



TUGAS AKHIR - TM184835

SIMULASI PENGARUH BENTUK PERPIPAAN LURUS DAN *ELBOW* DENGAN VARIASI DENSITAS TERHADAP ENERGI BANGKITAN YANG DIHASILKAN PADA *PIEZOELECTRIC*

Geraldus Goldy Talent Silaban
NRP 02111540000

Dosen Pembimbing
Dr. Wiwiek Hendrowati, S.T.,M.T.

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



TUGAS AKHIR - TM184835

**SIMULASI PENGARUH BENTUK PERPIPAAN
LURUS DAN *ELBOW* DENGAN VARIASI
DENSITAS TERHADAP ENERGI BANGKITAN
YANG DIHASILKAN PADA *PIEZOELECTRIC***

Geraldus Goldy Talent Silaban
NRP. 02111540000184

Dosen Pembimbing
Dr. Wiwiek Hendrowati, S.T., M.T.

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

“Halaman ini sengaja dikosongkan”



FINAL PROJECT - TM184835

***SIMULATION OF THE EFFECT OF STRAIGHT
AND ELBOW PIPING WITH DENSITY
VARIATIONS ON ENERGY OF RESURRECTION
PRODUCED IN PIEZOELECTRIC***

Geraldus Goldy Talent Silaban
NRP. 02111540000184

Advisory Lecturer
Dr. Wiwiek Hendrowati, S.T., M.T.

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

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

**SIMULASI PENGARUH BENTUK PERPIPAAN LURUS
DAN ELBOW DENGAN VARIASI DENSITAS TERHADAP
ENERGI BANGKITAN YANG DIHASILKAN PADA
PIEZOELECTRIC**

TUGAS AKHIR

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

Oleh:

Geraldus Goldy Talent Silaban
NRP. 02111540000184

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Dr. Wiwiek Hendrowati, S.T., M.T., Ph.D. (Pembimbing)
NIP. 197004121997032001
2. Aida Annisa Amin Dasgana, S.T., M.T. (Penguji 1)
NIP. 198907052015142805
3. Dr. Harus Laksana Chintura, S.T., M.Eng. (Penguji 2)
NIP. 197505111999031001
4. Ari Kurniawan Saputra, S.T., M.Eng. (Penguji 3)
NIP. 198604012015041001

**SURABAYA
JANUARI, 2020**

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

**SIMULASI PENGARUH BENTUK PERPIPAAN LURUS
DAN *ELBOW* DENGAN VARIASI DENSITAS TERHADAP
ENERGI BANGKITAN YANG DIHASILKAN PADA
*PIEZOELECTRIC***

Nama Mahasiswa : Geraldus Goldy Talent Silaban
NRP : 02111540000184
Laboratorium : Vibrasi dan Sistem Dinamis
Departemen : Teknik Mesin FTIRS-ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Wiwiek Hendrowati,S.T.,M.T.

ABSTRAK

Di kehidupan sehari-hari, dapat ditemukan pipa-pipa dalam mentransportasikan bahan mentah maupun fluida. Didalam aliran pipa tersebut pasti akan menimbulkan gesekan terhadap dinding pipa yang ada. Disaat terjadi gesekan tersebut, pasti menyebabkan aliran yang tidak beraturan atau turbulen yang dapat menimbulkan getaran didalam pipa. Dari getaran tersebut, dapat dimanfaatkan untuk *energy harvesting*. *Energy harvesting* itu sendiri merupakan metode untuk memanfaatkan energi yang ada untuk diubah menjadi energi listrik, dimana energi yang dimanfaatkan adalah energi dari getaran yang terjadi pada pipa ketika fluida mengalir.

Dalam penelitian tugas akhir ini dilakukan studi simulasi dan permodelan dinamis mekanisme Cantilever Piezoelectric Clamp. Sistem Cantilever Piezoelectric Clamp terdiri dari sebuah clamp yang merupakan dudukan untuk PCB dan dua buah piezoelectric dengan diletakkan pada pipa lurus dan elbow 90. Cantilever Piezoelectric Clamp didesain untuk mendapatkan *energy harvesting* dari getaran pada frekuensi pipa yang dialiri fluida secara fleksibel. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan penelitian dengan metode simulasi. Adapun variasi yang diberikan, yaitu variasi laju aliran fluida dan variasi densitas yang dialirkan terhadap pipa.

Dari penelitian tugas akhir ini didapatkan hasil simulasi sistem utama menggunakan ANSYS Fluent untuk mendapatkan nilai gaya yang dibutuhkan dan MATLAB Simulink untuk mendapatkan tegangan yang dihasilkan dari getaran pada pipa. Dari hasil penelitian ini didapatkan bahwa nilai energi bangkitan dari densitas minyak sawit lebih besar dibanding minyak bumi. Seperti pada pipa lurus dengan kondisi turbulen, nilai energi bangkitan minyak sawit sebesar 0.00297858 V, dan minyak bumi sebesar 0.00297778 V, sedangkan pada pipa *elbow* dengan kondisi turbulen, nilai energi bangkitan minyak sawit sebesar 0.0175 V, dan pada minyak bumi sebesar 0.0172 V.

Kata kunci : Cantilever Piezoelectric Clamp, Variasi kecepatan, Variasi densitas aliran fluida, Simulasi.

***SIMULATION OF THE EFFECT OF STRAIGHT AND
ELBOW PIPING WITH DENSITY VARIATIONS ON
ENERGY OF RESURRECTION PRODUCED IN
PIEZOELECTRIC***

Student's Name : Geraldus Goldy Talent Silaban
NRP : 02111540000184
Departement : Mechanical Engineering FTIRS-ITS
Advisory Lecturer : Dr. Wiwiek Hendrowati, S.T.,
M.T.

ABSTRACT

In daily life, pipes can be found in transporting raw materials or fluids. In the flow of the pipe will definitely cause friction against the existing pipe wall. When the friction occurs, it must cause irregular or turbulent flow that can cause vibrations in the pipe. From these vibrations, it can be used for energy harvesting. Energy harvesting itself is a method for utilizing existing energy to be converted into electrical energy, where the energy used is energy from vibrations that occur in pipes when fluid flows.

In this final project research, dynamic simulation and modeling of the Cantilever Piezoelectric Clamp mechanism is carried out. The Piezoelectric Clamp Cantilever system consists of a clamp which is a holder for the PCB and two piezoelectric clamps placed in a straight pipe and elbow 90. The Piezoelectric Clamp Cantilever is designed to obtain energy harvesting from vibrations at the frequency of the fluid flowed flexibly. This study aims to conduct research with simulation methods. As for the variations given, namely variations in fluid flow rates and variations in density that flow to the pipe.

From this final project research the main system simulation results are obtained using ANSYS Fluent to get the

required force values and MATLAB Simulink to get the voltage generated from vibrations in the pipe. From the results of this study found that the value of energy generation from the density of palm oil is greater than petroleum. As in a straight pipe with turbulent conditions, the value of palm oil generation energy is 0.00297858 V, and petroleum is 0.00297778 V, while on the elbow pipe with turbulent conditions, the value of palm oil generation energy is 0.0175 V, and on oil is 0.0172 V.

Keywords: Cantilever Piezoelectric Clamp, Speed variation, Fluid density density variation, Simulation.

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 “Simulasi Pengaruh Bentuk Perpipaan Lurus Dan *Elbow* Dengan Variasi Densitas Terhadap Energi Bangkitan Yang Dihasilkan Pada *Piezoelectric*” dengan lancar.

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 Industri dan Rekayasa Sistem Institut 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. Tuhan Yang Maha Kasih, karena atas Kehendak-Nya, penulis dapat menyelesaikan studinya di departemen Teknik Mesin ini.
2. Orang Tua penulis, yaitu Bapak Edison Sihombing, dan Ibu Romauli Hutapea, karena telah mendukung dan menyemangati selama perkuliahan di Departemen Teknik Mesin ini.
3. Bu Wiwiek Hendrowati, yang sudah membimbing penulis melewati tugas akhir ini
4. Saudara Kandung Garry Armando, Gorbachev Partahi Bonar, dan Glory Audina, karena telah mendukung secara tidak langsung dan mempercayai penulis didalam dunia perkuliahannya.
5. Saudara ipar, Lamora Theresia dan Johannes Edison, karena telah mendukung secara tidak langsung, mohon maaf karena penulis belum bisa menyempatkan lebih banyak waktu untuk lebih dekat dengan kalian.

6. Keponakan penulis, Lewis Ezekiel Gaudi, yang belum bisa mendukung dalam hal apapun, tetapi selalu membuat *uncle Rock* tersenyum walaupun hanya bisa melihat dari jauh, maaf karena *uncle* tidak dapat menyempatkan waktu lebih banyak untuk memperhatikan tumbuh kembang Lewis, tetapi *uncle* selalu sayang Lewis.
7. Teman dekat penulis dari semasa SMA, Bayu yang selalu mendukung dengan pikiran realistik, Daniel yang selalu mengajarkan cara menikmati hidup ditengah kesakitan, Panji dengan kata-kata bijaknya yang bahkan belum tentu dapat dia contohkan, Sogy yang selalu memperhatikan teman walaupun tidak pernah terlihat secara langsung tetapi sangat terasa, Idunk selaku teman yang keras kepala tetapi berhati lembut, Bedul yang selalu mendukung secara penuh tahun akhir penulis baik dari hotel hingga kalimat bijak, Andre yang berperilaku baik dan sedang berjuang juga di tahun akhirnya, Leki yang mengajarkan bagaimana menjadi lelaki baik di dunia yang buruk ini. Terimakasih atas segala yang telah kita lalui selama masa pertemanan dengan penulis.
8. Teman dekat penulis di masa kuliah, Markus yang katanya mirip dengan penulis dan selalu menemani kemana pun, Tomy yang berwajah sangar tetapi perhatian dengan sekitar, Aldo si baik hati, Fitri teman yang gupuh tetapi suka membantu. Terimakasih karena sudah membantu saya di masa-masa sulit saya, semoga pertemanan kita tidak pernah berakhir.
9. Teman-teman “H(A)RD” Muti, Irfan, Tory, Andi yang selalu memberikan canda tawa, dari hal tidak jelas sampai hal yang sangat tidak jelas.
10. Teman-teman satu dosen pembimbing, Aldisa, Sla, Lucia, Fredi, Ammar, Barel, terutama Kevin. Terimakasih karena mau membantu dan mendukung penulis dalam mengerjakan tugas akhir ini.

11. Teman-teman laboratorium Sistem Manufaktur, M58, LBMM, dan sebagainya yang telah mengisi kehidupan kampus penulis.
12. Rut Kartika yang telah mendukung dan menyayangi saya sepanjang perjalanan bersama beberapa tahun belakangan.
13. *My forever crush*, yang telah menunjukkan betapa hati tidak bisa berbohong, sampai kapanpun akan selalu menyayangi, baik ada maupun tiada, baik bersama maupun berpisah. ILY, A.

Surabaya, 29 Januari 2020

Penulis

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR ISI

ABSTRAK.....	i
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL.....	xvii
BAB I.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
BAB II.....	5
2.1 Fluida.....	5
2.1.1 Jenis Aliran Fluida	5
2.1.2 Densitas.....	6
2.1.3 Viskositas.....	6
2.1.4 Reynold Number.....	7
2.2 Multi Degree of Freedom (MdoF).....	7
2.2.1 Base Motion Vibration.....	9
2.3 Sistem Perpipaan.....	11
2.3.1 Material Pipa	11

2.4	<i>Piezoelectric</i>	12
2.4.1	Energi Bangkitan <i>Piezoelectric</i>	14
2.4.2	Cantilever <i>Piezoelectric</i>	17
2.4.3	Susunan Piezoelectrik	19
2.5	Tinjauan Pustaka	21
2.5.1	Simulation of induced loads	22
2.5.2	Power Generation in Pipeline	26
2.5.3	Experimental and Simulation Study of flow Induced Vibration Through Straight Pipes	29
2.5.4	Vibration of a Turbulent Fluid Inside an Elbow Shaped Pipe	33
2.5.5	Dynamic response of undergoing vortex- induced vibrations with variable-density fluid	36
BAB III		41
3.1	Flowchart Penelitian	41
3.2	Penjelasan Flowchart Penelitian	43
3.2.1	Studi Literatur	43
3.2.2	Identifikasi Masalah	43
3.2.3	Perancangan Mekanisme Cantilever Piezoelectric dan sistem utama	44
3.2.4	Pemodelan Simulasi Aliran Dalam Pipa Menggunakan ANSYS	48

3.2.5	Penggunaan Hasil dari ANSYS Sebagai Input Gaya Eksitasi pada Pemodelan Sistem Dinamis	48
3.2.6	Pemodelan Sistem Dinamis dan Penurunan Persamaan Gerak	49
3.3	Penentuan Parameter Penelitian.....	62
3.3.1	Menentukan Parameter Massa	64
3.3.2	Menentukan Parameter Kekakuan (k).....	66
3.3.2.1	Pipa Lurus.....	66
3.3.2.2	Pipa <i>Elbow</i>	72
3.3.2.3	<i>Piezoelectric</i>	79
3.3.3	Menentukan Frekuensi Natural	80
3.4	Analisa Data dan Pembahasan.....	81
3.5	Kesimpulan	82
BAB IV	.....	83
4.1	Analisa Hasil Simulasi Aliran Fluida	83
4.1.1	proses <i>meshing</i> pada sistem utama	83
4.1.2	Simulasi Aliran Fluida Menggunakan ANSYS Fluent	83
4.1.3	Gaya Yang Dihasilkan Dari Simulasi ANSYS Fluent	92
4.2	Grafik Voltase Terhadap Waktu Menggunakan Matlab-Simulink.....	94
4.2.1	Grafik Variasi Densitas Minyak Sawit Pada Pipa Lurus	94

4.2.2	Grafik Variasi Densitas Minyak Sawit Pada Elbow	96
4.2.3	Grafik Variasi Densitas Minyak Bumi Pada Lurus	98
4.2.4	Grafik Variasi Densitas Minyak Bumi Pada Elbow	100
4.3	Hasil Grafik Dari MATLAB-Simulink	102
4.3.1	Analisa Hasil Grafik Terhadap Variasi Densitas Fluida	102
4.3.2	Analisa Hasil Grafik Terhadap Variasi Kecepatan Berdasarkan Reynolds Number .	103
4.3.3	Analisa Hasil Grafik Terhadap Variasi Pipa	104
BAB V	.....	107
5.1	Kesimpulan	107
5.2	Saran.....	107
DAFTAR PUSTAKA	.....	109
LAMPIRAN	.....	111
BIODATA PENULIS	.....	113

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1	Ilustrasi sistem undamped dengan tiga derajat kebebasan (Rao, 2011)	7
Gambar 2. 2	(a) Base Excitation, (b) Base Excitation Free Body Diagram (Rao, 2011).....	9
Gambar 2. 3	Grafik Hubungan (a) Amplitudo Ratio dengan Frequency Ratio, (b) Phase Angle dengan Frequency Ratio (Rao, 2011).....	10
Gambar 2.4	Hubungan beban terhadap <i>piezoelectric</i> [2].....	13
Gambar 2.5	Perubahan distribusi muatan bahan <i>piezoelectric</i> (a) Tanpa gaya luar, (b) Bila diberi gaya tarik, (c) Bila diberi gaya tekan [2].....	14
Gambar 2.6	Cantilever <i>Piezoelectric</i> [5]	17
Gambar 2.7	Model Dinamis Canltiliver <i>Piezoelectric</i> [5]	18
Gambar 2.8	Rangkaian listrik ekuivalen pemanen <i>piezoelectric</i>	18
Gambar 2. 9	Susunan paralel material <i>piezoelectric</i>	20
Gambar 2.10	<i>Piezoelectric</i> disusun secara seri [6]	20
Gambar 2.11	Eksperimen getaran pada pipa plexiglas menggunakan fluida gas Nitrogen.....	27
Gambar 2. 12	Dua piezoelectric silinder yang berbeda sebagai variasi penelitian [10]	27
Gambar 2. 13	Grafik hubungan amplitudo dengan waktu (a) dan (c), grafik hubungan FfT amplitudo dengan frekuensi (b) dan (d), grafik dengan data yang sama dengan variasi ukuran piezoelectric silinder [10]	28
Gambar 2. 14	Pipa yang dialiri fluida dengan dijepit di kedua ujungnya [9].....	30
Gambar 2. 15	Skema loop aliran fluida pada pipa [9]	31
Gambar 2. 16	Eksperimen getaran pada pipa [9].....	31
Gambar 2. 17	Grafik frekuensi untuk diameter 24mm, ketebalan 2.4mm, dan discharge 90 lpm (a) Experimental (b) Simulation [9]	32

Gambar 2. 18	Grafik frekuensi untuk diameter 24mm, ketebalan 2.4mm, dan discharge 120 lpm (a) Experimental (b) Simulation [9].....	32
Gambar 2. 19	Grafik frekuensi untuk diameter 24mm, ketebalan 2.4mm, dan discharge 150 lpm (a) Experimental (b) Simulation [9].....	33
Gambar 2.20	Vibration Frequency vs Fluid Velocity ^[3]	35
Gambar 2. 21	Model VIV pada pipa fleksibel.....	37
Gambar 2. 22	RMS yang dihasilkan dari perbedaan densitas fluida.....	38
Gambar 3. 1	Flowchart Penelitian.....	42
Gambar 3. 2	Rangkaian sistem perpipaan.....	44
Gambar 3. 3	Sistem utama (a) pipa elbow 90 (b) pipa lurus ..	45
Gambar 3. 4	Piezoelectric	45
Gambar 3. 5	Diagram sirkuit elektromagnetik cantilever piezoelectric.....	46
Gambar 3. 6	Model Clamp dan Piezoelectric	46
Gambar 3. 7	Sistem utama yang akan dianalisa yang telah dipasang piezoelectric (a) pipa lurus, (b) elbow 90 posisi 1 dan (c) elbow 90 posisi 2.....	47
Gambar 3. 8	Skema analisis pada Workbench ANSYS.....	48
Gambar 3.9	Model Dinamis Pipa Lurus Dengan piezoelectric.....	49
Gambar 3. 10	Model Dinamis Pipa Elbow Dengan piezoelectric.....	50
Gambar 3.11	Free Body Diagram Massa Pipa (m_0).....	51
Gambar 3.12	Free Body Diagram Massa Piezoelectric 1 (m_1)	52
Gambar 3.13	Free Body Diagram Massa Piezoelectric 2 (m_2)	53
Gambar 3.14	Free Body Diagram massa piezoelectric 3 (m_3).	54
Gambar 3.15	Free Body Diagram Sistem utama pipa elbow...	55
Gambar 3.16	Free Body Diagram inlet elbow	57
Gambar 3.17	Free Body Diagram belokan pipa elbow.....	58
Gambar 3.18	Free Body Diagram outlet pipa elbow	59

Gambar 3.19	Diagram sirkuit elektromagnetik cantilever piezoelectric.....	60
Gambar 3. 20	Free Body Diagram Pipa Lurus	66
Gambar 3. 21	Potongan Pipa Lurus	67
Gambar 3. 22	Potongan 1 Pipa Lurus	67
Gambar 3. 23	Potongan 2 Pipa Lurus	68
Gambar 3.24	Diagram shear dan diagram momen pipa lurus..	69
Gambar 3. 25	Free Body Diagram elbow	72
Gambar 3.26	Potongan pipa elbow.....	73
Gambar 3.27	Potongan 1 pipa elbow.....	74
Gambar 3.28	Potongan 2 pipa elbow.....	74
Gambar 3.29	Diagram shear dan diagram momen pipa lurus..	75
Gambar 3.30	Dimensi piezoelectric Minisense 100 Vibration Sensor	80
Gambar 4.1	Meshing pada pipa (a) lurus dan (b) elbow.....	83
Gambar 4.2	Grafik residual dan persebaran tekanan pada pipa lurus, fluida minyak sawit dengan kecepatan pada saat RE (a) 1500, (b) 2500, (c) 3500	85
Gambar 4.3	Grafik residual dan persebaran tekanan pada pipa lurus, fluida minyak bumi dengan kecepatan pada saat RE (a) 1500, (b) 2500, (c) 3500	87
Gambar 4.4	Grafik residual dan persebaran tekanan pada pipa elbow, fluida minyak sawit dengan kecepatan pada saat RE (a) 1500, (b) 2500, (c) 3500.....	89
Gambar 4.5	Grafik residual dan persebaran tekanan pada pipa elbow, fluida minyak bumi dengan kecepatan pada saat RE (a) 1500, (b) 2500, (c) 3500.....	91
Gambar 4.6	Point yang digunakan untuk menemukan gaya yang dibutuhkan dari posisi yang ditentukan pada pipa (a) lurus dan (b) elbow.....	92
Gambar 4.7	Grafik voltase hasil MATLAB pada pipa lurus dengan minyak sawit dengan RE pada kondisi (a) laminar, (b) transisi, dan (c) turbulen	94

Gambar 4.8	Grafik voltase hasil MATLAB pada pipa elbow dengan minyak sawit dengan RE pada kondisi (a) laminar, (b) transisi, dan (c) turbulen	96
Gambar 4.9	Grafik voltase hasil MATLAB pada pipa lurus dengan minyak bumi dengan RE pada kondisi (a) laminar, (b) transisi, dan (c) turbulen	98
Gambar 4.10	Grafik voltase hasil MATLAB pada pipa elbow dengan minyak bumi dengan RE pada kondisi (a) laminar, (b) transisi, dan (c) turbulen	100
Gambar 4.11	Grafik Vrms terhadap RE dengan akibat pengaruh densitas fluida minyak sawit dan minyak bumi.....	102
Gambar 4.12	Grafik Vrms terhadap RE dengan pengaruh variasi kecepatan berdasarkan nilai RE pada pipa (a) lurus dan (b) elbow	103
Gambar 4.13	Grafik Vrms terhadap RE dengan pengaruh variasi pipa lurus dan elbow pada densitas (a)minyak sawit dan (b) minyak bumi	104

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Energi bangkitan, Displacement dan Kapasitansi pada <i>Piezoelectric</i> [3]	15
Tabel 2.2	Perbandingan Material <i>Piezoelectric</i>	16
Tabel 2.3	Kecepatan fluida terhadap getaran yang diinduksi ^[3]	35
Tabel 3.1	Parameter ANSYS	63
Tabel 3.2	Parameter sistem utama	63
Tabel 3.3	Parameter cantilever <i>piezoelectric</i>	64
Tabel 4.1	hasil gaya yang didapatkan dari simulasi menggunakan ANSYS Fluent	93
Tabel 4.2	Hasil Vrms dari MATLAB-Simulink	93

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Di kehidupan sehari-hari, dapat ditemukan pipa-pipa dalam mentransportasikan bahan mentah maupun fluida. Didalam aliran pipa tersebut pasti akan menimbulkan gesekan terhadap dinding pipa yang ada. Disaat terjadi gesekan tersebut, pasti menyebabkan aliran yang tidak beraturan atau turbulen. Dari getaran tersebut, dapat dimanfaatkan untuk *energy harvesting*. *energy harvesting* itu sendiri merupakan metode untuk memanfaatkan energi yang ada untuk diubah menjadi energi listrik, dimana energi yang dimanfaatkan adalah energi dari getaran yang terjadi pada pipa ketika fluida mengalir.

Salah satu penelitian *energy harvesting* yang pernah dilakukan salah satunya oleh M. Arafat yang menggunakan *cantilever piezoelectric* dan menggunakan metode simulasi sekaligus eksperimen dalam penelitian *energy harvesting* ini. Pada penelitian tersebut, fluida yang digunakan pada penelitian tersebut menggunakan fluida gas yang dialirkan menggunakan blower. Pada penelitian tersebut dibagi menjadi 4 bagian utama, yang pertama membuat simulasi aliran turbulen berikut dengan respon dari struktur yang ada. Lalu pada bagian kedua merupakan pemodelan *electromechanics* dibuat, yaitu pergerakan dinamis dari *piezoelectric* untuk *energy harvesting* itu sendiri. Pada bagian ketiga dibuat eksperimen yang mendukung penelitian tersebut

Dari latar belakang di atas, penelitian mengenai *energy harvesting* salah satunya yaitu pengukuran getaran yang terjadi di model sistem perpipaan. Sedangkan untuk penelitian tugas akhir ini, dilakukan proses simulasi yaitu dengan cara studi pemodelan dinamis mekanisme *piezoelectric* yang disimulasikan menggunakan program Simulink Matlab, yang bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi yang ada terhadap voltase yang

dihasilkan. Variasi yang diberikan yaitu variasi densitas aliran fluida yang mengalir pada pipa lurus dan elbow dengan variasi kecepatan fluida yang dialirkan dalam sistem perpipaan. Dari penelitian ini didapatkan hasil respon yang memiliki nilai seberapa besar energi yang dihasilkan dari getaran yang didapat pada *piezoelectric*.

1.2 Rumusan Masalah

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

1. Bagaimana pengaruh variasi densitas fluida pada pipa lurus dalam sistem perpipaan terhadap voltase yang dihasilkan oleh *cantilever piezoelectric*?
2. **Bagaimana pengaruh variasi densitas fluida pada pipa elbow** dalam sistem perpipaan terhadap voltase yang dihasilkan oleh *cantilever piezoelectric*?
3. Bagaimana pengaruh variasi kecepatan fluida di dalam pipa lurus dalam sistem perpipaan terhadap voltase yang dihasilkan oleh *cantilever piezoelectric*
4. Bagaimana pengaruh variasi kecepatan fluida di dalam pipa *elbow* dalam sistem perpipaan terhadap voltase yang dihasilkan oleh *cantilever piezoelectric*

1.3 Tujuan

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

1. Mengetahui pengaruh variasi densitas fluida di dalam pipa lurus terhadap voltase yang dihasilkan oleh *cantilever piezoelectric*
2. Mengetahui pengaruh variasi densitas fluida di dalam pipa *elbow* dalam sistem perpipaan terhadap voltase yang dihasilkan oleh *cantilever piezoelectric*

3. Mengetahui pengaruh variasi kecepatan fluida di dalam pipa lurus dalam sistem perpipaan terhadap voltase yang dihasilkan oleh *cantilever piezoelectric*
4. Mengetahui pengaruh variasi kecepatan fluida di dalam pipa *elbow* dalam sistem perpipaan 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. Penelitian dititikberatkan pada alat *energy harvesting* getaran
2. Gaya eksitasi oleh pompa dan semua getaran yang terjadi pada sistem hanya translasi arah transversal.
3. Konstanta redaman pipa dan *cantilever piezoelectric* diabaikan.
4. Getaran dari luar mekanisme diabaikan.
5. Gaya tekan yang terjadi dianggap gaya terdistribusi pada *piezoelectric*.
6. *Fully developed flow*, yaitu profil kecepatan aliran suatu fluida telah berkembang penuh dan konstan sepanjang L.
7. *Fouling factor* diabaikan, factor pengganggu yang menyebabkan kerugian yang dialami tiap aliran sehingga menyebabkan pengecilan diameter.
8. Frekuensi operasi sesuai dengan fluida air pada eksperimen sebesar 251.32 Hz

1.5 Manfaat Penelitian

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.
3. Mengetahui karakteristik energi yang dihasilkan mekanisme vibrasi *energy harvesting* untuk variasi peletakan *piezoelectric* pada pipa.
4. Mengetahui karakteristik energi yang dihasilkan mekanisme vibrasi *energy harvesting* untuk variasi laju aliran fluida didalam pipa.

BAB II

DASAR TEORI DAN TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Fluida

Fluida adalah suatu zat yang dapat mengalir bisa berupa cairan atau gas. Fluida mengubah bentuknya dengan mudah dan didalam kasus mengenai gas, mempunyai volume yang sama dengan volume uladuk yang membatasi gas tersebut. Pemakaian mekanika kepada medium kontinyu, baik benda padat maupun fluida adalah didasari pada hukum gerak newton yang digabungkan dengan hukum gaya yang sesuai.

Salah satu cara untuk menjelaskan gerak suatu fluida adalah dengan membagi –bagi fluida tersebut menjadi elemen volume yang sangat kecil yang dapat dinamakan partikel fluida dan mengikuti gerak masing-masing partikel ini.

Suatu massa fluida yang mengalir selalu dapat dibagi-bagi menjadi tabung aliran, bila aliran tersebut adalah tunak, waktu tabung-tabung tetap tidak berubah bentuknya dan fluida yang pada suatu saat berada didalam sebuah tabung akan tetap berada dalam tabung ini seterusnya. Kecepatan aliran didalam tabung aliran adalah sejajar dengan tabung dan mempunyai besar berbanding terbalik dengan luas penampangnya.

2.1.1 Jenis Aliran Fluida

Aliran fluida dapat dikategorikan:

1. Aliran laminar

Aliran dengan fluida yang bergerak dalam lapisan–lapisan, atau lamina–lamina dengan satu lapisan meluncur secara lancar . Dalam aliran laminar ini viskositas berfungsi untuk meredam kecendrungan terjadinya gerakan relatif antara lapisan. Sehingga aliran laminar memenuhi hukum viskositas Newton yaitu : $\tau = \mu \, dy/du$

2. Aliran turbulen

Aliran dimana pergerakan dari partikel – partikel fluida sangat tidak menentu karena mengalami percampuran serta putaran

partikel antar lapisan, yang mengakibatkan saling tukar momentum dari satu bagian fluida ke bagian fluida yang lain dalam skala yang besar. Dalam keadaan aliran turbulen maka turbulensi yang terjadi membangkitkan tegangan geser yang merata diseluruh fluida sehingga menghasilkan kerugian – kerugian aliran.

3. Aliran transisi

Aliran transisi merupakan aliran peralihan dari aliran laminar ke aliran turbulen.

2.1.2 Densitas

Density atau rapat jenis (ρ) suatu zat adalah ukuran untuk konsentrasi zat tersebut dan dinyatakan dalam massa persatuan volume; sifat ini ditentukan dengan cara menghitung nisbah (ratio) massa zat yang terkandung dalam suatu bagian tertentu terhadap volume bagian tersebut. nilai density dapat dipengaruhi oleh temperatur semakin tinggi temperatur maka kerapatan suatu fluida semakin berkurang karena disebabkan gaya kohesi dari molekul–molekul fluida semakin berkurang.

2.1.3 Viskositas

Viskositas merupakan pengukuran dari ketahanan fluida yang diubah baik dengan tekanan maupun tegangan. Pada masalah sehari-hari (dan hanya untuk fluida), viskositas adalah "Ketebalan" atau "pergesekan internal". Oleh karena itu, air yang "tipis", memiliki viskositas lebih rendah, sedangkan madu yang "tebal", memiliki viskositas yang lebih tinggi. Sederhananya, semakin rendah viskositas suatu fluida, semakin besar juga pergerakan dari fluida tersebut.

$$\mu = \frac{G \cdot t}{\dots}$$

dimana :

μ = viskositas (N.s/m²)

G = rasio antara tegangan geser dan regangan geser (Pa)

t = waktu (s)

2.1.4 Reynold Number

Bilangan Reynolds merupakan bilangan tak berdimensi yang dapat membedakan suatu aliran itu dinamakan laminar, transisi atau turbulen.

$$Re = \rho V D / \mu$$

Dimana :

V : kecepatan (rata-rata) fluida yang mengalir (m/s)

D : diameter dalam pipa (m)

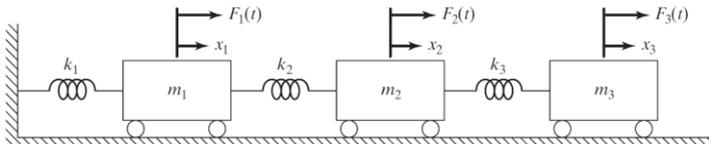
ρ : masa jenis fluida (kg/m^3)

μ : viskositas dinamik fluida (kg/m.s) atau (N. det/ m^2)

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

2.2 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 2.1 sebagai berikut:



Gambar 2.1 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 2.1 sebagai berikut:

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

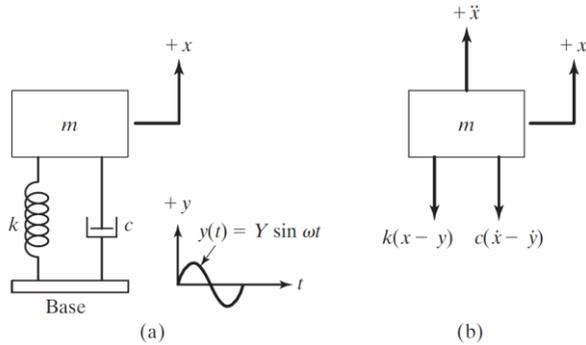
Dimana,

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

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

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

2.2.1 Base Motion Vibration



Gambar 2.2 (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 2.2 mengilustrasikan pergerakan tersebut, dimana $y(t)$ merupakan simpangan dari *base* dan $x(t)$ yaitu simpangan dari massa pada posisi *static equilibrium* saat waktu t . Maka total simpangan dari pegas adalah $x - y$ dan kecepatan relatif dari *damper* adalah $\dot{x} - \dot{y}$ (Rao, 2011). 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:

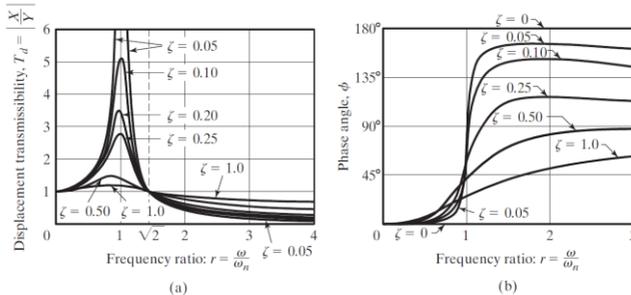
$$x_p(t) = X \sin(\omega t - \phi) \quad (2.8)$$

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



Gambar 2.3 Grafik Hubungan (a) *Amplitudo Ratio* dengan *Frequency Ratio*, (b) *Phase Angle* dengan *Frequency Ratio* (Rao, 2011)

2.3 Sistem Perpipaan

Sistem perpipaan adalah suatu sistem yang digunakan untuk transportasi fluida antar peralatan (equipment) dari suatu tempat ke tempat yang lain sehingga proses produksi dapat berlangsung.

2.3.1 Material Pipa

Material-material pipa secara umum adalah *carbon steel*, *carbon moly*, *galvanees*, *ferro nikel*, *stainless steel*, *PVC* (paralon), *chrome moly*, *viber glass*, *aluminum* (aluminium), *wrought iron* (besi tanpa tempa), *copper* (tembaga), *red brass* (kuningan merah), *nickel copper=monel* (timah tembaga), *nickel chrom iron= inconel* (besi timah chrom).

Dalam industri, material pipa yang paling umum digunakan adalah *carbon steel*. *Carbon steel* (baja karbon) adalah material logam yang terbentuk dari unsur utama Fe dan unsur kedua yang berpengaruh pada sifat sifatnya adalah karbon, maksimum kandungan karbon pada baja karbon kurang lebih sebesar 17%. Sedangkan unsur lain yang berpengaruh menurut prosentasenya. Kandungan minimum pada baja karbon adalah *chrom* (Cr), *nikel* (Ni), *molybdenum* (Mo) dimana unsur ini akan menambah kekuatan, kekakuan, dan ketahanan terhadap korosi.

Secara umum sifat baja ditentukan oleh kandungan C (*carbon*) berdasarkan kandungan C (*carbon*) dan unsur-unsur lainnya, maka dikenal :

1. *Low carbon steel*

Baja karbon rendah adalah baja yang mengandung karbon kurang dari 0,3% C. Baja karbon rendah mudah di-*machining* dan dilas, keuletan dan ketangguhannya sangat tinggi tetapi keuletannya sangat rendah dan aus

2. *High carbon steel*

Baja karbon tinggi adalah baja yang mengandung kandungan karbon 0,6% C-1,7% C dan memiliki tahan panas yang tinggi, kekerasan tinggi namun keuletannya rendah. Baja karbon tinggi

mempunyai kuat tarik paling tinggi dan banyak digunakan untuk material *tools*.

3. *Alloy steel*

Baja paduan di definisikan sebagai suatu baja yang dicampur satu atau lebih unsur campuran seperti *nikel, mangan, molybdenum, chromium, vanadium*, dan *wolfram* yang berguna untuk memperoleh sifat-sifat baja yang dikehendaki seperti sifat kekuatan, kekerasan dan keuletannya.

4. *Low and intermediate allow steel*

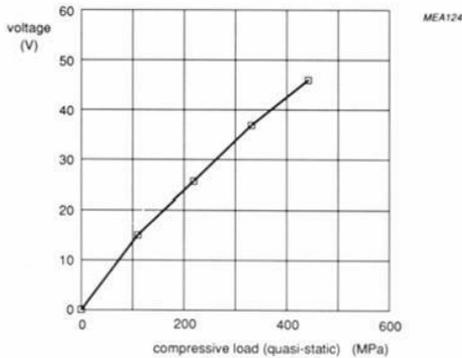
Baja ini digunakan untuk pemakaian temperatur tinggi, dispesifikasikan oleh ANSI B31.1 dengan kandungan logam utamanya adalah *chrom* (Cr) dan *molybdenum* (Mo).

5. *Austenite stainless steel*

Baja *Austenite stainless steel* adalah baja yang mempunyai kandungan *nikel* (Ni) dan baja ini tahan terhadap korosi serta *temperature* tinggi.

2.4 *Piezoelectric*

Jacques dan Currie menemukan fenomena *piezoelectric* pada tahun 1880, dimana *piezoelectric* merupakan katagori material yang mempunyai sifat unik. Penerapan stress pada kristal *piezoelectric* akan membangkitkan listrik karena terjadi polarisasi muatannya. Piezoelektrisitas didefinisikan sebagai suatu kemampuan yang dimiliki sebagian kristal maupun bahan-bahan tertentu lainnya yang dapat menghasilkan suatu arus listrik jika mendapatkan perlakuan tekanan. Efek *piezoelectric* adalah efek terjadinya perubahan energy mekanik menjadi nergi listrik. Oleh karena itu bahan *piezoelectric* sangat dimungkinkan sekali untuk dijadikan konverter antara energi listrik dan gerakan mekanis, dapat dilihat pada gambar 2.4 bagaimana hubungan beban mempengaruhi *piezoelectric*.

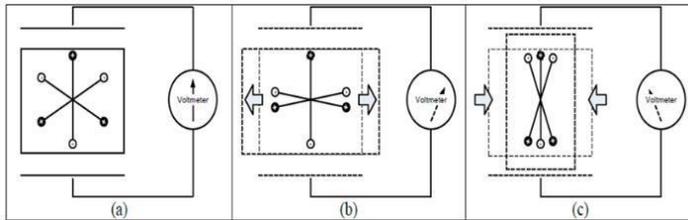


Gambar 2.4 Hubungan beban terhadap *piezoelectric* (CHHABRA, 2018)

Bahan *piezoelectric* merupakan kristal yang mampu menghasilkan tegangan listrik saat mengalami tekanan, tarikan atau getaran (*direct piezoelectric*). Kondisi sebaliknya juga 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 2.5 (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 2.5 (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 2.5 (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



Gambar 2.5 Perubahan distribusi muatan bahan *piezoelectric* (a) Tanpa gaya luar, (b) Bila diberi gaya tarik, (c) Bila diberi gaya tekan (CHHABRA, 2018)

2.4.1 Energi Bangkitan *Piezoelectric*

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

$$V_o = g_{3n} X_n t \quad (n = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (2.10)$$

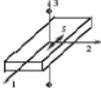
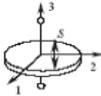
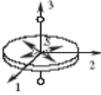
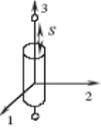
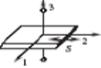
Dimana,

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

X_n = tegangan yang diberikan pada arah yang sama

t = ketebalan *piezoelectric*

Tabel 2.1 Energi bangkitan, Displacement dan Kapasitansi pada *Piezoelectric* (CHHABRA, 2018)

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

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

Tabel 2.2 Perbandingan Material *Piezoelectric* (CHHABRA, 2018)

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:

$$g_{33} = d/\epsilon T_{33} \quad (2.11)$$

Dimana,

g_{33} = *piezoelectric voltage constant* (Vm/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 gambar 2.6, diketahui hubungan antara permittivity dan kapasitansi. Sehingga dapat diketahui permittivity melalui persamaan:

$$\varepsilon^t = \frac{C t}{A} \quad (2.12)$$

Dimana,

C = kapasitansi (f)

A = luasan aktif *piezoelectric* (m)

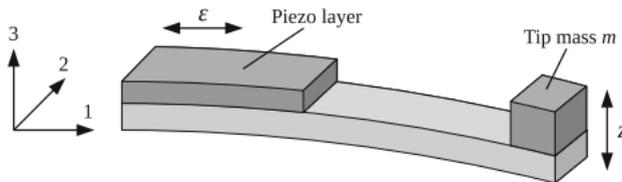
t = tebal *piezoelectric* (m)

Voltase output bias didapat melalui persamaan:

$$V_o = \frac{d_{3n} X_n t A}{C} \quad (2.13)$$

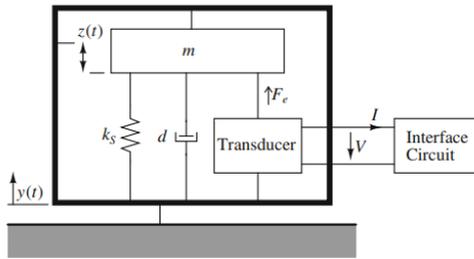
2.4.2 Cantilever Piezoelectric

Cantilever piezoelectric adalah *piezoelectric* yang berbentuk cantilever dengan bagian atas dan bawah *cantilever* terdapat material *piezoelectric transducers* (PZT) **Invalid source specified..** 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.



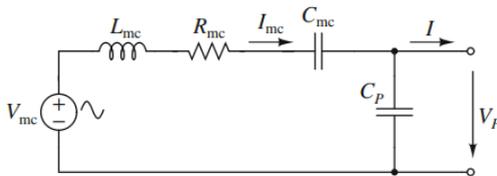
Gambar 2.6 Cantilever *Piezoelectric* (CHHABRA, 2018)

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



Gambar 2.7 Model Dinamis Canltiliver *Piezoelectric* (CHHABRA, 2018)

Dari gambar 2.7 di atas didapat rangkaian listrik ekuivalen pada gambar 2.8.



Gambar 2.8 Rangkaian listrik ekuivalen pemanen *piezoelectric* (CHHABRA, 2018)

Persamaan rangkaian listrik pada gamabr 2.9 di atas dapat dirumuskan sebagai:

$$V_{mc} = L_{mc} \frac{dI_{mc}}{dt} + R_{mc} I_{mc} + \frac{1}{C_{mc}} \int I_{mc} dt + V_p \quad (2.14)$$

$$F_e = n\Gamma V_p \quad (2.15)$$

Dimana:

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

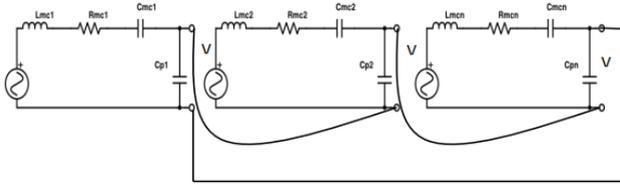
$$\Gamma = \sqrt{k_{31}k_p C_p}$$

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 Piezoelektrik

Piezoelectric dapat disusun secara seri dan paralel. Susunan dari *piezoelectric* ini dapat merubah sifat mekanik dan elektrik dari *piezoelektrik* yang bergantung dari bentuk susunan dari *piezoelectric* tersebut. Susunan material *piezoelektrik* secara paralel dapat dilihat pada gambar 2.10 (a). Karena *piezoelectric* disusun secara paralel, maka konstanta pegas dari material *piezoelectric* juga akan disusun secara paralel seperti yang terlihat pada gambar 2.10 (b). Sehingga material *piezoelectric* yang disusun secara paralel akan memiliki sifat mekanik sebagai berikut:



Gambar 2.9 Susunan paralel material piezoelectric (CHHABRA, 2018)

Konstanta pegas disusun paralel

- Untuk satu material *piezoelectric*
 $F_k = K \cdot x$
- Untuk *piezoelectric* yang disusun secara paralel dengan jumlah n

$$F_k = K_{eq} \cdot x \quad (2.16)$$

$$\text{dengan: } K_{eq} = n \cdot K \quad (2.17)$$

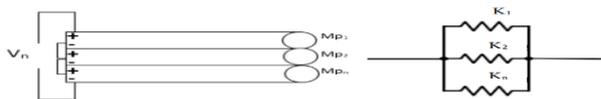
- Untuk keseluruhan jumlah massa M_p dapat dirumuskan dengan:

$$M_{eq} = M_1 + M_2 + \dots + M_n$$

atau,

$$M_{eq} = n \cdot M \quad (2.18)$$

Selanjutnya, tinjauan elektris untuk susunan material *piezoelectric* secara seri dapat dilihat seperti pada Gambar 2.11.



Gambar 2.10 Piezoelectric disusun secara seri (CHHABRA, 2018)

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

$$V_n = V_{p1} + V_{p2} + \dots + V_{pn}$$

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

$$V_n = n \cdot V_1 \quad (2.19)$$

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

$$I_n = I_1 = I_2 = \dots = I_n \quad (2.20)$$

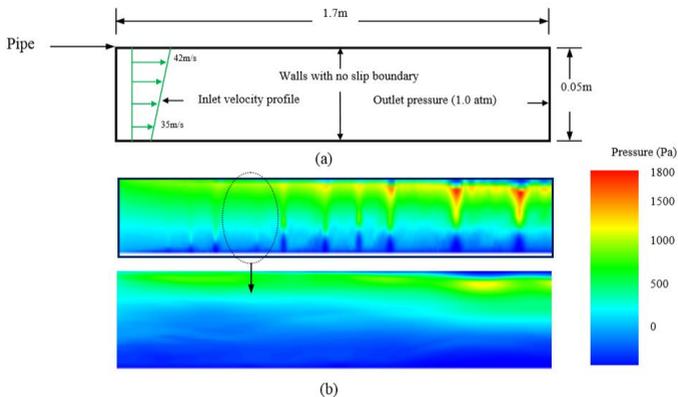
Dari persamaan pada rangkaian seri dapat disimpulkan bahwa dengan menyusun *piezoelectric* secara seri, maka voltase yang dihasilkan akan semakin meningkat. Sedangkan untuk arus yang dihasilkan akan tetap seiring dengan bertambahnya jumlah material *piezoelectric*.

2.5 Tinjauan Pustaka

Telah banyak dilakukan penelitian sejenis yang berkaitan dengan penelitian tugas akhir ini mengenai *energy harvesting* menggunakan *piezoelectric*. salah satu penelitian yang telah dilakukan adalah oleh *M. Arafa, 2015*, yang mirip dengan penelitian yang akan dilakukan ini, tetapi fluida yang digunakan pada penelitian tersebut menggunakan fluida gas yang dialirkan menggunakan blower. Pada penelitian tersebut dibagi menjadi 4 bagian utama, yang pertama membuat simulasi aliran turbulen berikut dengan respon dari struktur yang ada. Lalu pada bagian kedua merupakan pemodelan *electromechanics* dibuat, yaitu pergerakan dinamis dari *piezoelectric* untuk *energy harvesting* itu sendiri. Pada bagian ketiga dibuat eksperimen yang mendukung penelitian tersebut. Dan bagian keempat terdiri dari kesimpulan dan saran.

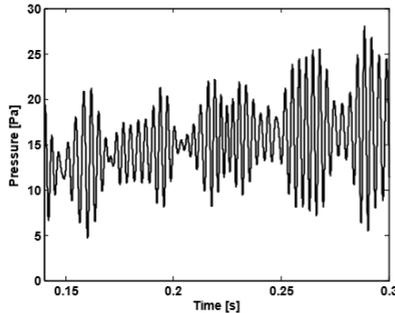
2.5.1 Simulation of induced loads

Pipa yang dipilih untuk analisis numerik dan eksperimen adalah pipa tembaga yang memiliki panjang 1,7m, diameter luar 0,05m dan ketebalan dinding 0,6mm seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1a. Domain fluida yang berudara, pada 300K, dimodelkan menggunakan model turbulen LES (Large Eddy Simulation). Pendekatan ini lebih sering digunakan daripada model turbulensi berbasis RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) lainnya karena kemampuannya untuk memprediksi distribusi tekanan turbulen pada batas struktur cairan. Tekanan semacam itu adalah sumber utama untuk membuat permukaan pipa bergetar.



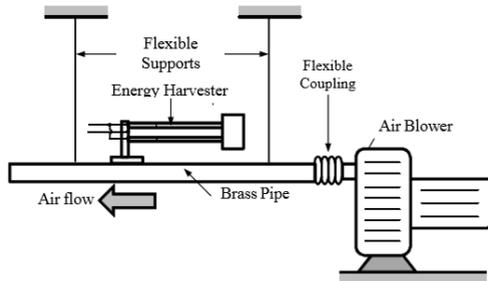
Gambar 2.11 hasil simulasi CFD aliran (Arafa, Akl, & Majeed, 2010)

Menggunakan analisis Computational Fluid Dynamics (CFD) saat ini, Gambar 3 menunjukkan tekanan pada titik yang representatif di dinding pipa, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1b



Gambar 2.12 Tekanan pada dinding pipa berdasarkan fungsi waktu (Arafa, Akl, & Majeed, 2010)

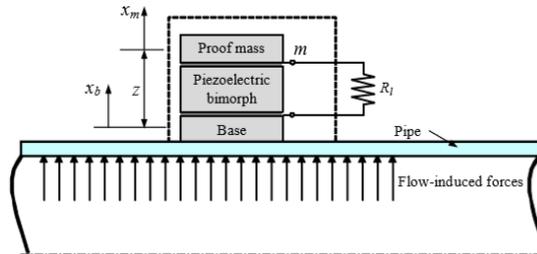
Electromechanical Model Of Harvester



Gambar 2.13 Skema pengujian sistem utama (Arafa, Akl, & Majeed, 2010)

Gambar diatas merupakan pemodelan sistem dinamis yang digunakan untuk *energy harvesting*. Sedangkan gambar dibawah

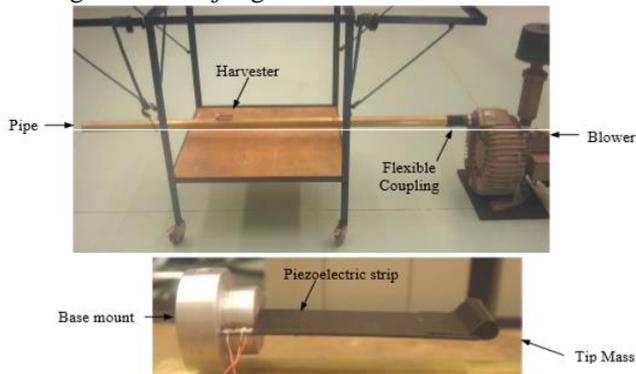
ini adalah *single Degree of Freedom (DoF)* yang terjadi ketika penelitian dikerjakan.



Gambar 2.14 Model sistem dinamis dari sistem utama (Arafa, Akl, & Majeed, 2010)

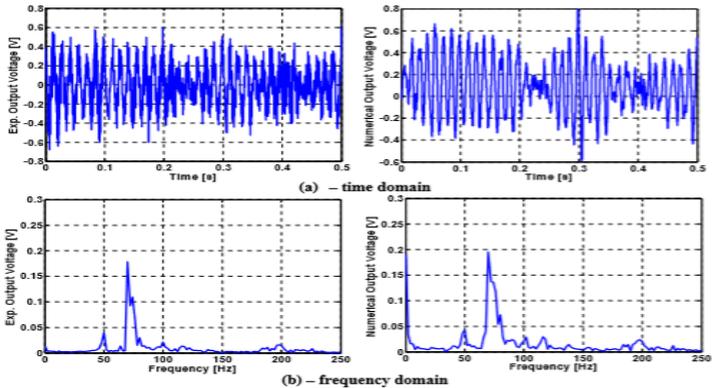
Experimental Work

pengaturan eksperimental yang terdiri dari peniup udara dan pipa kuningan ditahan pada posisinya oleh dua karet gelang fleksibel. Pipa diisolasi dari getaran blower dengan memasukkan kopling karet fleksibel seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10. Gambar 11 adalah pandangan close-up pemanen *piezoelectric* bersama dengan dengan massa ujung.



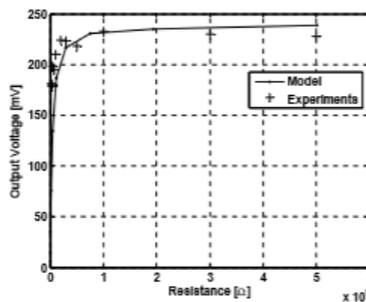
Gambar 2.15 Rancang bangun sistem utama untuk eksperimen (Arafa, Akl, & Majeed, 2010)

Dari simulasi dan eksperimen yang dilakukan, didapat grafik perbandingan *output voltage* dengan waktu maupun kecepatan.



Gambar 2.16 respon berdasarkan fungsi waktu (a) dan frekuensi (b) (Arafa, Akl, & Majeed, 2010)

Untuk lebih meyakinkan, dibuat juga grafik antara *load resistance* dengan voltase yang dihasilkan, antara simulasi dan eksperimen



Gambar 2.17 Voltase yang dihasilkan (Arafa, Akl, & Majeed, 2010)

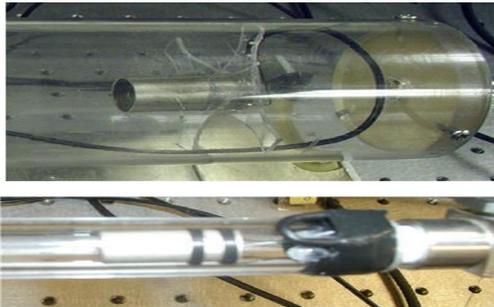
Upaya yang dilakukan dalam pekerjaan ini untuk memanen energi dari getaran pipa penyalur gas. Untuk tujuan ini, beban yang diinduksi turbulensi dan respons struktural selanjutnya diperkirakan menggunakan analisis Large Eddy Simulation (LES), dalam hubungannya dengan model elemen hingga dari pipa yang sedang diselidiki. Sebuah resonator *piezoelectric*, disetel pada salah satu mode getaran struktural, terbukti menjadi platform pemanen energi yang efisien. Fenomena ini disimulasikan baik secara teoritis menggunakan model SDOF dan secara eksperimental pada pipa kuningan yang menyampaikan udara tekan yang diatur oleh blower udara. Level daya yang dipanen berada di kisaran $0,4 \mu\text{W}$ untuk eksitasi dasar sekitar $0,02\text{g}$.

2.5.2 Power Generation in Pipeline

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



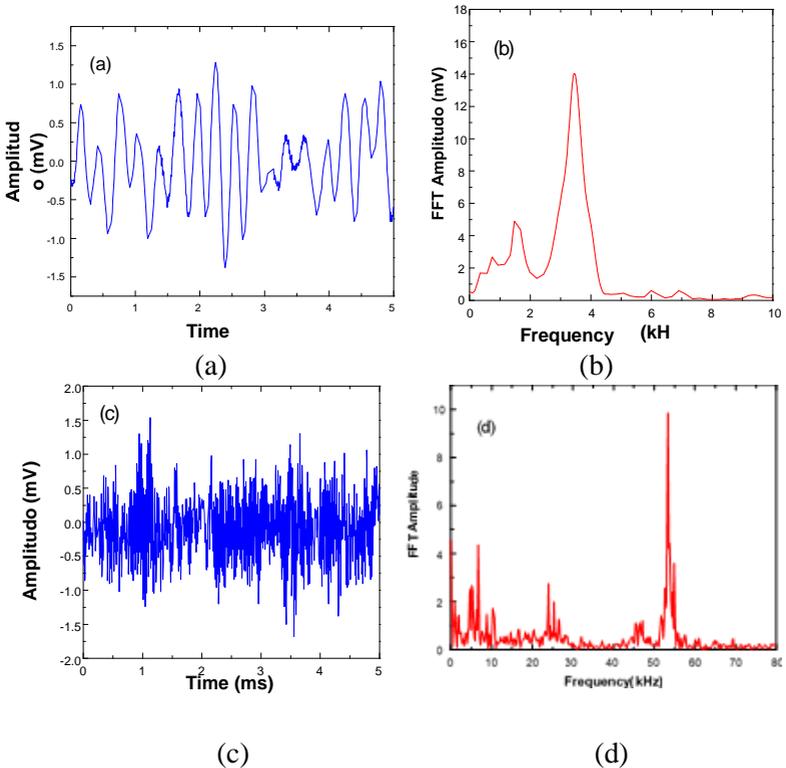
Gambar 2. 18 Eksperimen getaran pada pipa plexiglas menggunakan fluida gas Nitrogen (Sinha, 2005)



Gambar 2. 19 Dua piezoelectric silinder yang berbeda sebagai variasi penelitian (Sinha, 2005)

Variasi penelitian ini yaitu *piezoelectric* silinder, yang pertama pada gambar 2.19 atas dengan diameter 2-cm dan panjang 4 cm sedangkan pada gambar di bawahnya yaitu pada diameter 1 cm dan panjang 2.5cm. Hasil dari eksperimen dengan variasi beberapa nilai parameter dibentuk kedalam grafik. Diantaranya grafik hubungan amplitudo dengan waktu pada gambar 2.20 (a) yang menunjukkan sinyal elektrik yang diproduksi dengan

menggunakan *piezoelectric* silinder dengan diameter 2 cm, dan hubungan Fourier transform amplitudo terhadap frekuensi pada gambar 2.20 (b), sedangkan pada gambar 2.20 (c) dan (d) data yang sama dengan variasi ukuran silinder yang lebih kecil yang terbuat dari piezofilm.



Gambar 2. 20 Grafik hubungan amplitudo dengan waktu (a) dan (c), grafik hubungan FFT amplitudo dengan frekuensi (b) dan (d), grafik dengan data yang sama dengan variasi ukuran piezoelectric silinder (*Sinha, 2005*)

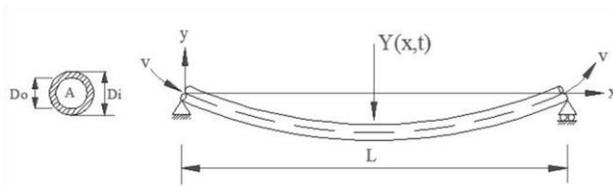
Dari grafik diatas kita dapat mengetahui karakteristik getaran pada aliran fluida pada tabung. Grafik diatas menunjukkan bahwa pada gambar 2.20 (b) dan (d) merepresentasikan frekuensi resonan pada tabung. Data-data ini didapatkan dari Fourier transform pada data waktu. Sedangkan pada gambar 2.20 (a) dan (c) menunjukkan hubungan amplitudo getaran terhadap waktu. Dari grafik diatas dapat disimpulkan bahwa semakin besar ukuran *piezoelectric* silinder yang digunakan dalam eksperimen maka akan menghasilkan amplitudo yang lebih tinggi.

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

2.5.3 Experimental and Simulation Study of flow Induced Vibration Through Straight Pipes

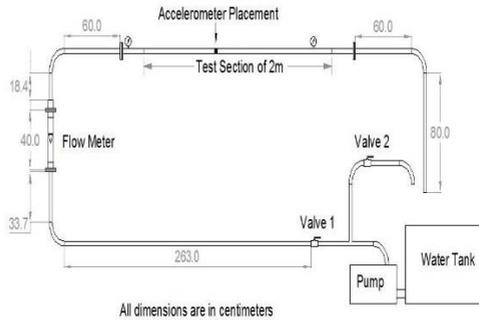
Penelitian tentang *energy harvesting* pada pipa terdahulu selanjutnya yaitu pada tahun 2017 oleh S. M. Khot, Pallavi Khaire, dan Abhishek S. Naik Bazle berjudul “*Experimental and Simulation Study of flow Induced Vibration Through Straight Pipes*” (S. M. Khot, 2017). Penelitian tersebut bertujuan untuk mempelajari efek dari faktor-faktor yang berkontribusi dalam terjadinya getaran pada pipa menggunakan teori, eksperimen, dan teknik simulasi dengan analisa getaran. Metodologi penelitian dilakukan perancangan sistem, simulasi dengan software, dan eksperimen. Pada perancangan sistem dijelaskan sifat dari fluida yang mengalir melalui pipa. Iyan Grant menjelaskan bahwa fluida yang mengalir pada tekanan tertentu, dan memiliki massa jenis pada kecepatan konstan yang melewati luas potong sebuah pipa

yang terdefleksi menyebabkan terjadinya akselerasi sentrifugal karena adanya perubahan lengkungan pada pipa yang terdeformasi. Akselerasi ini berlawanan dengan komponen vertikal dari tekanan fluida yang diberikan ke elemen fluida dan gaya tekanan F per panjang unit yang diterapkan pada elemen fluida dari dinding pipa. Gambar 2.21 menunjukkan pipa dengan defleksi transversal $Y(x,t)$ dari posisi equilibriumnya.

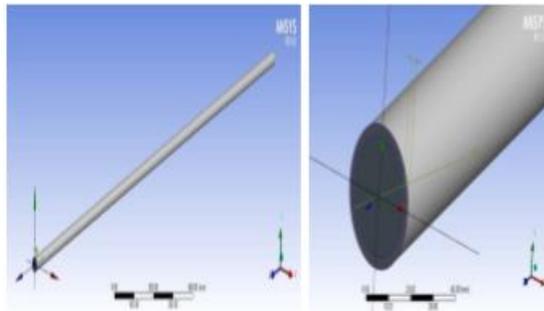


Gambar 2. 21 Pipa yang dialiri fluida dengan dijepit di kedua ujungnya (S. M. Khot, 2017)

Simulasi sistem getaran dilakukan menggunakan software ANSYS. Analisa sistem getaran dinamis terdiri dari analisa modal dan harmonic. Analisa modal bertujuan untuk mendapatkan frekuensi natural sistem dari getaran. Analisa model matematika untuk aliran fluida diselesaikan menggunakan MATLAB untuk mendapatkan nilai amplitudo dari getaran. Jangkauan frekuensi sekisar 0-700 Hz. Analisa harmonic bertujuan untuk mendapatkan plot frekuensi v/s amplitudo. Eksperimen dilakukan sesuai dengan perencanaan dengan memvariasikan beberapa komponen yaitu diameter, ketebalan, dan discharge. Skema eksperimen aliran fluida dan komponen dapat dilihat pada gambar 2.21 dan 2.22.

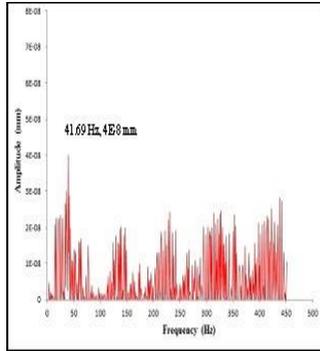


Gambar 2. 22 Skema loop aliran fluida pada pipa (S. M. Khot, 2017)

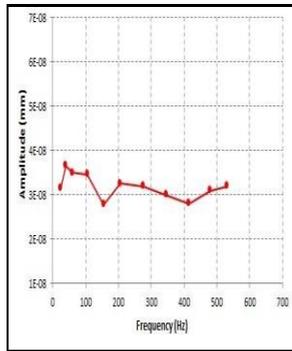


Gambar 2. 23 Simulasi getaran pada pipa (S. M. Khot, 2017)

Hasil dari perbandingan eksperimen dan simulasi dengan variasi beberapa nilai parameter dibentuk kedalam grafik. Diantaranya grafik hubungan amplitudo terhadap frekuensi dengan variasi discharge pada gambar 2.24 (a) dan (b), 2.25 (a) dan (b), dan gambar 2.26 (a) dan (b).

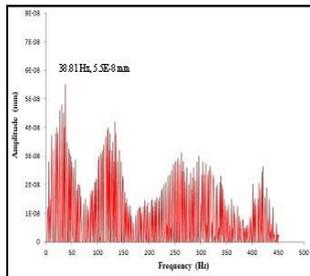


(a)

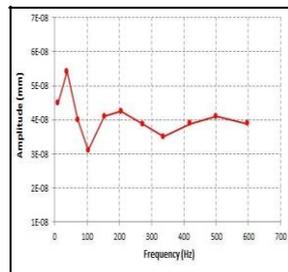


(b)

Gambar 2. 24 Grafik frekuensi untuk diameter 24mm, ketebalan 2.4mm, dan discharge 90 lpm (a) Experimental (b) Simulation (S. M. Khot, 2017)

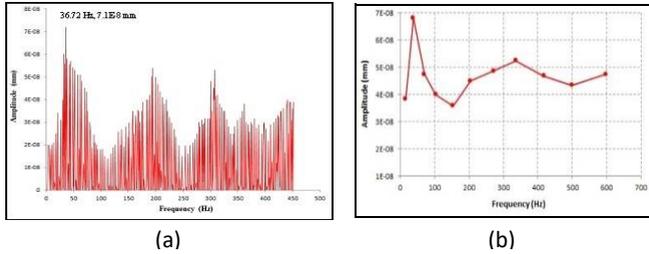


(a)



(b)

Gambar 2. 25 Grafik frekuensi untuk diameter 24mm, ketebalan 2.4mm, dan discharge 120 lpm (a) Experimental (b) Simulation (S. M. Khot, 2017)



Gambar 2. 26 Grafik frekuensi untuk diameter 24mm, ketebalan 2.4mm, dan discharge 150 lpm (a) Experimental (b) Simulation (S. M. Khot, 2017)

Gambar 2.24 (a), 2.25 (a) dan 2.26 (a) menunjukkan grafik eksperimen dan gambar 2.24 (b), 2.25 (b) dan 2.26 (b) menunjukkan grafik simulasi untuk diameter 24 mm, ketebalan 2.4 mm pada discharge 90 lpm, 120 lpm dan 150 lpm secara berurutan. Dari grafik dapat dilihat bahwa amplitudo getaran pada pipa yang dialiri fluida meningkat berbanding lurus dengan meningkatnya laju aliran volumetric untuk jangkauan aliran tertentu, meningkatnya diameter pada pipa berbanding terbalik dengan peningkatan amplitudo untuk nilai discharge tertentu, dan peningkatan ketebalan berbanding terbalik dengan peningkatan amplitudo getaran pada nilai discharge tertentu. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa faktor yang paling dominan yang mempengaruhi amplitudo getaran yaitu discharge pada aliran sebesar 87.305%, diikuti faktor diameter yang berkontribusi sebesar 9.63%, dan ketebalan sebagai kontribusi paling kecil yang mempengaruhi amplitudo sebesar 2.32%.

2.5.4 Vibration of a Turbulent Fluid Inside an Elbow Shaped Pipe

Penelitian mengenai getaran yang disebabkan cairan turbulen yang melewati bagian dalam pipa siku (*Vibration Analysis of a Turbulent Fluid Passing Inside an Elbow Shaped Pipe Section*) telah dilakukan sebelumnya oleh **Keshtkar H dan Jafari AA.**

Penelitian yang dilakukan oleh peneliti terdahulu ini dilakukan secara simulasi bertujuan untuk melihat fenomena pada cairan yang melewati sebuah sistem perpipaan yang dapat menyebabkan getaran internal didalam pipa. Semua getaran yang terjadi ini diidentifikasi dan diprediksi agar tidak menimbulkan kerusakan pada sistem perpipaan, apabila getaran yang ditimbulkan beresonansi sangat besar dan mendekati frekuensi alami dari sistem. **Keshtkar H dan Jafari AA** menggunakan *ABAQUS* sebagai pemecah CFD dan mempelajari *force vibration* dan *free vibration* yang disebabkan oleh aliran turbulensi fluida dengan kecepatan yang berbeda melalui pipa *elbow* 90°.

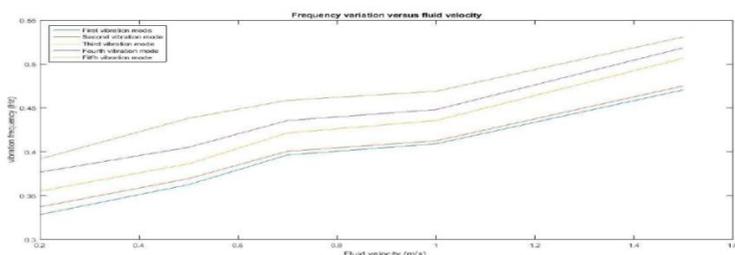
Pemodelan yang diterapkan pada penelitian ini menggunakan cairan berupa air pada suhu 20°C. Dengan memiliki harga *density* sebesar 1000 (kg/m³), harga *dynamic viscosity* sebesar 1,002 x 10⁻³ (N.S/m²), harga *kinematic viscosity* sebesar 1,004 x 10⁻⁶ (m²/s), dan air dianggap tidak dapat dimampatkan (*incompressible*).

Tabel 2.3 Natural frequency vibrations and mode Eigen value (*H & AA, 2017*)

Index	Mode value	Mode vibration
1	4.0581	0.32061 Hz
2	4.2921	0.32973 Hz
3	4.7978	0.34861 Hz
4	5.4132	0.37029 Hz
5	5.8002	0.38330 Hz

Tabel 2.4 Kecepatan fluida terhadap getaran yang diinduksi (*H & AA, 2017*)

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	0.3862 Hz	0.4050 Hz	0.4281 Hz
0.7 m/s	0.3963 Hz	0.4005 Hz	0.4214 Hz	0.4356 Hz	0.4586 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	0.5086 Hz	0.5185 Hz	0.4689 Hz



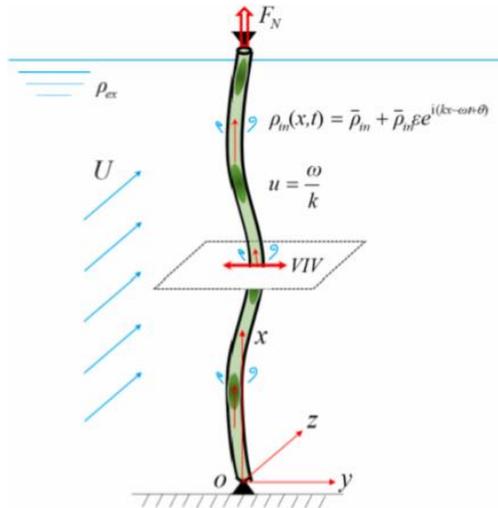
Gambar 2.27 *Vibration Frequency vs Fluid Velocity* (*H & AA, 2017*)

Dari penelitian yang telah dilakukan oleh **Keshtkar H dan Jafari AA** didapatkan bahwa dengan meningkatkan kecepatan fluida maka getaran yang ditimbulkan juga meningkat dan menyebabkan frekuensinya meningkat, hal ini ditunjukkan dengan tabel 2.3 dimana dengan mempertimbangkan frekuensi alami untuk pipa *elbow* 90° yang telah disimulasi sebelumnya, disimpulkan bahwa ada kemungkinan resonansi getaran terjadi pada kecepatan yang mendekati 0,2 m/s. Jadi, jika ingin membuat pipa dengan sifat-sifat yang disebutkan di atas, maka harus berhati-hati untuk tidak membiarkan kecepatan fluida turun di bawah 0,2 m / s - 0,3 m / s yang dapat mendorong terjadinya resonansi.

Dari penelitian yang telah dilakukan oleh **Keshtkar H dan Jafari AA** yang telah dilakukan juga didapatkan grafik *vibration frequency vs fluid velocity* seperti pada gambar 2.27. Dengan memplot grafik untuk setiap *case*, menunjukkan frekuensi getaran dari masing-masing mode. Perpotongan antara garis-garis ini mewakili fenomena yang disebut dengan "fluttering" yang pada dasarnya berarti kecepatan fluida telah mencapai nilai kritisnya didalam pipa dan dapat menyebabkan kerusakan pada badan pipa dengan getaran yang di induksi, karena pada simulasi ini garis-garis kecepatan konstan tidak berpotongan sehingga tidak ada fenomena *fluttering* dalam simulasi. Dalam simulasi ini juga menunjukkan dengan meningkatnya kecepatan aliran fluida, distribusi tekanan dan tegangan maksimal pada bagian pipa akan meningkat baik dalam besaran maupun area yang terpengaruh, efek dari meningkatnya tekanan pada bagian ini menyebabkan peningkatan perpindahan maksimum dari titik yang terpengaruh. Semakin besar tingkat perpindahan, semakin besar frekuensi getaran.

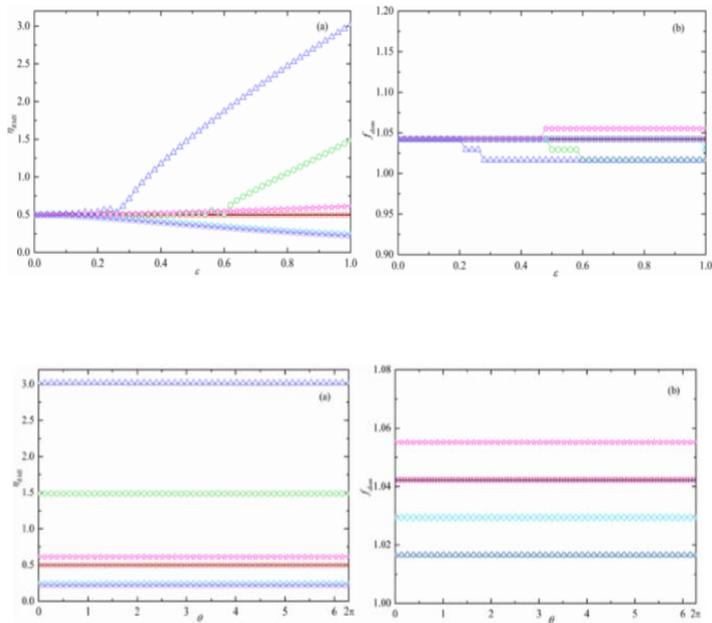
2.5.5 Dynamic response of undergoing vortex-induced vibrations with variable-density fluid

Penelitian tentang *energy harvesting* pada pipa terdahulu berikutnya yaitu pada tahun 2019 oleh Wude Xie et al berjudul "*An investigation of the nonlinear dynamic response of a flexible pipe undergoing vortex-induced vibrations and conveying internal fluid with variable-density*". Penelitian tersebut bertujuan untuk mengetahui pengaruh *Vortex-induced vibration* yang dihasilkan oleh variasi densitas dari *multi-phase* fluida yang mengalir pada pipa yang fleksibel menggunakan teori dan simulasi dengan analisa getaran. Metodologi penelitian dilakukan pemodelan matematika dan simulasi.



Gambar 2. 28 Model VIV pada pipa fleksibel (Xie, Gao, Wang, Xu, & Bai, 2019)

Dalam penelitian ini, variasi densitas fluida internal dipertimbangkan dan dimodelkan dengan model matematika. Pengaruhnya terhadap VIV pipa disimulasikan dan dianalisis secara numerik. Beberapa percobaan atau simulasi CFD perlu dilakukan di masa depan untuk mempelajari lebih lanjut VIV pipa fleksibel yang dipengaruhi oleh fluida variabel-kepadatan internal atau bahkan aliran multi-fase yang lebih kompleks, untuk mendapatkan pemahaman yang lebih baik tentang kompleks internal dan eksternal yang kompleks ini. interaksi cairan-struktur.



Gambar 2. 29 RMS yang dihasilkan dari perbedaan densitas fluida (Xie, Gao, Wang, Xu, & Bai, 2019)

Dari grafik diatas dapat disimpulkan, Ketika pipa dialiri fluida dengan densitas variabel, secara parametrik akan tereksitasi. Dengan teori Floquet, resonansi parametrik ditentukan termasuk resonansi parametrik sederhana dan resonansi kombinasi. Dengan naik turunnya amplitudo kerapatan fluida internal, sistem pipa akan menjadi lebih tidak stabil karena resonansi parametrik. Untuk nilai yang lebih besar dari nilai eigen maksimum dari matriks transisi keadaan, pipa akan lebih kuat dipengaruhi oleh fluida variabel-densitas internal.

Ketika pipa tereksitasi oleh fluida variabel-densitas internal dan VIV eksternal, respons dinamikanya akan berubah secara signifikan ketika mode dominasi VIV tereksitasi oleh densitas fluida internal yang bervariasi. Karena kontribusi dan kompetisi dari mode tereksitasi, perpindahan RMS dari pipa akan meningkat atau berkurang, perpindahan ruang-waktu yang bervariasi akan

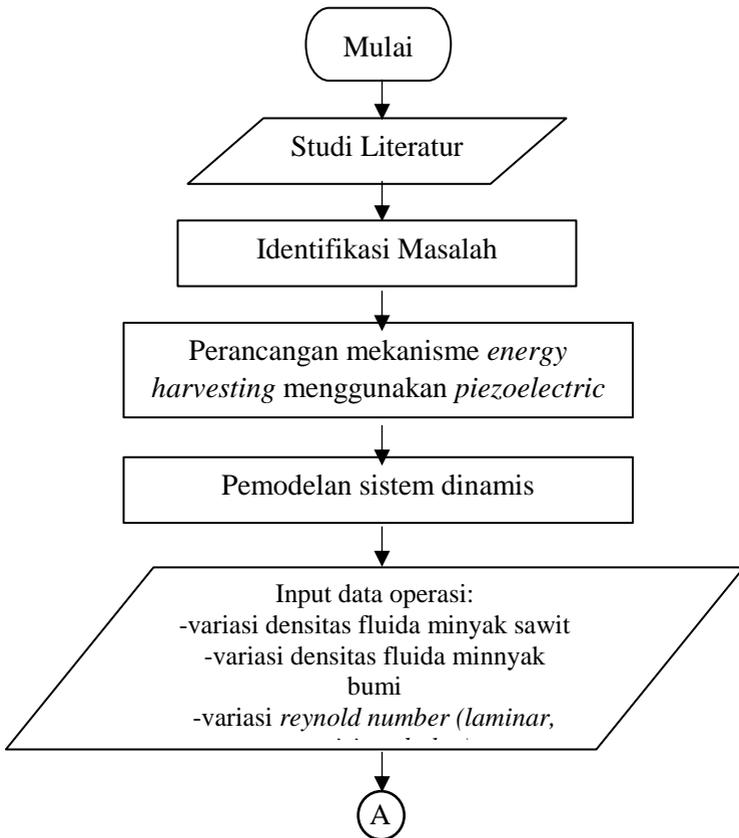
menjadi tidak seragam atau aperiodik, beberapa frekuensi respons tambahan akan muncul dan frekuensi dominan akan berubah. Dengan meningkatnya amplitudo fluktuasi densitas fluida internal, pengaruh fluida densitas variabel internal pada VIV pipa akan menjadi lebih jelas. Respons dinamis pipa jarang dipengaruhi oleh kondisi awal fluida variabel-densitas internal.

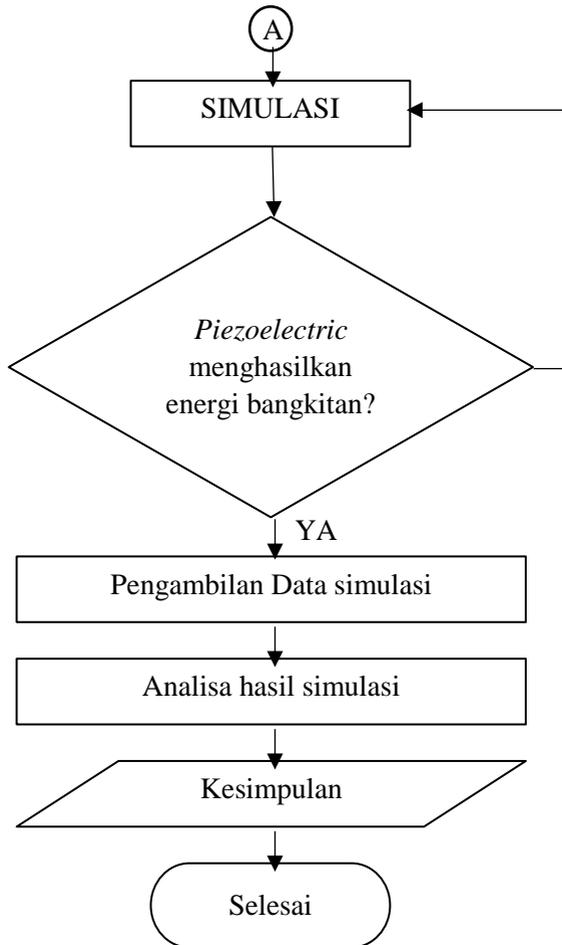
“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Flowchart Penelitian

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





Gambar 3. 1 *Flowchart* Penelitian

3.2 Penjelasan Flowchart Penelitian

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

3.2.1 Studi Literatur

Studi literatur merupakan langkah awal yang dilakukan pada penelitian ini, dengan mengumpulkan referensi-referensi dari *text book*, tugas akhir sebelumnya, dan jurnal internasional. Beberapa topik yang di ambil dari referensi tersebut antara lain tentang *multi degree of freedom*, *base motion vibration*, *dynamic vibration absorber*, *energy harvesting*, dan *piezoelectric*.

3.2.2 Identifikasi Masalah

Identifikasi masalah yang dilakukan pada penelitian ini terdiri dari *input* dan *output*. *Input* merupakan masukan yang diberikan pada penelitian ini, yaitu berupa variasi densitas fluida yang digunakan dalam sistem perpipaan. Dan variasi kecepatan fluida yang dialirkan masing masing pada kondisi laminar, transisi, dan turbulen pada sistem utama. Sedangkan *output* merupakan hasil yang didapatkan dalam penelitian ini, yaitu respon reduksi getaran sistem utama dan tegangan listrik sebagai energi yang dihasilkan dari *cantilever piezoelectric*.

3.2.3 Perancangan Mekanisme Cantilever Piezoelectric dan sistem utama

3.2.3.1 Perancangan Mekanisme Sistem Utama

Sistem utama yang dianalisa adalah sistem perpipaan.

Berikut merupakan spesifikasi dari pipa yang digunakan.

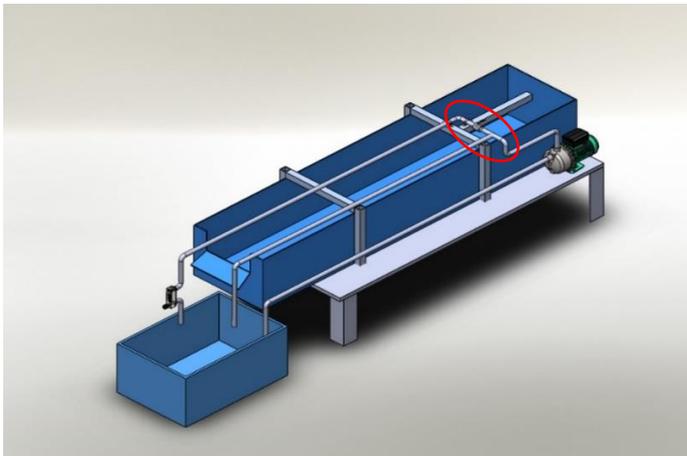
Jenis Mesin : Pipa lurus dan pipa elbow 90

Merk : Wavin

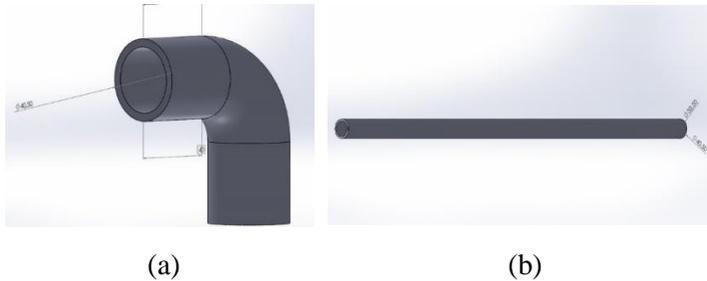
Tipe : AW

Bahan : PVC

Diameter : 1 inch



Gambar 3. 2 Rangkaian sistem perpipaan



Gambar 3. 3 Sistem utama (a) pipa elbow 90 (b) pipa lurus

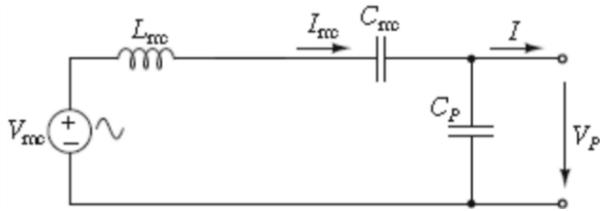
3.2.3.2 Pemodelan Kelistrikan Piezoelectric

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



Gambar 3. 4 Piezoelectric

Gambar 3.5 merupakan diagram sirkuit kelistrikan dari material *piezoelectric*. Material *piezoelectric* menghasilkan energi listrik apabila terjadi defleksi pada material tersebut. Energi listrik tersebut terdiri dari voltase, arus listrik, dan daya bangkitan.



Gambar 3. 5 Diagram sirkuit elektromagnetik *cantilever piezoelectric*

Dimana:

F_i : Gaya lendutan dari eksitasi (N)

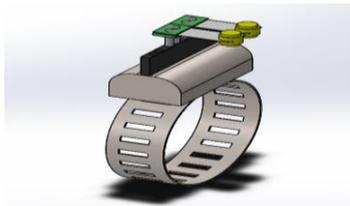
M : Massa (Kg)

d_s : Konstanta damping ekuivalen *piezoelectric* (Ns/m)

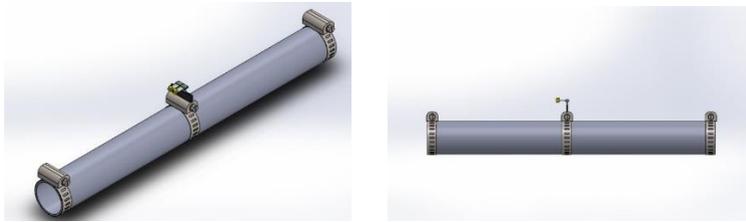
k_s : Konstanta pegas ekuivalen *piezoelectric* (N/m)

C_s : Kapasitansi *piezoelectric* (Farad)

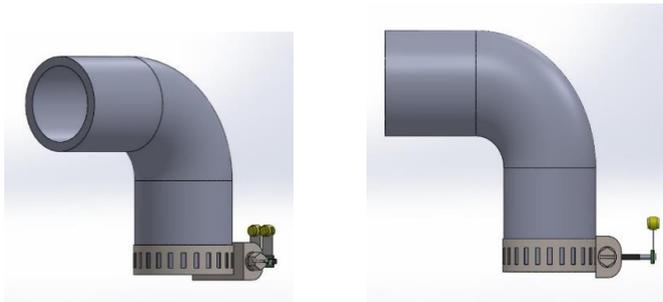
Penelitian ini dilakukan ketika sistem perpipaan dialiri fluida, sehingga terjadi getaran yang disebabkan aliran fluida didalam pipa yang mengalami turbulensi. Debit fluida kerja yang dialirkan oleh pompa 300 liter/menit dialirkan oleh pompa dengan daya masuk 1.1 kW dan daya keluar 0.4 kW. Debit fluida diatur oleh valve dan diukur dengan *flowmeter* untuk menentukan variasi yang telah ditentukan. Posisi peletakkan *piezoelectric* yang dianalisa pada penelitian ini yaitu pada pipa lurus dan elbow 90. Gambar 3.6 berikut merupakan sistem utama yang akan dianalisa pada penelitian ini.



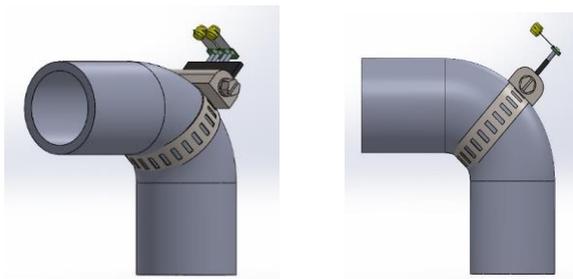
Gambar 3. 6 Model Clamp dan Piezoelectric



(a)



(b)

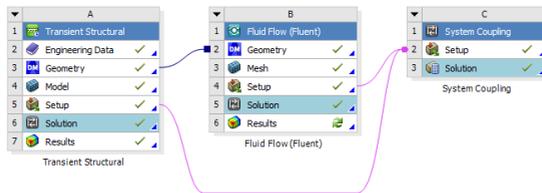


(c)

Gambar 3. 7 Sistem utama yang akan dianalisa yang telah dipasang piezoelectric (a) pipa lurus, (b) elbow 90 posisi 1 dan (c) elbow 90 posisi 2

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 3.8, dimana dibutuhkan 3 sistem analisa. Alur seperti ini juga disebut dengan *two way FSI (Fluid Structure Interaction)* dengan tujuan untuk mengetahui tingkah laku dari pipa setelah mendapatkan eksitasi dari fluida yang mengalir di dalamnya. Analisa yang diselesaikan terlebih dahulu adalah Fluent kemudian dilanjutkan ke *transient structural* untuk mendefinisikan kondisi pipa, setelah kedua *setup* selesai didefinisikan maka keduanya di-*coupling* menggunakan *system coupling* untuk mengetahui hasil dari analisisnya. Disimulasikan aliran turbulen dengan analisa k-epsilon.



Gambar 3. 8 Skema analisis pada Workbench ANSYS

3.2.5 Penggunaan Hasil dari ANSYS Sebagai Input Gaya Eksitasi pada Pemodelan Sistem Dinamis

Setelah dilakukan simulasi menggunakan *software* ANSYS, diketahui hasil berupa tekanan (P) yang akan digunakan sebagai data untuk menemukan nilai dari gaya eksitasi (F). langkah yang dilakukan adalah menentukan kecepatan (V) dengan menggunakan variasi densitas yaitu dengan rumus:

$$RE = \frac{\rho V D}{\mu}$$

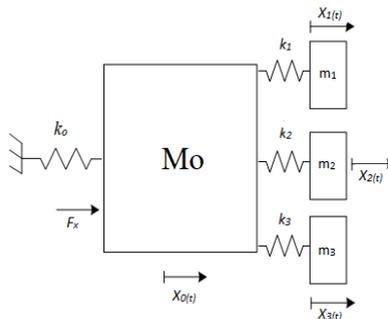
Ketika sudah menemukan kecepatan dari masing masing kondisi yaitu laminar, transisi, dan turbulen, maka dilanjutkan dengan simulasi menggunakan ANSYS dan didapatkan tekanan. Dari tekanan itu dilanjutkan mencari gaya eksitasi (F) dengan rumus:

$$P = \frac{F}{A}$$

3.2.6 Pemodelan Sistem Dinamis dan Penurunan Persamaan Gerak

Setelah mengetahui perancangan mekanisme *Piezoelectric* dan peletakannya pada system perpipaan, maka langkah selanjutnya yaitu menentukan model dinamis dari sistem utama. Model dinamis dari sistem utama dilakukan untuk memudahkan dalam penentuan *Free Body Diagram* (FBD). Gambar 3.9 berikut merupakan pemodelan sistem dinamis pada sistem utama tanpa *piezoelectric* dan sistem utama dengan *piezoelectric* $F_{x(t)}$

3.2.5.1 Pemodelan Sistem Dinamis Pipa Lurus

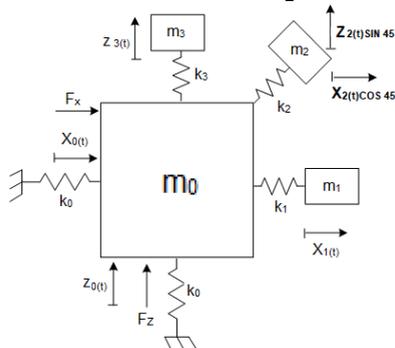


Gambar 3.9 Model Dinamis Pipa Lurus Dengan *piezoelectric*

Keterangan :

- m_0 : Massa utama
- m_1 : Massa piezoelektrik 1
- m_2 : Massa piezoelektrik 2
- m_3 : Massa piezoelektrik 3
- k_0 : konstanta pegas massa utama
- k_1 : Konstanta pegas *piezoelectric* 1
- k_2 : Konstanta pegas *piezoelectric* 2
- k_3 : Konstanta pegas *piezoelectric* 3
- F_x : Gaya eksitasi dari fluida

3.2.5.2 Pemodelan Sistem Dinamis Pipa Elbow Dengan *piezoelectric*



Gambar 3. 10 Model Dinamis Pipa Elbow Dengan *piezoelectric*

Keterangan :

- m_0 : Massa utama
- m_1 : Massa piezoelektrik 1
- m_2 : Massa piezoelektrik 2
- m_3 : Massa piezoelektrik 3
- k_{0x} : Konstanta pegas massa utama arah X
- k_{0z} : Konstanta pegas massa utama arah Z
- k_1 : Konstanta pegas *piezoelectric* 1

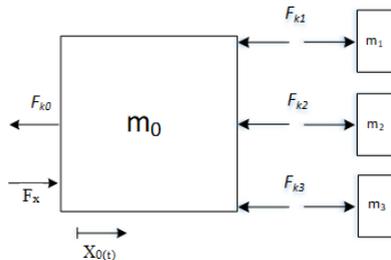
- k_2 : Konstanta pegas *piezoelectric* 2
- k_3 : Konstanta pegas *piezoelectric* 3
- F_x : Gaya eksitasi dari fluida arah X
- F_z : Gaya eksitasi dari fluida arah Z

3.2.5.3 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*:

A. Sistem Utama Pipa Lurus Dengan *Piezoelectric*

- Persamaan Gerak Pipa (m_0)



Gambar 3.11 Free Body Diagram Massa Pipa (m_0)

Keterangan:

- m_0 : Massa pipa
- m_1 : Massa *piezoelectric*
- m_2 : Massa *piezoelectric*
- m_3 : Massa *piezoelectric*
- F_{k0} : Gaya pegas dari pipa
- F_{k1} : Gaya pegas dari *piezoelectric*
- F_{k2} : Gaya pegas dari *piezoelectric*
- F_{k3} : Gaya pegas dari *piezoelectric*

F_x : Gaya eksitasi fluida arah sumbu X

Besarnya masing-masing gaya yaitu:

$$F_{k_0} = k_0 x_0$$

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

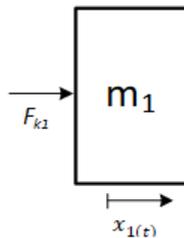
$$F_{k_2} = k_2(x_0 - x_2)$$

$$F_{k_3} = k_3(x_0 - x_3)$$

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

$$\begin{aligned}
 + \rightarrow \sum F &= m_0 \ddot{x}_0 \\
 F_x - F_{k_0} - F_{k_1} - F_{k_2} - F_{k_3} &= m_0 \ddot{x}_0 \\
 m_0 \ddot{x}_0 + k_0 x_0 + k_1(x_0 - x_1) + k_2(x_0 - x_2) \\
 &\quad + k_3(x_0 - x_3) = F_x \\
 m_0 \ddot{x}_0 + (k_0 + k_1 + k_2 + k_3)x_0 \\
 &\quad - k_1 x_1 - k_2 x_2 - k_3 x_3 = F_x
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

- Persamaan Gerak *Piezoelectric* 1 (m_1)



Gambar 3.12 Free Body Diagram Massa *Piezoelectric* 1 (m_1)

Keterangan:

M_1 : Massa *Piezoelectric* 1

F_{k_1} : Gaya pegas dari *Piezoelectric* 1

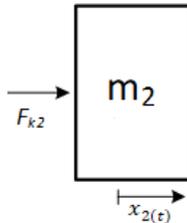
Besarnya masing-masing gaya yaitu:

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

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

$$\begin{aligned}
 +\rightarrow \sum F &= m_1 \ddot{x}_1 \\
 F_{k_1} &= m_1 \ddot{x}_1 \\
 m_1 \ddot{x}_1 - k_1(x_0 - x_1) &= 0 \\
 m_1 \ddot{x}_1 - k_1 x_0 + k_1 x_1 &= 0
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

- Persamaan Gerak *Piezoelectric* 2 (m_2)



Gambar 3.13 Free Body Diagram Massa *Piezoelectric* 2 (m_2)

Keterangan:

M_2 : Massa *Piezoelectric* 2

F_{k_2} : Gaya pegas dari *Piezoelectric* 2

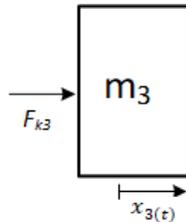
Besarnya masing-masing gaya yaitu:

$$F_{k_2} = k_2(x_0 - x_2)$$

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

$$\begin{aligned}
 +\rightarrow \sum F &= m_2 \ddot{x}_2 \\
 F_{k_2} &= m_2 \ddot{x}_2 \\
 m_2 \ddot{x}_2 - k_2(x_0 - x_2) &= 0 \\
 m_2 \ddot{x}_2 - k_2 x_0 + k_2 x_2 &= 0
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

- Persamaan Gerak *Piezoelectric* 3 (m_3)



Gambar 3.14 Free Body Diagram massa *piezoelectric* 3 (m_3)

Keterangan:

M_3 : Massa *Piezoelectric* 3
 F_{k_3} : Gaya pegas dari *Piezoelectric* 3

Besarnya masing-masing gaya yaitu:

$$F_{k_3} = k_3(x_0 - x_3)$$

Berdasarkan persamaan diatas, maka didapat persamaan gerak translasi terhadap sumbu y pada *piezoelectric* 3 (m_3) sebagai berikut :

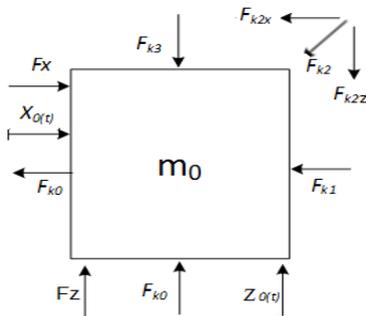
$$\begin{aligned}
 + \rightarrow \sum F &= m_3 \ddot{x}_3 \\
 F_{k_3} &= m_3 \ddot{x}_3 \\
 m_3 \ddot{x}_3 - k_3(x_0 - x_3) &= 0 \\
 m_3 \ddot{x}_3 - k_3 x_0 + k_3 x_3 &= 0
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

Matriks dari persamaan 4 DOF (3.1),(3.2), (3.3) dan (3.4) diatas adalah sebagai berikut:

$$\begin{pmatrix} m_0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_3 \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_0 \\ \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_3 \end{Bmatrix} + \begin{pmatrix} (k_0 + k_1 + k_2 + k_3) & -k_1 & -k_2 & -k_3 \\ -k_1 & k_1 & 0 & 0 \\ 0 & -k_2 & k_2 & 0 \\ 0 & 0 & -k_3 & k_3 \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} F_x \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \tag{3.5}$$

B. Sistem Utama Pipa Elbow dengan *Piezoelectric*

- Persamaan Gerak Pipa Elbow (m_0)



Gambar 3.15 Free Body Diagram Sistem utama pipa *elbow*

Keterangan:

- m_0 : Massa pipa
- $F_{k_{0x}}$: Gaya pegas dari pipa arah sumbu X
- $F_{k_{0z}}$: Gaya pegas dari pipa arah sumbu Z
- F_{k_1} : Gaya pegas dari *piezoelectric* 1
- F_{k_2} : Gaya pegas dari *piezoelectric* 2
- $F_{k_{2x}}$: Gaya pegas dari *piezoelectric* 2 arah sumbu X
- $F_{k_{2z}}$: Gaya pegas dari *piezoelectric* 2 arah sumbu Z
- F_{k_3} : Gaya pegas dari *piezoelectric* 3
- F_z : Gaya eksitasi fluida arah sumbu Z
- F_x : Gaya eksitasi fluida arah sumbu X

Besarnya masing-masing gaya yaitu:

$$\begin{aligned}
 F_{k_{0x}} &= k_0 x_0 \\
 F_{k_{0z}} &= k_0 z_0 \\
 F_{k_1} &= k_1 (x_0 - x_1) \\
 F_{k_{2x}} &= k_2 (x_0 - \theta_x x_2) \\
 F_{k_{2z}} &= k_2 (z_0 - \theta_z z_2) \\
 F_{k_3} &= k_3 (z_0 - z_3)
 \end{aligned}$$

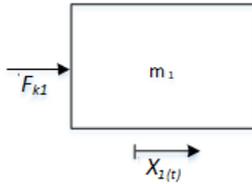
Berdasarkan persamaan diatas, maka didapat persamaan gerak translasi terhadap sumbu Z pada pipa (m_0) sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 +\uparrow \sum F &= m_0 \ddot{z}_0 \\
 F_z - F_{k_{0z}} - F_{k_{2z}} - F_{k_{3z}} &= m_0 \ddot{z}_0 \\
 m_0 \ddot{z}_0 + k_0 z_0 + k_2 (z_0 - \theta_z z_2) + k_3 (z_0 - z_3) &= F_z \\
 m_0 \ddot{z}_0 + (k_0 + k_2 + k_3) z_0 - k_2 z_2 - k_3 z_3 &= F_z \quad (3.6)
 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
 +\rightarrow \sum F &= m_0 \ddot{x}_0 \\
 F_x - F_{k_{0x}} - F_{k_1} - F_{k_{2x}} &= m_0 \ddot{x}_0 \\
 m_0 \ddot{x}_0 + k_0 x_0 + k_1(x_0 - x_1) + k_2(x_0 - \theta_x x_2) &= F_x \\
 m_0 \ddot{y}_0 + (k_0 + k_2 + k_3)x_0 - k_1 x_0 - k_2 \theta_x x_2 &= F_x \quad (3.7)
 \end{aligned}$$

- Persamaan Gerak *Piezoelectric* 1 (m_1)



Gambar 3.16 Free Body Diagram *inlet elbow*

Keterangan:

M_1 : Massa *Piezoelectric* 1

F_{k_1} : Gaya pegas dari *Piezoelectric* 1

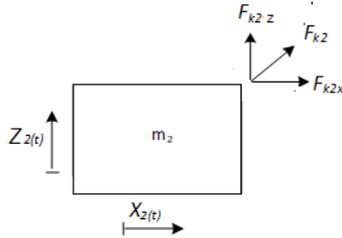
Besarnya masing-masing gaya yaitu:

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

Berdasarkan persamaan diatas, maka didapat persamaan gerak translasi terhadap sumbu y pada benda kerja (m_2) sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 +\rightarrow \sum F &= m_0 \ddot{x}_0 \\
 F_{k_1} &= m_1 \ddot{x}_1 \\
 m_1 \ddot{x}_1 - k_1(x_0 - x_1) &= 0 \\
 m_1 \ddot{y}_1 - k_1 x_0 + k_1 x_1 &= 0 \quad (3.8)
 \end{aligned}$$

- Persamaan Gerak *Piezoelectric 2* (m_2)



Gambar 3.17 Free Body Diagram belokan pipa *elbow*

Keterangan:

- m_2 : Massa *piezoelectric 2*
 F_{k_2} : Gaya pegas dari *piezoelectric 2*
 $F_{k_{2x}}$: Gaya pegas dari *piezoelectric 2* arah sumbu X
 $F_{k_{2z}}$: Gaya pegas dari *piezoelectric 2* arah sumbu Z

Besarnya masing-masing gaya yaitu:

$$F_{K_{2x}} = k_2(x_0 - \theta_x x_2)$$

$$F_{K_{2z}} = k_2(z_0 - \theta_z z_2)$$

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

$$+\rightarrow \sum F = m_2 \ddot{x}_2$$

$$F_{k_{2x}} = m_2 \ddot{x}_2$$

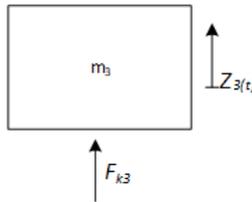
$$m_2 \ddot{x}_2 - k_2(x_0 - \theta_x x_2) = 0$$

$$m_2 \ddot{x}_2 - k_2 x_0 + k_2 \theta_x x_2 = 0 \quad (3.9)$$

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

$$\begin{aligned}
 +\uparrow \sum F &= m_2 \ddot{z}_2 \\
 F_{k_{2z}} &= m_2 \ddot{z}_2 \\
 m_2 \ddot{z}_2 - k_2(z_0 - \theta_z z_2) &= 0 \\
 m_2 \ddot{z}_2 - k_2 z_0 + k_2 \theta_z z_2 &= 0
 \end{aligned} \tag{3.10}$$

- Persamaan Gerak *Piezoelectric* 3 (m_3)



Gambar 3.18 Free Body Diagram *outlet* pipa elbow

Keterangan:

M_3 : Massa *Piezoelectric* 3

F_{k_3} : Gaya pegas dari *Piezoelectric* 3

Besarnya masing-masing gaya yaitu:

$$F_{k_3} = k_3(z_0 - z_3)$$

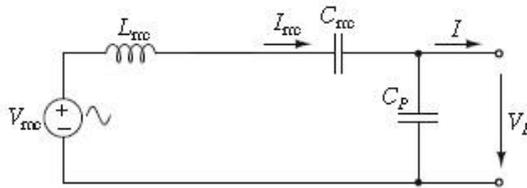
Berdasarkan persamaan diatas, maka didapat persamaan gerak translasi terhadap sumbu Z pada *piezoelectric* 3 (m_3) sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 +\uparrow \sum F &= m_3 \ddot{z}_3 \\
 F_{k_3} &= m_3 \ddot{z}_3 \\
 m_3 \ddot{z}_3 - k_3(z_0 - z_3) &= 0 \\
 m_3 \ddot{z}_3 - k_3 z_0 + k_3 z_3 &= 0
 \end{aligned}$$

$$\begin{pmatrix} m_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{x}_0 \\ \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{z}_0 \\ \ddot{z}_1 \\ \ddot{z}_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} k_1 + k_2 + k_3 & -k_1 & -k_2\theta_x & 0 & 0 & 0 \\ -k_1 & k_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -k_2 & 0 & k_2\theta_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_1 + k_2 + k_3 & -k_2\theta_x & -k_3 \\ 0 & 0 & 0 & -k_2 & k_2\theta_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -k_3 & 0 & k_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \\ z_0 \\ z_1 \\ z_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_x \\ 0 \\ 0 \\ F_z \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.11)$$

3.2.5.4 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 3.19 Diagram sirkuit elektromagnetik cantilever piezoelectric

$$V_p = \frac{3d_{31}E_p w_p t}{4C} X_p \quad (3.12)$$

$$F = \Gamma V_p \quad (3.13)$$

$$= Kpe X_p \quad (3.14)$$

Dimana:

V_p	= Voltase piezoelectric
d_{31}	= Voltage constant
E_p	= Modulus elastisitas
W_p	= Lebar piezoelectric
t	= Tebal piezoelectric
C	= Piezoelectric capasitance
X_p	= Defleksi piezoelectric
n	= Jumlah piezoelectric
Γ	= electromechanical factor piezoelectric
K_{pe}	= Konstanta pegas piezoelectric ekivalen

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

$$V_{mc} = L_{mc} \frac{dI_{mc}}{dt} + R_{mc} I_{mc} + \frac{1}{C_{mc}} \int I_{mc} dt + V_p \quad (3.15)$$

$$I_{mc} = \frac{1}{L_{mc}} (V_{mc} - R_{mc} I_{mc} - \frac{1}{C_{mc}} \int I_{mc} dt - V_p) \quad (3.16)$$

dimana:

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

dengan :

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

Sehingga daya bangkitan dari piezoelectric dapat dirumuskan dengan :

$$P = V_p I_{mc} \quad (3.17)$$

dimana :

P = Daya bangkitan piezoelectric (Watt)

I_{mc} = Arus bangkitan piezoelectric (Ampere)

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 alat pengukur. 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 ratio</i>	0,410	
<i>Density</i>	1400 kg/m ³	
<i>Roughness Constant</i>	0,05	
Properties	Jenis	
	Minyak Sawit	Minyak Bumi
Kecepatan fluida (RE= 1500 ; 2500 ; 3500)	1,59m/s ; 3,19m/s ; 4,79m/s	0,44m/s ; 0,95m/s ; 1,43m/s
<i>Temperature</i>	50°C	50°C
<i>Density</i>	875,1 kg/m ³	870 kg/m ³
<i>Dynamic viscosity</i>	23,68 x 10 ⁻³ kg/m.s	7,04 x 10 ⁻³ kg/m.s
<i>Kinematic viscosity</i>	27,06 x 10 ⁻⁶ m ² /s	8,8 x 10 ⁻⁶ m ² /s
<i>Gravitasi</i>	9,81 m ² /s	9,81 m ² /s

Tabel 3.2 Parameter sistem utama

Keterangan	Parameter	Nilai	
Massa pipa	m ₀	Pipa Lurus	<i>Elbow</i>
		0,6408 kg	0,1609 kg
Massa ekuivalen <i>piezoelectric</i> 1	m ₁	12 x 10 ⁻⁴ kg	
Massa ekuivalen <i>piezoelectric</i> 2	m ₂	12 x 10 ⁻⁴ kg	
Massa ekuivalen <i>piezoelectric</i> 3	m ₃	12 x 10 ⁻⁴ kg	
Konstanta pegas pipa	k ₀	Pipa Lurus	<i>Elbow</i>
		2618,18 N/mm	1258,05 N/mm
Konstanta pegas ekuivalen <i>piezoelectric</i> 1	k ₁	11,5 x 10 ⁻¹ N/m ²	
Konstanta pegas ekuivalen <i>piezoelectric</i> 2	k ₂	11,5 x 10 ⁻¹ N/m ²	
Konstanta pegas ekuivalen <i>piezoelectric</i> 3	k ₃	11,5 x 10 ⁻¹ N/m 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}	5.75×10^{-1} N/m
Modulus young	E	3×10^9 N/m ²
Frekuensi resonansi	f_r	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 *piezoelectric* adalah ekuivalen dari 2 massa piezo pada suatu titik.

- Massa elbow

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

$$v = A \times L$$

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

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

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

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

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

- Massa Pipa Lurus

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

$$v = A \times L$$

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

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

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

$$M_{\text{fluid}} = v \times \rho = 6,49 \times 10^{-5} \times 1000 = 0,65 \text{ kg}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Massa pipa lurus} &= M_{\text{timbang}} + M_{\text{fluid}} \\
 &= 0,033 + 0,6158 \\
 &= 0,6488 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

- Massa Piezoelectric

Piezoelectric yang digunakan adalah *Minisense 100 vibration sensor* seperti gambar 3.4 dengan massa 6×10^{-4} kg. Pada satu titik terdapat 2 *cantilever* piezoelekterik, maka massa ekuivalen dihitung sebagai berikut:

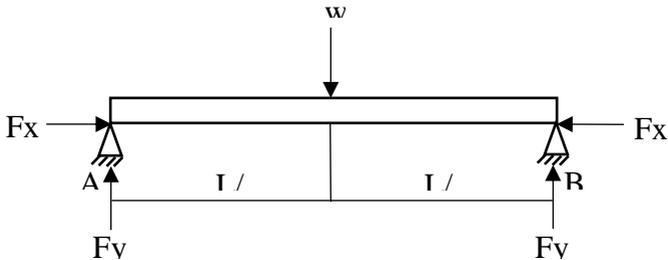
$$M_{eq} = M_{pzt} + M_{pzt}$$

$$M_{eq} = 6 \times 10^{-4} \text{ kg} + 6 \times 10^{-4} \text{ kg}$$

$$M_{eq} = 12 \times 10^{-4} \text{ kg}$$

3.3.2 Menentukan Parameter Kekakuan (k)

3.3.2.1 Pipa Lurus



Gambar 3. 20 Free Body Diagram Pipa Lurus

- Arah gaya pada sumbu x

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

$$F_{x_A} - F_{x_B} = 0 \quad (3.18)$$

- Arah gaya pada sumbu y

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

$$F_{y_A} + F_{y_B} - w = 0$$

$$F_{y_A} + F_{y_B} = w$$

$$F_{y_A} = w - F_{y_B} \quad (3.19)$$

- Gaya momen pada titik A

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

$$F_{y_B} L - w \frac{L}{2} = 0$$

$$F_{y_B} L = w \frac{L}{2}$$

$$F_{y_B} = \frac{w}{2} \quad (3.20)$$

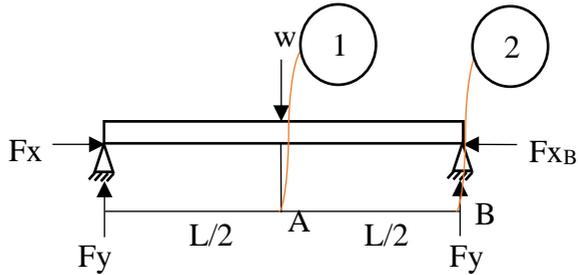
Sehingga akan didapatkan:

$$F_{y_A} = w - F_{y_B}$$

$$F_{y_A} = w - \frac{w}{2}$$

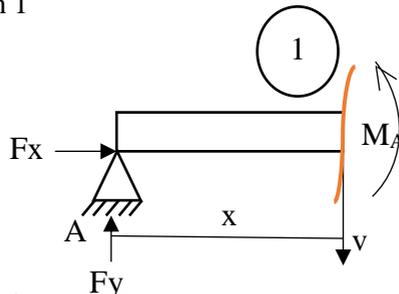
$$Fy_A = \frac{w}{2} \quad (3.21)$$

- Potongan untuk menganalisa defleksi benda kerja



Gambar 3. 21 Potongan Pipa Lurus

- Potongan 1



Gambar 3. 22 Potongan 1 Pipa Lurus

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

- Gaya pada arah y

$$+\downarrow \Sigma Fy = 0$$

$$Fy_A - v = 0$$

$$Fy_A = v$$

$$\frac{F}{2} = v$$

(3.22)

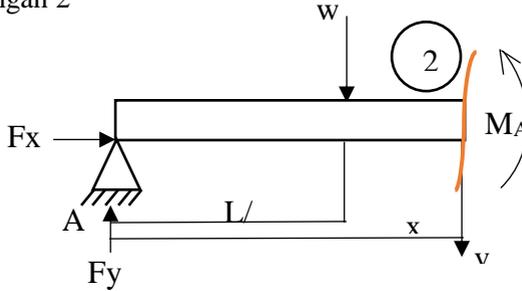
- Momen pada titik potong 1

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

$$M_A - Fy_A(x) = 0$$

$$\begin{aligned}
 M_A &= Fy_A x \\
 M_A &= \frac{w}{2} x
 \end{aligned}
 \tag{3.23}$$

- Potongan 2



Gambar 3. 23 Potongan 2 Pipa Lurus

Untuk $L/2 \leq x \leq L$

- Gaya pada arah y

$$\begin{aligned}
 +\downarrow \Sigma Fy &= 0 \\
 Fy_A - w - v &= 0 \\
 Fy_A - w &= v \\
 \frac{w}{2} - w &= v \\
 v &= -w/2
 \end{aligned}
 \tag{3.24}$$

- Momen pada titik potong 2

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

$$\begin{aligned}
 M_A - Fy_A x + w(x - \frac{L}{2}) &= 0 \\
 M_A &= Fy_A x - w(x - \frac{L}{2}) \\
 M_A &= Fy_A x - wx + w \frac{L}{2} \\
 M_A &= \frac{w}{2} x - wx + w \frac{L}{2} \\
 M_A &= -\frac{w}{2} x + w \frac{L}{2}
 \end{aligned}
 \tag{3.25}$$

Misal $x = L$

$$M_A = -\frac{w}{2}L + w\frac{L}{2}$$

$$M_A = 0$$

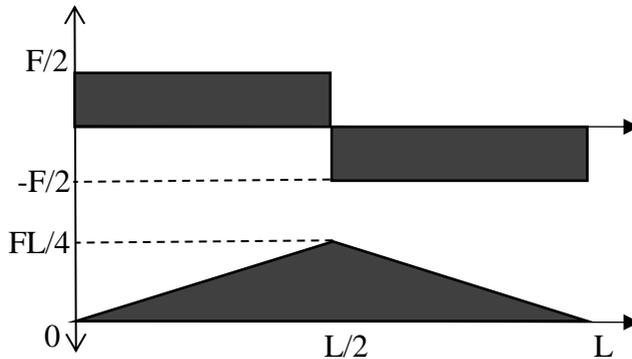
Misal $x = L/2$

$$M_A = -\frac{w}{2}\left(\frac{L}{2}\right) + w\frac{L}{2}$$

$$M_A = -\frac{wL}{4} + w\frac{L}{2}$$

$$M_A = \frac{wL}{4}$$

(3.26)



Gambar 3.24 Diagram *shear* dan diagram momen pipa lurus

Metode double integral:

$$\text{Boundary condition} \rightarrow \theta = \frac{dv}{dx} = 0 \text{ pada } x = L/2$$

$$v = 0 \text{ pada } x = 0$$

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

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

$$EI \frac{d^2v}{dx^2} = \frac{w}{2}x$$

$$EI \frac{dv}{dx} = \frac{w}{4}x^2 + c_1 \quad (3.27)$$

$$EI v = \frac{w}{12}x^3 + c_1x + c_2 \quad (3.28)$$

Mencari nilai c_1 dan c_2

Untuk $\theta = \frac{dv}{dx} = 0$ pada $x = L/2$

$$EI \frac{dv}{dx} = \frac{w}{4}x^2 + c_1$$

$$EI (0) = \frac{w}{4}\left(\frac{L}{2}\right)^2 + c_1$$

$$c_1 = -\frac{wL^2}{16} \quad (3.29)$$

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

$$EI v = \frac{w}{12}x^3 + c_1x + c_2$$

$$EI v = \frac{w}{12}\left(\frac{L}{2}\right)^3 + \left(\frac{-wL^2}{16}\right)\left(\frac{L}{2}\right) + 0$$

$$EI v = \frac{w}{12}\left(\frac{L^3}{8}\right) - \frac{wL^3}{32} + 0$$

$$EI v = \frac{wL^3}{96} - \frac{3wL^3}{32}$$

$$EI v = \frac{-2wL^3}{96}$$

$$v = -\frac{wL^3}{48EI}$$

Sehingga defleksi maksimumnya adalah

$$v = \frac{-wL^3}{48EI} \quad (3.30)$$

Untuk $L/2 \leq x \leq L$

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

$$EI \frac{d^2v}{dx^2} = -\frac{w}{2}x + w\frac{L}{2}$$

$$EI \frac{dv}{dx} = -\frac{w}{4}x^2 + w\frac{L}{2}x + c_1 \quad (3.31)$$

$$EI v = -\frac{w}{12}x^3 + w\frac{L}{4}x^2 + c_1x + c_2 \quad (3.32)$$

Mencari nilai c_1 dan c_2

Untuk $\theta = \frac{dv}{dx} = 0$ pada $x = L/2$

$$EI \frac{dv}{dx} = -\frac{w}{4}x^2 + w\frac{L}{2}x + c_1$$

$$0 = -\frac{w}{4}\left(\frac{L}{2}\right)^2 + w\frac{L}{2}\left(\frac{L}{2}\right) + c_1$$

$$0 = -\frac{wL^2}{16} + \frac{wL^2}{4} + c_1$$

$$c_1 = -\frac{3wL^2}{16} \quad (3.33)$$

Untuk $v = 0$ pada $x = L$

$$EI v = -\frac{w}{12}x^3 + \frac{wL}{4}x^2 + c_1x + c_2$$

$$0 = -\frac{w}{12}(L)^3 + \frac{wL}{4}(L)^2 + c_1(L) + c_2$$

$$c_2 = \frac{wL^3}{48} \quad (3.34)$$

Mencari defleksi maksimum yang berada pada $x = L/2$ melalui persamaan (3.32)

$$EI v = -\frac{w}{12}x^3 + \frac{wL}{4}x^2 + c_1x + c_2$$

$$EI v = -\frac{w}{12}\left(\frac{L}{2}\right)^3 + \frac{wL}{4}\left(\frac{L}{2}\right)^2 + \left(\frac{3wL^2}{16}\right)\left(\frac{L}{2}\right)$$

$$EI v = -\frac{wL^3}{96} + \frac{wL^3}{16} + \frac{3wL^3}{32}$$

$$v = -\frac{wL^3}{48EI} \quad (3.35)$$

Mencari nilai kekakuan

$$F = k \Delta x$$

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

$$k = \frac{F}{-FL^3}$$

$$k = \frac{48 EI}{L^3}$$

(3.36)

Rumus inersia pipa:

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

$$= \frac{\pi}{64} (32^4 - 28^4)$$

$$= \frac{\pi}{64} (1048576 - 614656)$$

$$= 21289.2 \text{ mm}^4$$

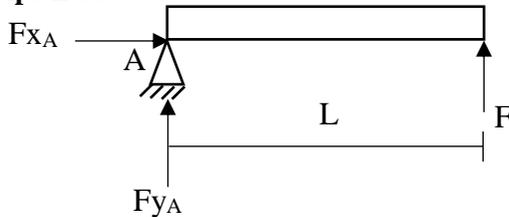
$$E = 3000 \text{ N/mm}^2$$

$$k = \frac{48 (3000)(21289.2)}{105,4^3}$$

$$k = 2618,18 \text{ N/mm}$$

$$= 2618183,017 \text{ N/m}$$

3.3.2.2 Pipa Elbow



Gambar 3. 25 Free Body Diagram elbow

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

- Gaya-gaya pada sumbu X

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

$$F_{x_A} = 0 \tag{3.37}$$

- Gaya pada sumbu Y

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

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

$$F_{y_A} = -F \tag{3.38}$$

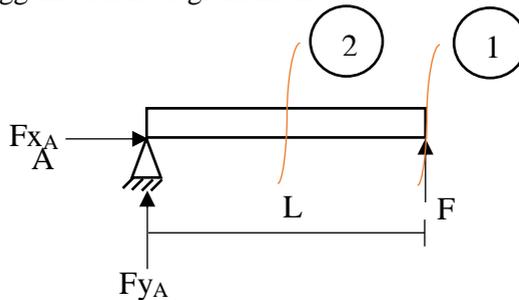
- Momen pada titik A

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

$$M_A - FL = 0$$

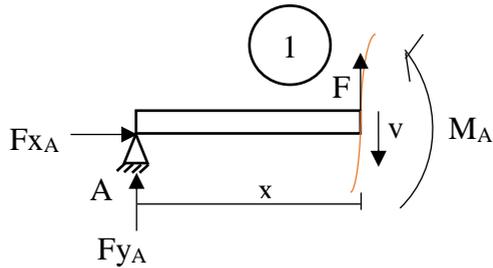
$$M_A = FL$$

Setelah diketahui besarnya nilai A_y dan B_y langkah selanjutnya gambarkan kembali *free body diagram* yang baru untuk menggambarkan diagram momen:



Gambar 3.26 Potongan pipa elbow

- Potongan 1



Gambar 3.27 Potongan 1 pipa elbow

Untuk $0 \leq x_1 \leq L$

- Gaya pada sumbu Y

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

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

$$F_{y_A} = V$$

$$(3.39)$$

- Momen pada titik A

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

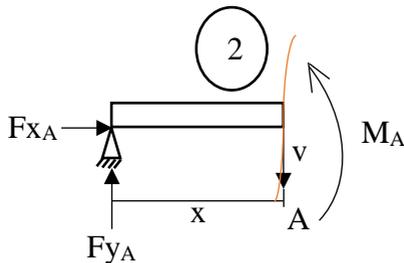
$$M_A - F_{y_A} x_1 = 0$$

$$M_A = F_{y_A} x_1$$

$$M_A = -F x_1$$

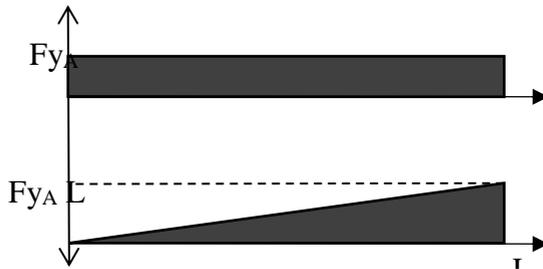
$$(3.40)$$

- Potongan 2



Gambar 3.28 Potongan 2 pipa elbow

- Untuk $0 \leq x_2 \leq L/2$
 - Momen untuk $+\curvearrowright \Sigma M = 0$
- $$M_A - F y_A x_2 = 0$$
- $$M_A = F y_A x_2$$
- $$M_A = -F x_2 \tag{3.41}$$



Gambar 3.29 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 $0 \leq x_1 \leq L$

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

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

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

$$EI v = \frac{F}{6} x^3 + C_1 x + C_2 \tag{3.42}$$

Mencari nilai C1 dan C2

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

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

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

$$C_1 = -\frac{FL^2}{2} \quad (3.43)$$

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

$$EI v = -\frac{F}{6} x^3 + C_1x + C_2$$

$$0 = -\frac{F}{6} (0) + C_1(0) + C_2$$

$$C_2 = 0 \quad (3.44)$$

Setelah didapatkan besarnya nilai C1 dan C2 lalu disubstitusikan ke dalam persamaan awal untuk mencari besarnya defleksi maksimum yang berada pada $x = L$ sebagai berikut :

$$EI v = -\frac{F}{6} x^3 + C_1x + C_2$$

$$EI v = -\frac{F}{6} (l)^3 + \frac{FL^2}{2} L + 0$$

$$EI v = -\frac{FL^3}{6} + \frac{FL^3}{2}$$

$$EI v = -\frac{FL^3}{6} + \frac{3FL^3}{6}$$

$$EI v = \frac{2FL^3}{6}$$

$$\begin{aligned}
 EI v &= \frac{FL^3}{3} \\
 v &= \frac{FL^3}{3EI} \\
 \Delta &= \frac{FL^3}{3EI}
 \end{aligned}
 \tag{3.45}$$

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

$$\begin{aligned}
 EI v \frac{d^2 v}{dx^2} &= M(x) \\
 EI v \frac{d^2 v}{dx^2} &= -F x \\
 EI v \frac{dv}{dx} &= -\frac{F}{2} x^2 + C_1 \\
 EI v &= -\frac{F}{6} x^3 + C_1 x + C_2
 \end{aligned}
 \tag{3.46}$$

Mencari nilai C1 dan C2

Untuk $\theta = \frac{dv}{dx} = 0$ pada $x=L/2$

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

$$0 = -\frac{F}{2} \left(\frac{L}{2}\right)^2 + C_1$$

$$C_1 = \frac{FL^2}{8} \tag{3.47}$$

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

$$EI v = -\frac{F}{6} x^3 + C_1 x + C_2$$

$$0 = -\frac{F}{6} (0) + C_1(0) + C_2$$

$$C_2 = 0 \tag{3.48}$$

Setelah didapatkan besarnya nilai C_1 dan C_2 lalu disubstitusikan ke dalam persamaan awal untuk mencari besarnya defleksi maksimum yang berada pada $x = L/2$ sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 EI v &= -\frac{F}{6}x^3 + C_1x + C_2 \\
 EI v &= -\frac{F}{6}\left(\frac{L}{2}\right)^3 + \frac{FL^2}{16}L + 0 \\
 EI v &= -\frac{FL^2}{48} + \frac{FL^3}{16} \\
 EI v &= -\frac{FL^2}{48} + \frac{3FL^3}{48} \\
 EI v &= \frac{2FL^2}{48} \\
 EI v &= \frac{FL^2}{24} \\
 v &= \frac{FL^3}{24EI} \\
 \Delta &= \frac{FL^3}{24EI} \tag{3.49}
 \end{aligned}$$

Sehingga persamaan 3. digunakan untuk mendapatkan nilai dari konstanta kekakuan di titik maksimum. Dimana persamaan untuk mencari nilai kekakuan ditunjukkan oleh persamaan 3. berikut ini

$$\begin{aligned}
 F &= k \Delta X \\
 k &= \frac{F}{\Delta X} \\
 k &= \frac{F}{\frac{FL^3}{3EI}} \\
 k &= \frac{3EI}{L^3} \tag{3.50}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I &= \frac{\pi}{64}(d_o^4 - d_i^4) \\
&= \frac{\pi}{64}(40^4 - 32,4^4) \\
&= \frac{\pi}{64}(2560000 - 1101996,06) \\
&= 71569,6 \text{ mm}^4 \\
E &= 3000 \text{ N/mm}^2 \\
k &= \frac{3(3000)(71569,6)}{80^3} \\
k &= 1258,05 \text{ N/mm} \\
&= 1258059,37 \text{ N/m}
\end{aligned}$$

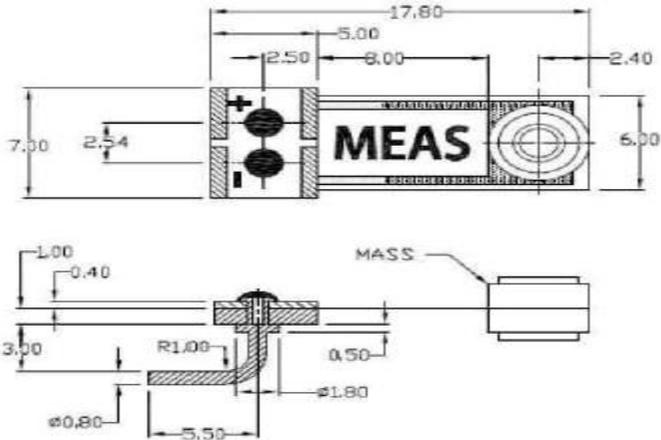
3.3.2.3 Piezoelectric

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

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

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

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 3.30.



Gambar 3.30 Dimensi *piezoelectric Minisense 100 Vibration Sensor*

Maka nilai kekakuan *piezoelectric* adalah $3 \times 10^9 \text{ N/m}^2$. Pada setiap titik terdapat 2 *piezoelectric* yang tersusun secara paralel, sehingga kekakuan ekuivalen bisa didapatkan melalui persamaan:

$$k_{eq} = n k$$

$$k_{eq} = 2 \times 5,75 \times 10^{-1} \text{ N/m}^2$$

$$k_{eq} = 11,5 \times 10^{-1} \text{ N/m}^2$$

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:

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

$$\omega_n = \sqrt{\frac{2618183,017}{0,6488}} = 2008,83 \frac{\text{rad}}{\text{s}} = 319,72 \text{ Hz}$$

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:

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

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

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

$$\omega_n = \sqrt{\frac{1258059,37}{0,1609}} = 2796,2 \frac{\text{rad}}{\text{s}} = 445,03 \text{ Hz}$$

3.4 Analisa Data dan Pembahasan

Setelah diketahui data simulasi yang telah dilakukan, maka akan dilakukan analisis dan pembahasan sesuai dasar teori yang ada. Dari analisis data dan pembahasan yang dilakukan, dapat

diketahui variabel-variabel yang mempengaruhi energi bangkitan yang dapat dihasilkan pada sistem perpipaan. Pembahasan dan penjelasan analisa tersebut akan digunakan sebagai acuan untuk menarik kesimpulan dari penelitian ini.

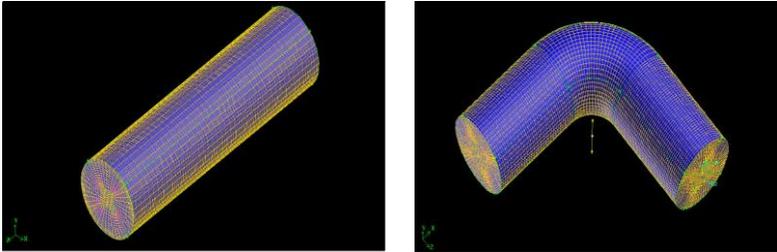
3.5 Kesimpulan

Dari hasil simulasi dan analisa data yang telah dilakukan, maka dapat diketahui kesimpulan dari penelitian ini. Kesimpulan yang ditulis merupakan pokok bahasan dan menjawab rumusan masalah yang telah dituliskan pada BAB I sehingga tujuan dari penelitian dapat tercapai. Kemudian akan dibuat saran untuk penelitian selanjutnya agar mendapatkan hasil yang lebih baik.

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisa Hasil Simulasi Aliran Fluida

4.1.1 proses *meshing* pada sistem utama



(a)

(b)

Gambar 4.1 Meshing pada pipa (a) lurus dan (b) elbow

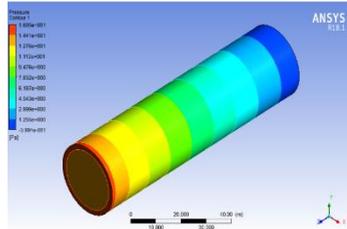
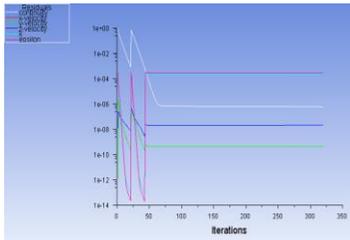
Proses simulasi ini diawali dengan pembuatan *meshing* pada sistem utama yaitu pipa *elbow* dan pipa lurus. *meshing* pada sistem ini memiliki *cells* berbentuk hexahedral dan memiliki *nodes* sebanyak 138600 pada pipa lurus dan sebanyak 131625 pada pipa *elbow*. Sedangkan warna biru pada gambar menunjukkan kualitas *meshing* yang sudah masuk kategori bagus karena masing-masing *nodes* memiliki luasan yang sama pada sistem *meshing* yang ada.

4.1.2 Simulasi Aliran Fluida Menggunakan ANSYS Fluent

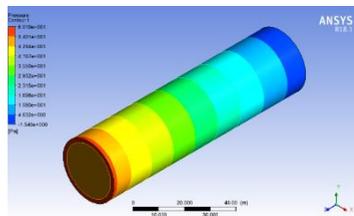
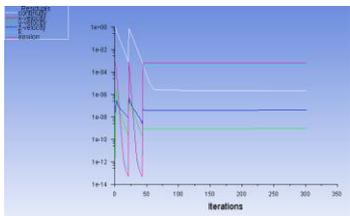
Pada simulasi ANSYS Fluent ini digunakan beberapa parameter untuk melengkapi jalannya simulasi. Parameter yang pertama adalah *initial gauge (pressure)* yang merupakan tekanan diluar sistem yang didapat dari perhitungan *head*. Lalu parameter berikutnya adalah *turbulent intensity* sebesar 1% karena dianggap kejadian turbulen sekitar sistem terjadi skala medium. Selanjutnya *hydraulic diameter* senilai 32.5mm sesuai dengan diameter dari pipa yang digunakan, dengan *wall roughness* sebesar 0.0015, lalu

outflow, 30 iterasi per *timestep*, dengan metode *simple*, dan *second order* agar *error* yang dihasilkan lebih kecil dan dengan nilai *k epsilon* karena umum buat kondisi turbulen. Dari parameter yang sudah disebutkan, dilanjutkan dengan melakukan simulasi dengan variasi yang ada. Yaitu, densitas, posisi, dan kecepatan berdasarkan Reynolds Number.

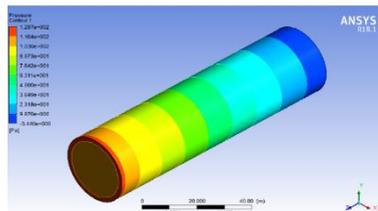
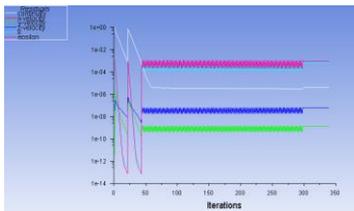
4.1.2.1 Simulasi Aliran Fluida Pada Pipa Lurus Dengan Fluida Minyak Sawit



(a)



(b)



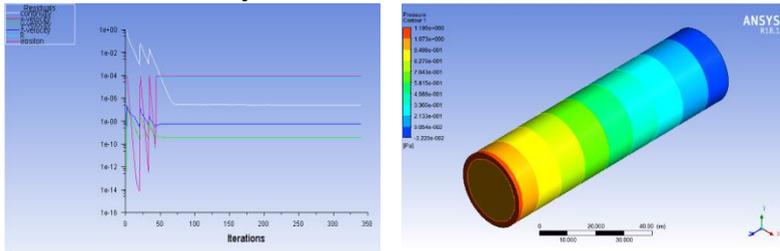
(c)

Gambar 4.2 Grafik residual dan persebaran tekanan pada pipa lurus, fluida minyak sawit dengan kecepatan pada saat RE (a) 1500, (b) 2500, (c) 3500

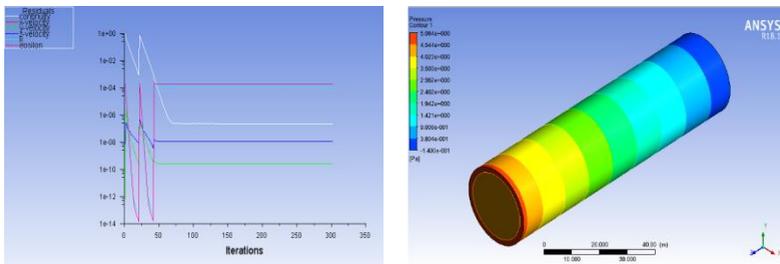
Pada simulasi dengan variasi ini, didapat grafik residual dan persebaran tekanan yang ada pada masing-masing variasi seperti pada gambar (a), (b), dan (c). dapat dilihat grafik residual mulai

bergerak konstan disekitar iterasi ke-50 pada variasi (a), (b), dan (c) dan berhenti setelah iterasi ke-300. Sedangkan pada persebaran tekanan di inlet bernilai sekitar +14.4 Pa pada variasi (a), +54 Pa pada variasi (b), dan +116 Pa pada variasi (c). sedangkan pada outlet sebesar -0.38 Pa pada variasi (a), -1.54 Pa pada variasi (b), dan -3,4 Pa pada variasi (c). (tanda + atau – berdasarkan nilai dari *initial pressure*).

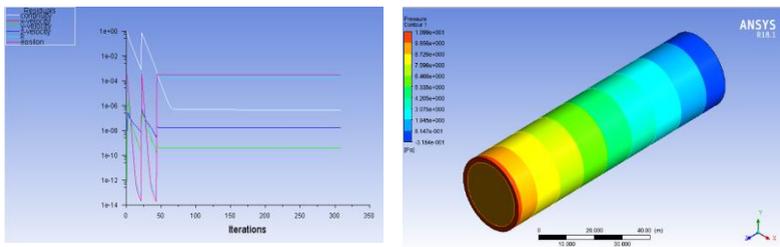
4.1.2.2 Simulasi Aliran Fluida Pada Pipa Lurus Dengan Fluida Minyak Bumi



(a)



(b)

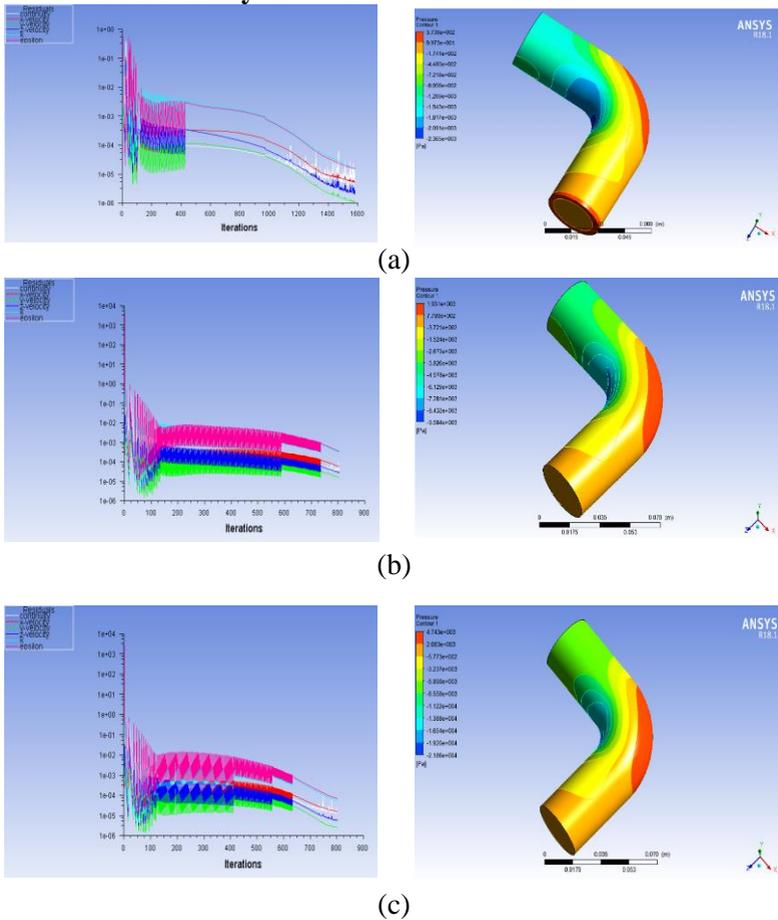


(c)

Gambar 4.3 Grafik residual dan persebaran tekanan pada pipa lurus, fluida minyak bumi dengan kecepatan pada saat RE (a) 1500, (b) 2500, (c) 3500

Pada simulasi dengan variasi ini, didapat grafik residual dan persebaran tekanan yang ada pada masing-masing variasi seperti pada gambar (a), (b), dan (c). dapat dilihat grafik residual mulai bergerak konstan disekitar iterasi ke-50 pada variasi (a), (b), dan (c) dan berhenti setelah iterasi ke-300. Sedangkan pada persebaran tekanan di inlet bernilai sekitar +1.07 Pa pada variasi (a), +4.54 Pa pada variasi (b), dan +9.85 Pa pada variasi (c). sedangkan pada outlet sebesar -0.032 Pa pada variasi (a), -0.14 Pa pada variasi (b), dan -0.31 Pa pada variasi (c). (tanda + atau – berdasarkan nilai dari *initial pressure*).

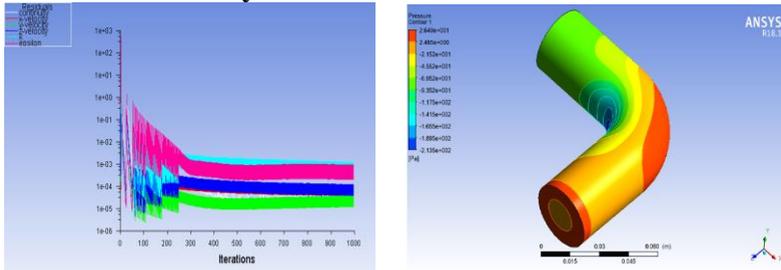
4.1.2.3 Simulasi Aliran Fluida Pada Pipa Elbow Dengan Fluida Minyak Sawit



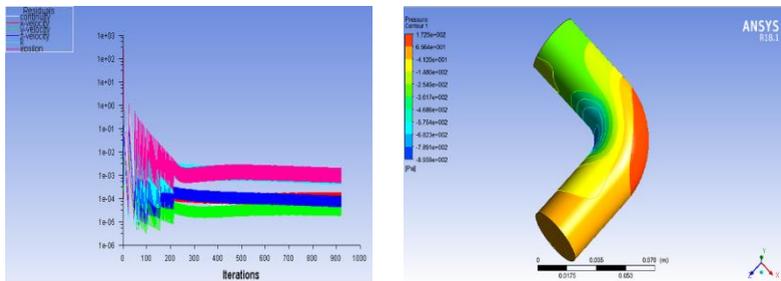
Gambar 4.4 Grafik residual dan persebaran tekanan pada pipa elbow, fluida minyak sawit dengan kecepatan pada saat RE (a) 1500, (b) 2500, (c) 3500

Pada simulasi dengan variasi ini, didapat grafik residual dan persebaran tekanan yang ada pada masing-masing variasi seperti pada gambar (a), (b), dan (c). dapat dilihat grafik residual mulai bergerak konstan disekitar iterasi ke-800 pada variasi (a), (b), dan (c) dan berhenti setelah iterasi ke-1000. Sedangkan pada persebaran tekanan di inlet bernilai sekitar +99.7 Pa pada variasi (a), +700 Pa pada variasi (b), dan +2000 Pa pada variasi (c). sedangkan pada outlet sebesar -154.3 Pa pada variasi (a), -4978 Pa pada variasi (b), dan -5898 Pa pada variasi (c). (tanda + atau – berdasarkan nilai dari *initial pressure*).

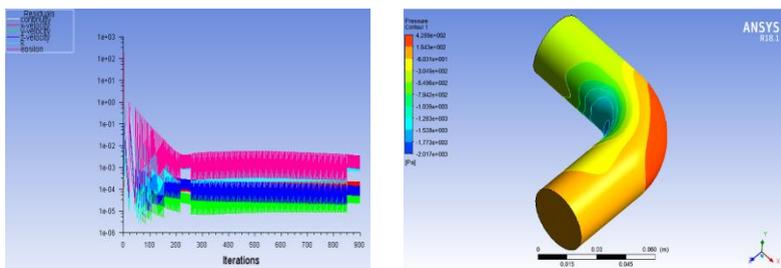
4.1.2.4 Simulasi Aliran Fluida Pada Pipa Elbow Dengan Fluida Minyak Bumi



(a)



(b)



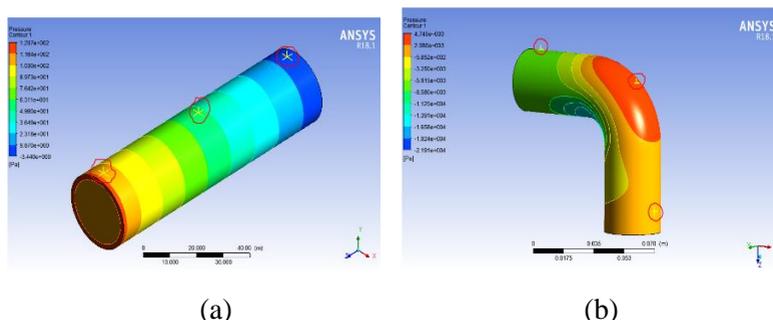
(c)

Gambar 4.5 Grafik residual dan persebaran tekanan pada pipa elbow, fluida minyak bumi dengan kecepatan pada saat RE (a) 1500, (b) 2500, (c) 3500

Pada simulasi dengan variasi ini, didapat grafik residual dan persebaran tekanan yang ada pada masing-masing variasi seperti pada gambar (a), (b), dan (c). dapat dilihat grafik residual mulai bergerak konstan disekitar iterasi ke-800 pada variasi (a), (b), dan (c) dan berhenti setelah iterasi ke-1200. Sedangkan pada persebaran tekanan di inlet bernilai sekitar +26.49 Pa pada variasi (a), +65.6 Pa pada variasi (b), dan +120 Pa pada variasi (c). sedangkan pada outlet sebesar -69.5 Pa pada variasi (a), -254.9 Pa pada variasi (b), dan -304.9 Pa pada variasi (c). (tanda + atau – berdasarkan nilai dari *initial pressure*).

4.1.3 Gaya Yang Dihasilkan Dari Simulasi ANSYS Fluent

4.1.3.1 Cara mendapatkan Gaya dari ANSYS Fluent



Gambar 4.6 *Point* yang digunakan untuk menemukan gaya yang dibutuhkan dari posisi yang ditentukan pada pipa (a) lurus dan (b) *elbow*

Gambar diatas menunjukkan *point* (lingkaran merah) yang telah ditentukan untuk mengetahui nilai gaya pada posisi yang diinginkan. Dimana pada pipa lurus diletakkan pada posisi *inlet* tengah dan *outlet*, sedangkan pada pipa *elbow* diletakkan pada posisi *inlet*, *elbow* 90°, dan *outlet*. Sedangkan untuk mengetahui nilai pada *point* yang telah ditentukan, dilakukan dengan cara mengekspor nilai gaya secara keseluruhan pada pipa kedalam

bentuk format “.xlsx” pada Microsoft Excel. Dan dengan data yang ada dapat diketahui nilai gaya yang dihasilkan sesuai dengan *point* yang telah ditentukan dengan cara mencocokkan koordinat sumbu X, Y, Z yang ada. Dari hasil ekspor data pun didapat besaran gaya pada masing-masing kondisi yang ada yang disajikan pada tabel berikut:

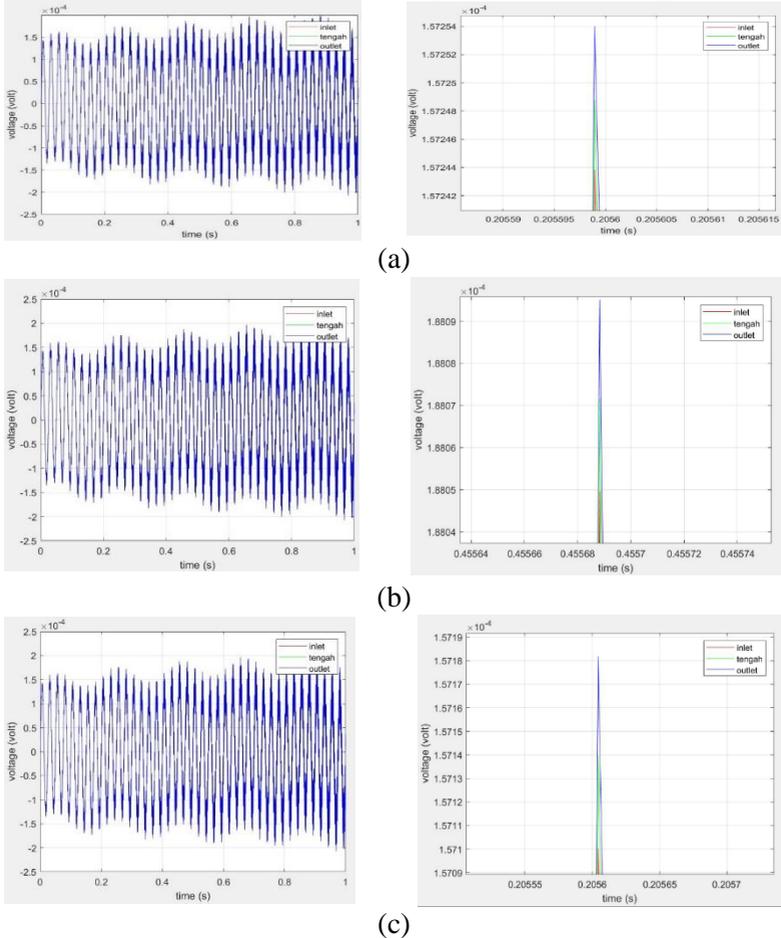
Tabel 4.1 hasil gaya yang didapatkan daris simulasi menggunakan ANSYS Fluent

FORCE (N)	LURUS			ELBOW				
	INLET	TENGAH	OUTLET	INLET	TENGAH X	TENGAH Z	OUTLET	RESULTAN ELBOW
SAWIT LAMINAR	0.21512655	0.2151333	0.21514066	0.320993483	0.699366987	0.518081427	0.323500544	0.870051337
SAWIT TRANSISI	0.2150867	0.21511192	0.21514091	0.320598483	0.694255292	0.514113903	0.327685714	0.871069033
SAWIT TURBULEN	0.21502402	0.21507825	0.21514106	0.320188135	0.684729993	0.506853104	0.33333233	0.871702048
BUMI LAMINAR	0.21514005	0.21514053	0.21513572	0.321299493	0.700396538	0.518950045	0.321368903	0.851912691
BUMI TRANSISI	0.21513653	0.21513864	0.21513864	0.321261972	0.699896157	0.518562078	0.32168588	0.863888602
BUMI TURBULEN	0.21513117	0.21513573	0.21514045	0.209988132	0.699085712	0.517946422	0.322310328	0.870357712

Tabel diatas merupakan besaran gaya yang didapat di masing-masing titik peletakan *piezoelectric* dengan variasi yang ada. Dapat dilihat pada variasi minyak sawit di pipa lurus, gaya yang dihasilkan terbesar terdapat pada kondisi turbulen pada titik outlet dengan nilai 0.21514106 N, sedangkan di pipa *elbow*, nilai gaya terbesar terletak pada titik tengah kondisi laminar dengan nilai 0.871702048 N. pada variasi minyak bumi di pipa lurus, gaya yang dihasilkan terbesar terdapat pada kondisi laminar pada titik outlet dengan nilai 0.21514045 N, sedangkan di pipa *elbow*, nilai gaya terbesar terletak pada titik tengah pada kondisi laminar dengan nilai 0.870357712 N.

4.2 Grafik Voltase Terhadap Waktu Menggunakan Matlab-Simulink

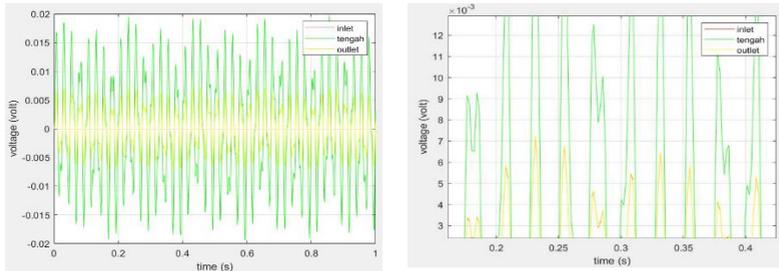
4.2.1 Grafik Variasi Densitas Minyak Sawit Pada Pipa Lurus



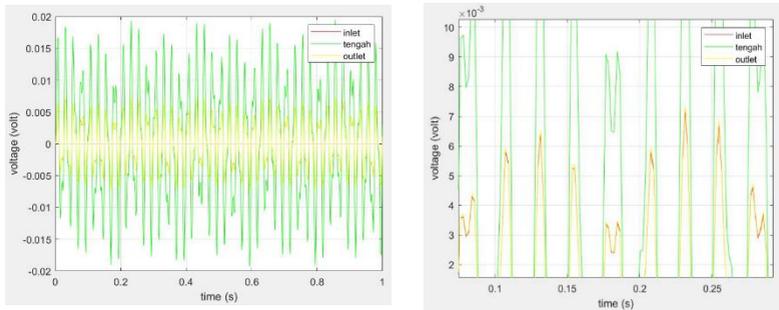
Gambar 4.7 Grafik voltase hasil MATLAB pada pipa lurus dengan minyak sawit dengan RE pada kondisi (a) laminar, (b) transisi, dan (c) turbulen

Grafik diatas merupakan grafik voltase bangkitan terhadap waktu dengan berbagai variasi. Grafik (a) didapat dengan input gaya sebesar 0.21512565 N pada inlet, 0.2151333 N pada tengah, dan 0.21514066 N yang dihasilkan oleh kecepatan 1.59m/s pada kondisi laminar, pada grafik (b) didapat dengan input gaya sebesar 0.2150867 N pada inlet, 0.21511192 N pada tengah, dan 0.21514091 N pada outlet yang dihasilkan oleh kecepatan 3.19m/s pada kondisi transisi, dan pada grafik (c) didapat dengan input gaya sebesar 0.21502402 N pada inlet, 0.21507825 N pada tengah, dan 0.21514106 N pada outlet yang dihasilkan oleh kecepatan 4.79m/s pada kondisi turbulen. Sedangkan nilai pada minus pada grafik disebabkan oleh arus yang dihasilkan yaitu berupa arus AC (bolak balik).

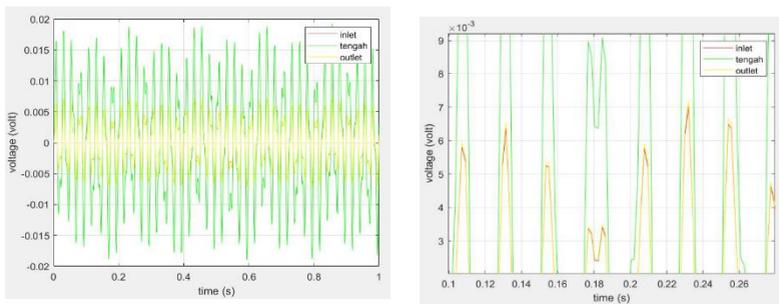
4.2.2 Grafik Variasi Densitas Minyak Sawit pada Elbow



(a)



(b)

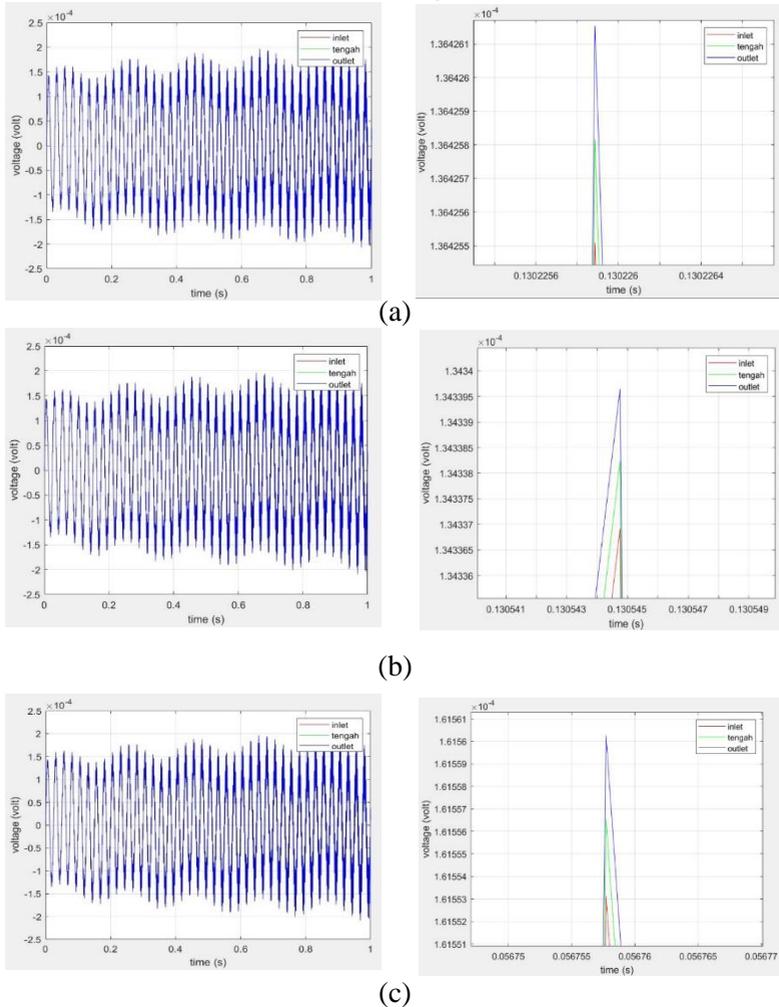


(c)

Gambar 4.8 Grafik voltase hasil MATLAB pada pipa *elbow* dengan minyak sawit dengan RE pada kondisi (a) laminar, (b) transisi, dan (c) turbulen

Grafik diatas merupakan grafik voltase bangkitan terhadap waktu dengan berbagai variasi. Grafik (a) didapat dengan input gaya sebesar 0.320993483 N pada inlet, 0.870051337 N pada tengah, dan 0.323500544 N yang dihasilkan oleh kecepatan 1.59m/s pada kondisi laminar, pada grafik (b) didapat dengan input gaya sebesar 0.320598483 N pada inlet, 0.87169033 N pada tengah, dan 0.327685714 N pada outlet yang dihasilkan oleh kecepatan 3.19m/s pada kondisi transisi, dan pada grafik (c) didapat dengan input gaya sebesar 0.320188135 N pada inlet, 0.871702048 N pada tengah, dan 0.33333233 N pada outlet yang dihasilkan oleh kecepatan 4.79m/s pada kondisi turbulen.

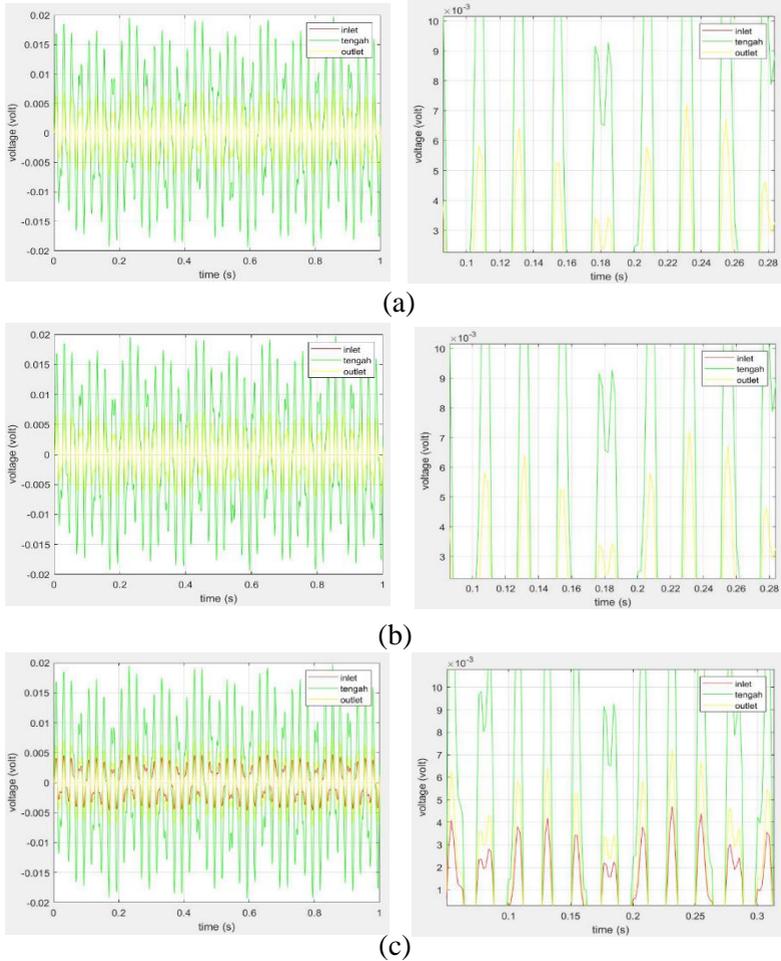
4.2.3 Grafik Variasi Densitas Minyak Bumi Pada Lurus



Gambar 4.9 Grafik voltase hasil MATLAB pada pipa lurus dengan minyak bumi dengan RE pada kondisi (a) laminar, (b) transisi, dan (c) turbulen

Grafik diatas merupakan grafik voltase bangkitan terhadap waktu dengan berbagai variasi. Grafik (a) didapat dengan input gaya sebesar 0.215140005 N pada inlet, 0.21514053 N pada tengah, dan 0.21513572 N yang dihasilkan oleh kecepatan 0.44m/s pada kondisi laminar, pada grafik (b) didapat dengan input gaya sebesar 0.21513653 N pada inlet, 0.21513864 N pada tengah, dan 0.21513864 N pada outlet yang dihasilkan oleh kecepatan 0.95m/s pada kondisi transisi, dan pada grafik (c) didapat dengan input gaya sebesar 0.21513117 N pada inlet, 0.21513573 N pada tengah, dan 0.21514045 N pada outlet yang dihasilkan oleh kecepatan 1.43m/s pada kondisi turbulen.

4.2.4 Grafik Variasi Densitas Minyak Bumi pada Elbow



Gambar 4.10 Grafik voltase hasil MATLAB pada pipa elbow dengan minyak bumi dengan RE pada kondisi (a) laminar, (b) transisi, dan (c) turbulen

Grafik diatas merupakan grafik voltase bangkitan terhadap waktu dengan berbagai variasi. Grafik (a) didapat dengan input gaya sebesar 0.321499293 N pada inlet, 0.851912691 N pada tengah, dan 0.321368903 N yang dihasilkan oleh kecepatan 0.44m/s pada kondisi laminar, pada grafik (b) didapat dengan input gaya sebesar 0.321261972 N pada inlet, 0.863888602 N pada tengah, dan 0.32168588 N pada outlet yang dihasilkan oleh kecepatan 0.95m/s pada kondisi transisi, dan pada grafik (c) didapat dengan input gaya sebesar 0.209988132 N pada inlet, 0.870357712 N pada tengah, dan 0.322310328 N pada outlet yang dihasilkan oleh kecepatan 1.43m/s pada kondisi turbulen.

4.2.5 hasil Vrms dari MATLAB-Simulink

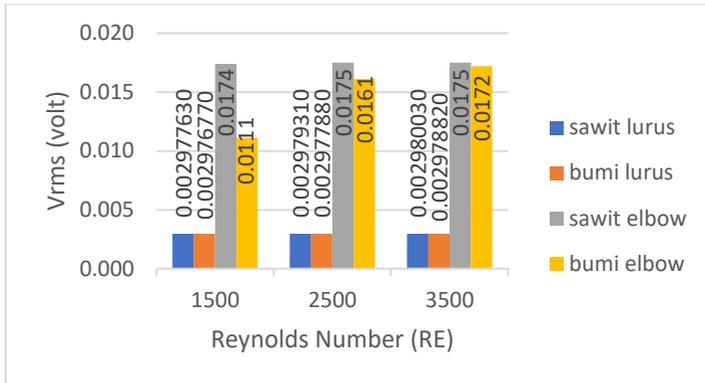
Tabel 4.2 Hasil Vrms dari MATLAB-Simulink

	LURUS			TOTAL	ELBOW			TOTAL
	INLET	TENGAH	OUT		IN	TENGAH	OUT	
SAWIT LAMINAR	0.00099276	0.00099358	0.00099129	0.00297763	0.0037	0.0100	0.0037	0.0174
SAWIT TRANSISI	0.00099439	0.00099245	0.00099247	0.00297931	0.0037	0.0100	0.0038	0.0175
SAWIT TURBULEN	0.00099308	0.00099308	0.00099387	0.00298003	0.0037	0.0100	0.0038	0.0175
BUMI LAMINAR	0.00099172	0.00099167	0.00099338	0.00297677	0.0037	0.0037	0.0037	0.0111
BUMI TRANSISI	0.00099182	0.00099254	0.00099352	0.00297788	0.0024	0.0100	0.0037	0.0161
BUMI TURBULEN	0.00099276	0.00099229	0.00099377	0.00297882	0.0037	0.0098	0.0037	0.0172

Pada tabel diatas terdapat data voltase *root mean square* (rms) hasil simulasi menggunakan MATLAB-Simulink. Dapat dilihat nilai rms terbesar pada minyak sawit bagian pipa lurus terdapat di bagian outlet pada kondisi turbulen dengan nilai 0.00099387, sedangkan pada pipa *elbow* didapat di bagian tengah pada kondisi turbulen dengan nilai 0.0175. Pada minyak bumi bagian pipa lurus, nilai rms tertinggi didapat di bagian outlet pada kondisi turbulen dengan nilai 0.00099377, sedangkan pada pipa *elbow* nilai rms tertinggi didapat di bagian tengah pada kondisi turbulen dengan nilai 0.0172.

4.3 Hasil Grafik Dari MATLAB-Simulink

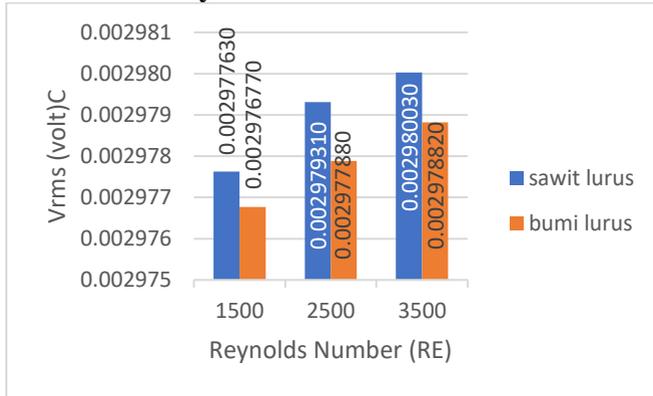
4.3.1 Analisa Hasil Grafik Terhadap Variasi Densitas Fluida



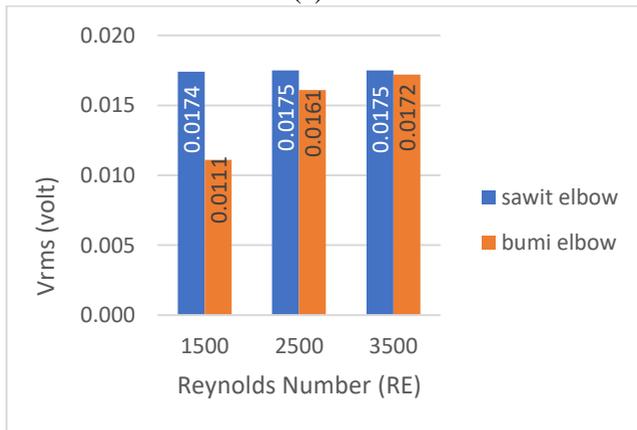
Gambar 4.11 Grafik Vrms terhadap RE dengan akibat pengaruh densitas fluida minyak sawit dan minyak bumi

Berdasarkan hasil yang didapat pada grafik 4.11, ditunjukkan bahwa variasi densitas memengaruhi voltase yang didapat. Semakin tinggi nilai densitas, maka semakin besar amplitude voltase yang dihasilkan oleh gaya dan memengaruhi Vrms yang dihasilkan. Hasil yang didapat ini sesuai dengan penelitian Dynamic response of undergoing vortex-induced vibrations with variable-density fluid (Xie, Gao, Wang, Xu, & Bai, 2019). Seperti pada pipa lurus kondisi turbulen, Vrms yang dihasilkan oleh minyak sawit sebesar 0.00298003 N, sedangkan minyak bumi menghasilkan Vrms sebesar 0.00297882 N. dan pada pipa *elbow* dengan kondisi turbulen, minyak sawit menghasilkan Vrms sebesar 0.0175 N dan minyak bumi menghasilkan Vrms sebesar 0.0172 N.

4.3.2 Analisa Hasil Grafik Terhadap Variasi Kecepatan Berdasarkan Reynolds Number



(a)



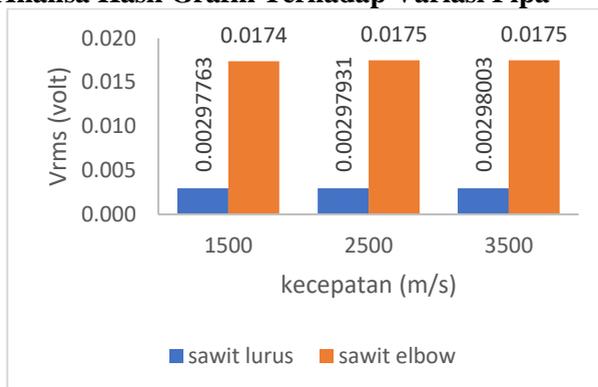
(b)

Gambar 4.12 Grafik Vrms terhadap RE dengan pengaruh variasi kecepatan berdasarkan nilai RE pada pipa (a) lurus dan (b) *elbow*

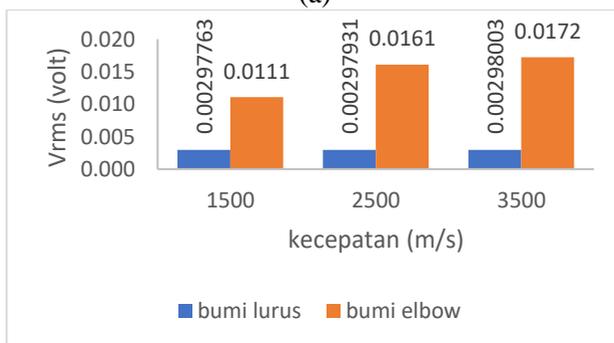
Berdasarkan grafik 4.12 yang telah ditunjukkan, ditunjukkan bahwa kecepatan berdasarkan bilangan Reynold memengaruhi

nilai voltase yang dihasilkan oleh *piezoelectric*, dimana semakin tinggi kecepatan, maka semakin besar nilai V_{rms} yang dihasilkan masing masing kecepatan. Seperti pada minyak sawit pada pipa lurus dengan nilai V_{rms} 0.00297763 N, 0.00297931 N, dan 0.00298003 N dan minyak bumi pada pipa lurus dengan nilai V_{rms} yang terus meningkat dari 0.00297677 N, 0.0029788 N, dan 0.00297882 N.

4.3.3 Analisa Hasil Grafik Terhadap Variasi Pipa



(a)



(b)

Gambar 4.13 Grafik V_{rms} terhadap RE dengan pengaruh variasi pipa lurus dan *elbow* pada densitas (a)minyak sawit dan (b) minyak bumi

Dari grafik 4.13 didapat bahwa nilai voltase yang dibangkitkan oleh *piezoelectric* pada pipa elbow cenderung lebih besar dibanding dengan yang dihasilkan oleh getaran pada pipa lurus, ditunjukkan oleh nilai V_{rms} yang dihasilkan oleh kedua pipa pada grafik yang ada. Pada grafik ditunjukkan bahwa nilai V_{rms} pada elbow selalu diatas nilai V_{rms} pada pipa lurus. Hal ini disebabkan oleh lebih banyaknya tubrukan pada dinding bagian *elbow* terutama saat belokan 90 derajat.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan, didapat beberapa kesimpulan seperti berikut, yaitu:

1. Nilai energi bangkitan yang dihasilkan oleh variasi densitas minyak sawit (875.1 kg/m^3) lebih besar dibandingkan nilai energi bangkitan yang dihasilkan oleh variasi densitas minyak bumi (870 kg/m^3) pada pipa lurus,
2. Nilai energi bangkitan yang dihasilkan oleh variasi densitas minyak sawit (875.1 kg/m^3) lebih besar dibandingkan nilai energi bangkitan yang dihasilkan oleh variasi densitas minyak bumi (870 kg/m^3) pada pipa *elbow*,
3. Nilai energi bangkitan yang dihasilkan oleh variasi kecepatan pada kondisi tiap Reynolds Number semakin meningkat pada pipa lurus (ex: minyak sawit= $0.00297763 : 0.00297931 : 0.00298003$),
4. Nilai energi bangkitan yang dihasilkan oleh variasi kecepatan pada kondisi tiap Reynolds Number semakin meningkat pada pipa *elbow* (ex: minyak bumi= $0.0111 : 0.161 : 0.0172$),
5. Nilai Vrms minyak sawit lebih besar dibandingkan dengan Vrms minyak bumi, pada pipa lurus (ex: Turbulen = $0.002980003 : 0.00297778$)
6. Nilai Vrms minyak sawit lebih besar dibandingkan dengan Vrms minyak bumi, pada pipa lurus (ex: Turbulen = $0.175 : 0.172$)

5.2 Saran

1. Berdasarkan penelitian berbasis yang telah dilakukan, melakukan simulasi dalam *software* ANSYS dan MATLAB disarankan menggunakan spesifikasi computer

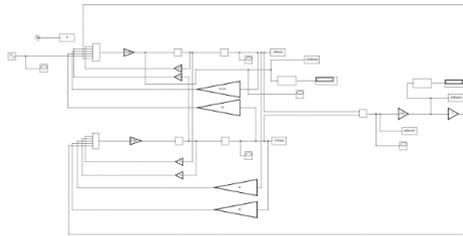
dengan RAM minimal 8 GB agar tidak mengganggu dalam pengambilan data.

DAFTAR PUSTAKA

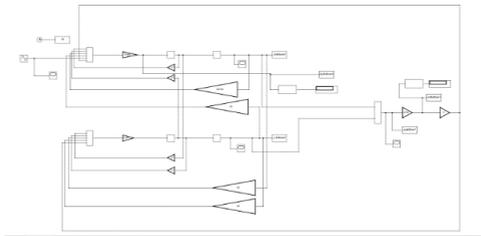
- Arafa, M., Akl, W., & Majeed, M. (2010). Energy Harvesting of Gas Pipeline Vibration. *Proc. of SPIE* .
- CHHABRA, D. (2018, Feb). EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF PIEZOELECTRIC ENERGY. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development (IJMPERD)*, 704-710.
- H, K., & AA, J. (2017). Vibration Analysis of a Turbulent Fluid Passing Inside an Elbow Shaped Pipe Section. *Journal of Applied Mechanical Engineering*.
- Rao, S. S. (2011). *Mechanical Vibration* (Fifth Edition ed.). Upper Saddle River: Pearson Education. Inc.
- S. M. Khot, P. K. (2017). Experimental and Simulation Study of flow Induced. *International Conference on Nascent Technologies in the Engineering Field*.
- Sinha, D. N. (2005, August 12). *Power Generation in Pipeline*. United States: Los Alamos National Laboratory.
- Xie, W., Gao, X., Wang, E., Xu, W., & Bai, Y. (2019). An investigation of the nonlinear dynamic response of a flexible pipe undergoing vortex-induced vibrations and conveying internal fluid with variable-density. *Ocean Engineering*.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

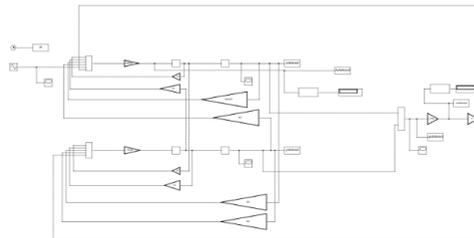
LAMPIRAN



(a)



(b)



(c)

Gambar 1. Blok diagram pada Simulink yang digunakan pada (a) pipa lurus, (b) inlet/ outlet elbow, dan (c) belokan pipa elbow

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BIODATA PENULIS



Geraldus Goldy Talent Silaban dilahirkan di Jakarta, 4 Oktober 1996. Menyelesaikan kuliah dalam program studi S-1 Departemen Teknik Mesin, FTI, ITS pada tahun 2020. Penulis menempuh pendidikan Tingkat Dasar di SDN 01 Percontohan Jakarta, sekolah menengah pertama di SMPN 103 Jakarta dan sekolah menengah atas di SMAN 39 Jakarta. Terlahir dari pasangan Edison Sihombing dan Romauli Hutapea serta memiliki dua kakak laki-laki yang bernama Garry Armando dan Gorbachev Partahi Bonar, serta satu kakak perempuan bernama Glory Audina.

Penulis aktif dalam kegiatan akademik maupun non-akademik di lingkungan kampus maupun lingkungan departemen Teknik Mesin. Penulis tergabung dalam organisasi *LBMM ITS Divisi Human Resource Development* dan mengikuti beberapa kepanitiaan *event* besar yang diadakan oleh organisasi dan institut.

Motto hidup dari penulis adalah “*No Pain, No Gain*” sehingga menjadikan penulis sebagai pribadi yang lebih mencoba mencapai sesuatu dengan usaha keras hingga merasakan beratnya kehidupan, dan bersikap pasrah kepada Tuhan dan lebih ikhlas atas apa yang telah dikerjakan dengan usaha. Hal itu lah yang selalu dipegang oleh penulis dalam menjalani kehidupannya. Walaupun terkadang berat menerima kenyataan bila tidak semua usaha kita berbuah indah, tapi penulis meyakini jika semua hal memiliki waktu nya masing-masing. Komunikasi dengan penulis terkait laporan Tugas Akhir ini dapat melalui email: **geraldus.goldy@gmail.com**