1 Departemen Teknik Mesin, FTI, ITS pada tahun 2020. Penulis menempuh pendidikan Tingkat Dasar sampai Sekolah Menengah Atas di Kota Bogor, Jawa Barat. Terlahir dari pasangan Herry Suhardiman dan Ucu Masitoh serta memiliki satu adik yang bernama Keyva Harris Sakhi.

Penulis aktif dalam kegiatan akademik maupun non-akademik di lingkungan kampus maupun lingkungan departemen Teknik Mesin. Penulis tergabung dalam organisasi *BEM ITS Kementrian Dalam Negeri (Dagri)* dan mengikuti beberapa kepanitiaan *event* besar salah satunya yaitu KMHE 2017. Dalam kegiatan akademik, penulis aktif menjadi asisten laboratorium Vibrasi dan Sistim Dinamis khususnya untuk praktikum mata kuliah mekanika getaran.

Motto hidup dari penulis adalah “*Ini hidup saya, saya takkan membiarkan orang lain merusaknya*” sehingga menjadikan penulis dapat menjalani hidup sebagai diri sendiri. Namun penulis menyadari suatu kelemahan dari motto yang menggerakkan penulis tersebut. Penulis menjadi terlalu mandiri dapat menjadikan seseorang mengacuhkan orang sekitar. Maka dari itu penulis menyadari perlunya menghargai semua orang siapapun itu. Komunikasi dengan penulis terkait laporan Tugas Akhir ini dapat melalui email: [**i.kevinharris@gmail.com**](mailto:i.kevinharris@gmail.com)