



**PEMANFAATAN *VORTEX-INDUCED VIBRATION* (VIV)  
SEBAGAI PENGHASIL LISTRIK TENAGA AIR**

**SKRIPSI**

Diajukan guna melengkapi tugas akhir dan memenuhi salah satu syarat  
untuk menyelesaikan Program Studi Teknik Mesin (S1)  
dan mencapai gelar Sarjana Teknik

Oleh:

**Asdin Amroe An-Nafi  
141910101036**

**PROGRAM STUDI STRATA I TEKNIK MESIN  
JURUSAN TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS JEMBER  
2018**

## PERSEMBAHAN

Skripsi ini saya persembahkan untuk:

1. Allah subhanahu wa ta'la yang telah melimpahkan rahmat serta anugerah-Nya sehingga saya mampu memperoleh kesempatan menuntut ilmu di jenjang perguruan tinggi;
2. Ibunda Mardijah, Ayahanda Asijanto Alm., Ayah Kusuma yang telah memberikan kasih sayang dan dukungan tiada henti;
3. Kakak Vina dan Kakak Arin yang telah memberikan masukan dan motivasi;
4. Adik Dani, Emi, dan Azzam yang telah memberikan semangat;
5. Para guru SDN Madyopuro 4, SMPN 21 Malang, SMAN 8 Malang, para dosen Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember yang telah membimbing dan memberikan ilmu yang bermanfaat;
6. Para Asatidz dan teman-teman Syabab di Lembaga Hidayatullah yang telah menyediakan rumah kedua saya di Jember serta membantu saya selama proses penelitian;
7. Almamater Fakultas Teknik Universitas Jember;

**MOTO**

“Jangan katakan pada Allah ‘Aku punya masalah besar’, Tetapi katakan pada masalah bahwa ‘Aku punya Allah yang Maha Besar’.”

(Ali bin Abi Thalib R.A)

“Tidaklah diragukan bahwa kebodohan adalah pokok dari segala kerusakan dan kejelekan yang didapatkan oleh seorang hamba di dunia dan di akhirat”

(Ibnu Qoyyim al-Jauziyah)

“Ketauhilah, sesungguhnya dunia itu dilaknat dan dilaknat apa yang ada di dalamnya, kecuali dzikir kepada Allah dan ketaatan kepada-Nya, orang berilmu, dan orang yang mempelajari ilmu”

(HR. Tirmidzi no. 2322)

**PERNYATAAN**

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Asdin Amroe An-Nafi

NIM : 141910101036

Menyatakan dengan sungguh – sungguh bahwa karya ilmiah yang berjudul “Pemanfaatan *Vortex-Induced Vibration* (VIV) sebagai Penghasil Listrik Tenaga Air” adalah benar – benar hasil karya sendiri, kecuali kutipan yang sudah saya sebutkan sumbernya, belum pernah diajukan pada institusi mana pun, dan bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya, tanpa ada tekanan dan paksaan dari pihak mana pun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata dikemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, 14 Januari 2019

Yang Menyatakan,

Asdin Amroe An-Nafi  
NIM. 141910101036

**SKRIPSI**

**PEMANFAATAN *VORTEX-INDUCED VIBRATION* (VIV)  
SEBAGAI PENGHASIL LISTRIK TENAGA AIR**

Oleh  
Asdin Amroe An-Nafi  
NIM 141910101036

Pembimbing

Dosen Pembimbing Utama : Dr. Gaguk Jatisukamto, S.T.,M.T.

Dosen Pembimbing Anggota : M. Fahrur Rozy Hentihu S.T., M.T.

**PENGESAHAN**

Skripsi berjudul “Pemanfaatan *Vortex-Induced Vibration* (VIV) sebagai Penghasil Listrik Tenaga Air” karya Asdin Amroe An-Nafi telah diuji dan disahkan pada:

Hari, tanggal : Selasa, 4 Desember 2018

Tempat : Ruang Sidang II, Lantai III Dekanat Fakultas Teknik

Tim Pembimbing:

Pembimbing I,

Pembimbing II,

Dr. Gaguk Jatisukamto, S.T., M.T.  
NIP. 196902091998021001

M. Fahrur Rozy Hentihu, S.T., M.T.  
NIP. 198003072012121003

Tim Penguji:

Penguji I,

Penguji II,

Dr. Agus Triono, S.T., M.T.  
NIP. 197008072002121001

Hary Sutjahjono, S.T., M.T.  
NIP. 196812051997021002

Mengesahkan

Dekan Fakultas Teknik Universitas Jember,

Dr. Ir. Entin Hidayah, M.U.M.  
NIP 196612151995032001

## RINGKASAN

**Pemanfaatan *Vortex-Induced Vibration* (VIV) sebagai Penghasil Listrik Tenaga Air;** Asdin Amroe An-Nafi, 141910101036; 2018: 97 halaman; Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember.

Energi adalah kemampuan untuk melakukan usaha. Kebutuhan total energi di Indonesia meningkat 1,3% pertahun dari 783 million BOE (*Barrel Oil Equivalent*) menjadi 798 million BOE selama tahun 2010 – 2015. Salah satu pemanfaatan energi adalah sebagai pembangkit tenaga listrik. Pembangkit listrik terbesar di Indonesia adalah Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) yaitu sebesar 16.779 MW di tahun 2016. Seluruh konsumsi batubara dalam negeri sebesar 70 juta ton (80,72%) digunakan oleh PLTU. Dewan Energi Nasional tahun 2017 menyatakan bahwa cadangan batubara dalam negeri mengalami penurunan sebesar 5,33 juta dari tahun 2014 sampai 2015. Diperkirakan cadangan batubara akan terus mengalami penurunan, sehingga perlu adanya pengembangan energi terbarukan untuk mempersiapkan ketersediaan energi.

Indonesia memiliki potensi laut yang besar sebagai energi terbarukan karena morfologi negara Indonesia yang berbentuk kepulauan. Salah satu sistem energi terbarukan adalah dengan memanfaatkan *Vortex-Induced Vibrations* (VIV) dari aliran air. VIV merupakan fenomena yang menempatkan kekuatan vortisitas yang terbentuk dari aliran fluida yang menghantam benda (*bluff body*) sehingga mengakibatkan benda tersebut bergetar. Pemanfaatan VIV dari aliran air sebagai penghasil listrik dilakukan secara eksperimen menggunakan mekanisme transduksi piezoelektrik yang menempel pada batang kantilever. Getaran *bluff body* akibat VIV kemudian dikonversikan ke dalam bentuk tegangan listrik. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh panjang kantilever dan massa *bluff body* terhadap tegangan yang dihasilkan.

Hasil penelitian menunjukkan Frekuensi *vortex shedding* terbesar adalah  $f_s = 18,41$  Hz terjadi pada kantilever paling pendek ( $L_c = 30$  mm) dengan massa *bluff body* paling kecil ( $m_b = 1,5$  g) dan frekuensi *vortex shedding* terkecil adalah

$f_s = 6,45$  Hz terjadi pada kantilever paling panjang ( $L_c = 50$  mm) dengan massa *bluff body* paling besar ( $m_b = 3,5$  g). Nilai tegangan listrik terbesar adalah  $V = 43$  mV tercapai pada saat frekuensi *vortex shedding* paling besar ( $f_s = 18,41$  Hz) dan nilai tegangan listrik terkecil adalah  $V = 18$  mV yang dihasilkan pada frekuensi *vortex shedding* paling kecil ( $f_s = 6,45$  Hz). Angka Strouhal terkecil adalah  $S_t = 0,026$  pada frekuensi *vortex shedding*  $f_s = 6,45$  Hz dan angka Strouhal terbesar adalah  $S_t = 0,075$  pada frekuensi *vortex shedding*  $f_s = 18,41$  Hz, dimana kondisi diameter *bluff body* tetap dan kecepatan aliran air konstan.



## SUMMARY

***Utilization of Vortex-Induced Vibration (VIV) as a hydroelectric generator;***  
*Asdin Amroe An-Nafi, 141910101036; 2018: 97 pages; Mechanical Department,  
Faculty of Engineering, Jember University.*

*Energy is the main requirement in doing work. The total energy demand in Indonesia increased by 1.3% per year from the 783 million BOE (Barrel Oil Equivalent) to 798 million BOE during 2010 - 2015. One of the uses of energy is as a power plant. The largest power plant in Indonesia is a Steam Power Plant (PLTU) which is equal to 16,779 MW in 2016. All domestic coal consumption of 70 million tons (80.72%) is used by PLTU. The National Energy Board in 2017 states that domestic coal reserves have decreased by 5.33 million from 2014 to 2015. It is estimated that coal reserves will continue to decline, so the need for renewable energy development to prepare energy availability.*

*Indonesia has great sea potential as renewable energy because of Indonesia's morphology in the form of islands. One of the renewable energy systems is to use Vortex-Induced Vibrations (VIV) from the water flow. VIV is a phenomenon that places the power of vorticity which is formed from the flow of fluid that hits objects (bluff body), causing the object to vibrate. The use of VIV from the flow of water as an electricity producer was carried out experimentally using a piezoelectric transduction mechanism attached to the cantilever rod. Bluff body vibration due to VIV is then converted into voltage. The purpose of this study was to determine the effect of cantilever length and bluff body mass on the voltage generated.*

*The results showed the greatest frequency of vortex shedding was  $f_s = 18,41$  Hz in the shortest cantilever ( $L_c = 30$  mm) with the smallest mass of bluff body ( $m_b = 1,5$  g) and the smallest vortex shedding frequency was  $f_s = 6,45$  Hz occurs in the longest cantilever ( $L_c = 50$  mm) with the largest mass of bluff body ( $m_b = 3,5$  g). The value of the largest electric voltage is  $V = 43$  mV reached when the highest vortex shedding frequency ( $f_s = 18,41$  Hz) and the smallest voltage value*

is  $V = 18 \text{ mV}$  which is produced at the smallest vortex shedding frequency ( $f_s = 6,45 \text{ Hz}$ ). The smallest Strouhal number is  $S_t = 0.026$  in the vortex shedding frequency  $f_s = 6.45 \text{ Hz}$  and the largest Strouhal number is  $S_t = 0.075$  in the vortex shedding frequency  $f_s = 18.41 \text{ Hz}$ , where the diameter of the bluff body is constant and the water flow rate is constant.



## PRAKATA

Alhamdulillah rabbil'aalamin, segala puja dan puji syukur penulis panjatkan kepada Allah subhanahu wa ta'la yang Maha Penyayang. Atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul "Pemanfaatan *Vortex-Induced Vibration (VIV)* sebagai Penghasil Listrik Tenaga Air". Skripsi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat menyelesaikan pendidikan strata satu (S1) pada Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember.

Penyusunan skripsi ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Ibu Entin Hidayah M, UM., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Jember;
2. Bapak Hari Arbiantara, S.T, M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember
3. Bapak Hary Sutjahjono, S.T., M.T., selaku Ketua Program Studi S1 Jurusan Teknik Mesin sekaligus Dosen Penguji II dan Dosen Pembimbing Akademik
4. Bapak Dr. Gaguk Jatisukanto, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing Utama, dan Bapak M. Fahrur Rozy Hentihu., S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing Anggota;
5. Bapak Dr. Agus Triono, S.T., M.T., selaku Dosen Penguji I,
6. Ibunda Mardijah, Ayah Roni, Kakak Vina, Kakak Arin, Adik Dani, Adik Emi, dan Adik Azzam;
7. Para Asatidz Lembaga Hidayatullah Jember
8. Teman-teman Syabab Hidayatullah dan *Member EPSON*
9. Civitas akademika Jurusan Teknik Mesin angkatan 2014 Universitas Jember.

Penulis juga menerima segala kritik dan saran dari semua pihak demi kesempurnaan skripsi ini. Akhirnya penulis berharap, semoga skripsi ini dapat bermanfaat.

Jember, 14 Januari 2019

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
<b>HALAMAN JUDUL .....</b>	<b>i</b>
<b>PERSEMBAHAN .....</b>	<b>ii</b>
<b>MOTO.....</b>	<b>iii</b>
<b>PERNYATAAN.....</b>	<b>iv</b>
<b>HALAMAN PEMBIMBING .....</b>	<b>v</b>
<b>PENGESAHAN.....</b>	<b>vi</b>
<b>RINGKASAN .....</b>	<b>vii</b>
<b>SUMMARY .....</b>	<b>ix</b>
<b>PRAKATA.....</b>	<b>xi</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>xii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>xv</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>xvii</b>
<b>DAFTAR LAMPIRAN .....</b>	<b>xviii</b>
<b>BAB 1. PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Latar Belakang .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Rumusan Masalah .....</b>	<b>4</b>
<b>1.3 Batasan Masalah.....</b>	<b>4</b>
<b>1.4 Tujuan Penelitian .....</b>	<b>4</b>
<b>1.5 Manfaat Penelitian .....</b>	<b>4</b>
<b>BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA.....</b>	<b>6</b>
<b>2.1 Vortex Shedding .....</b>	<b>6</b>
<b>2.2 Vortex-Induced Vibration (VIV) .....</b>	<b>8</b>
<b>2.3 Gaya yang Bekerja pada Silindris .....</b>	<b>9</b>
<b>2.4 Persamaan Bernoulli.....</b>	<b>11</b>
<b>2.5 Aliran dalam Pipa.....</b>	<b>13</b>
2.5.1 Bilangan Reynold pada Aliran Fluida .....	13
2.5.2 Viskositas Aliran .....	15
2.5.3 Kerugian Mayor karena Gesekan dalam Pipa .....	15
<b>2.6 Transduksi Piezoelektrik .....</b>	<b>18</b>
<b>2.7 Batang Kantilever (<i>Cantilever Beam</i>) .....</b>	<b>20</b>

<b>2.8</b>	<b>Getaran Mekanik.....</b>	<b>24</b>
2.8.1	Siklus .....	24
2.8.2	Amplitudo.....	25
2.8.3	Periode Osilasi.....	25
2.8.4	Frekuensi Osilasi .....	25
<b>2.9</b>	<b>Frekuensi Natural pada Sistem.....</b>	<b>26</b>
<b>2.10</b>	<b><i>Fourier Transform</i> .....</b>	<b>28</b>
2.10.1	<i>Discrete Fourier Transform (DFT)</i> .....	28
2.10.2	<i>Fast Fourier Transform (FFT)</i> .....	29
<b>2.11</b>	<b>Persamaan Matematis Sistem Konverter.....</b>	<b>33</b>
<b>2.11</b>	<b>Hipotesis .....</b>	<b>36</b>
<b>BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN.....</b>		<b>37</b>
<b>3.1</b>	<b>Metode Penelitian .....</b>	<b>37</b>
<b>3.2</b>	<b>Alat dan Bahan Penelitian .....</b>	<b>37</b>
3.2.1	Alat .....	37
3.2.2	Bahan.....	37
<b>3.3</b>	<b>Prosedur Penelitian .....</b>	<b>38</b>
<b>3.4</b>	<b>Pelaksanaan Penelitian .....</b>	<b>40</b>
3.4.1	Variabel Penelitian .....	40
3.4.2	Pengujian Model Konverter .....	41
<b>3.5</b>	<b>Diagram Alir Penelitian.....</b>	<b>43</b>
<b>BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>		<b>44</b>
<b>4.1</b>	<b>Data Hasil Pengujian Model Konverter .....</b>	<b>44</b>
4.1.1	Kekakuan ( <i>Stiffness</i> ) Batang Kantilever.....	44
4.1.2	Hasil Perhitungan Defleksi Batang Kantilever.....	45
4.1.3	Getaran Bebas Model Konverter .....	47
<b>4.2</b>	<b>Data Hasil Pengujian Model Konverter pada Aliran Air.....</b>	<b>50</b>
4.2.1	Kecepatan dan Debit Air .....	50
4.2.2	Bilangan Reynold .....	51
4.2.3	Frekuensi <i>Vortex Shedding</i> ( $f_s$ ).....	52
4.2.4	Tegangan .....	54
<b>4.3</b>	<b>Analisis Hasil Penelitian.....</b>	<b>56</b>

4.3.1	Nilai Kekakuan (Stiffnes).....	56
4.3.2	Frekuensi Natural .....	57
4.3.3	Frekuensi <i>Vortex Shedding</i> .....	58
4.3.4	Tegangan Listrik (V) .....	59
4.3.5	Angka Strouhal .....	60
4.3.6	Tingkat Resonansi .....	61
4.3.6	Gaya yang bekerja pada <i>Bluff Body</i> .....	61
<b>BAB 5. PENUTUP</b>	.....	<b>63</b>
5.1	<b>Kesimpulan</b> .....	<b>63</b>
5.2	<b>Saran</b> .....	<b>63</b>
<b>DAFTAR PUSTAKA</b>	.....	<b>65</b>
<b>LAMPIRAN</b>	.....	<b>68</b>

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
2.1 <i>Von Karman Street</i> (Sumber: Techet, 2005) .....	6
2.2 Gaya dari fluida di sekeliling sebuah benda silindris dua dimensi:(a) gaya tekanan, (b) gaya viskos, (c) gaya resultan ( <i>lift</i> dan <i>drag</i> ) .....	10
2.3 (a) Eksperimen untuk mengilustrasikan jenis aliran. (b) Guratan zat pewarna menunjukkan jenis alirannya. ....	14
2.4 (a) Rangkaian paralel pada unimorph (b) Rangkaian paralel pada bimorph (c) Rangkaian seri pada bimorph.....	19
2.5 Tegangan mekanik pada elemen piezo (a) Bending (b) kompresi (c) geser	20
2.6 Kantilever dengan Gaya Diujung Batang.....	21
2.7 (a) Mekanisme Scotch Yoke (b) Gerak harmonik sebagai proyeksi akhir dari vektor yang berputar.....	24
2.8 Grafik hubungan frekuensi natural (Hz) terhadap tegangan listrik (V).....	27
2.9 Grafik getaran domain waktu (a) Grafik analog (b) Grafik diskrit .....	29
2.10 Gelombang fungsi cosinus 1 periode .....	30
2.11 Konversi Sinyal dari Domain Waktu ke Domain Frekuensi .....	31
2.12 Pilihan <i>Data Analysis</i> pada <i>Menu Bar</i> Ms. Excel .....	31
2.13 Tampilan <i>Data Analysis</i> .....	31
2.14 Tampilan <i>Fourier Analysis</i> pada Ms. Excel.....	32
2.15 (a) Grafik Getaran domain waktu (b) Grafik Hasil FFT domain frekuensi	.33
2.16 Model matematis (a) Sistem massa dengan pegas dan peredam (b) Gaya yang bekerja pada massa .....	34
3.1 Bagian-bagian model konverter .....	39
3.2 Dimensi <i>Bluff Body</i> .....	40
3.3 Skema penelitian dengan metode eksperimen.....	42
3.4 Pengaturan pada Oscilloscope .....	42
4.1 Defleksi kantilever karena beban terpusat pada ujung (a) Kantilever dengan beban terpusat (b) elemen potongan.....	45

4.2	Tampilan Proscope Parallax USB Oscilloscope pada saat membaca respons getaran bebas .....	47
4.3	Grafik Pengujian Getaran Bebas .....	49
4.4	Grafik Getaran model konverter dengan panjang kantilever 50 mm dan massa <i>bluff body</i> 2,5 g karena aliran air .....	53
4.5	Grafik FFT pada model konverter dengan panjang 50 mm dan massa <i>bluff body</i> 2,5 g .....	53
4.6	Grafik Pengaruh Massa <i>Bluff Body</i> terhadap Tegangan Listrik .....	54
4.7	Grafik Tegangan listrik pada Variasi Panjang Kantilever .....	55
4.8	Grafik Pertambahan Panjang Batang Kantilever terhadap Nilai Kekakuan .....	57
4.9	Grafik Pengaruh Panjang Kantilever dan Massa <i>Bluff Body</i> terhadap Frekuensi Natural di Air .....	58
4.10	Grafik Pengaruh Panjang Kantilever dan Massa <i>Bluff Body</i> terhadap Frekuensi <i>Vortex Shedding</i> .....	58
4.11	Grafik Pengaruh Variasi Model Konverter terhadap Tegangan Listrik yang Dihasilkan .....	59
4.12	Grafik Pengaruh Massa <i>Bluff Body</i> dan Panjang Kantilever terhadap Angka Strouhal .....	61
4.13	Arah Gaya yang Bekerja pada <i>Bluff Body</i> .....	62



**DAFTAR TABEL**

	Halaman
2.1 Bilangan Reynold untuk aliran fluida pada silindris .....	7
2.2 Kekasaran Ekuivalen untuk Pipa Baru .....	16
2.3 Potensi daya energi yang dapat dihasilkan pada berbagai macam sumber .	19
3.1 Spesifikasi Model Konverter .....	39
3.2 Variasi Model Konverter .....	41
4.1 Hasil Pengujian Kekakuan ( <i>Stiffness</i> ) Batang Kantilever .....	44
4.2 Nilai Modulus Elastisitas pada Tiap Variasi Panjang Kantilever .....	46
4.3 Data Pengujian Getaran Bebas .....	48
4.4 Frekuensi Natural pada Tiap Variasi .....	50
4.5 Waktu pengisian air ke tangki 19 l yang keluar dari pipa .....	50
4.6 Hasil Frekuensi Tiap Variasi Model Konverter karena Aliran Air .....	54
4.7 Data Tegangan Listrik yang Dihasilkan Tiap Variasi Model Konverter ....	55

**DAFTAR LAMPIRAN**

	Halaman
2.1 Tabel Properti Fisika dari Beberapa Cairan yang Umum (Satuan SI) .....	68
2.2 Tabel Properti Fisika dari Air (Satuan SI).....	69
3.1 Perencanaan Tangki Reservoir .....	70
3.2 Spesifikasi Pompa Air .....	71
3.3 Spesifikasi Piezoelektrik .....	72
4.1 Data Hasil Pengujian Getaran Bebas.....	73
4.2 Data Getaran Model Konverter Akibat Aliran Air.....	79
4.3 Data Hasil Perhitungan FFT untuk Getaran Akibat <i>Vortex Shedding</i> .....	85
4.4 Dokumentasi Pelaksanaan Penelitian .....	95

## BAB 1. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Energi adalah kemampuan untuk melakukan usaha. Kebutuhan total energi di Indonesia meningkat 1,3% pertahun, dari 783 million BOE (*Barrel Oil Equivalent*) menjadi 798 million BOE selama tahun 2010 - 2015. Energi berbasis bahan bakar minyak masih mendominasi kebutuhan energi nasional dalam kurun waktu 2015 – 2050, terutama di sektor transportasi. Kebutuhan energi pada sektor transportasi meningkat 5,2% pertahun dari 256 million BOE menjadi 328 million BOE, diikuti sektor rumah tangga (3,8%) dari 82 million BOE menjadi 111 million BOE, dan sektor komersial (2,9%) dari 33 million BOE menjadi 38 million BOE. Cadangan minyak bumi di Indonesia mengalami penurunan dari 5,9 miliar barel pada tahun 1997 menjadi 3,7 miliar barel pada akhir 2015. Minyak bumi diperkirakan akan habis dalam kurun waktu 11 tahun kedepan (Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi, 2017).

Pemanfaatan energi untuk pembangkit listrik di Indonesia masih mengandalkan energi fosil yang bersifat terbatas dan tidak terbarukan. Kapasitas pembangkit listrik mencapai 59.656,30 MW yang terdiri dari pembangkit PLN sebesar 41.133,73 MW dan Non PLN sebesar 18.522,57 MW tahun 2016. Kapasitas tersebut mengalami kenaikan sebesar 4.128,20 MW atau 7,43% di bandingkan tahun 2015 (55.528,10 MW). Pembangkit listrik terbesar di Indonesia adalah Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) sebesar 16.779 MW di tahun 2016 (Statistik Ketenagalistrikan No. 30, 2017). Seluruh konsumsi batubara dalam negeri sebesar 70 juta ton (80,72%) digunakan oleh PLTU. Cadangan batubara dalam negeri mengalami penurunan sebesar 5,33 juta dari tahun 2014 sampai 2015 (DEN, 2017).

Indonesia memiliki potensi sumber daya energi baru terbarukan (EBT) yang yang belum dimanfaatkan sepenuhnya. Pemanfaatan energi baru terbarukan mendapat dukungan pemerintah dengan adanya kebijakan dan peraturan terkait dengan pengembangan dan pemanfaatan energi baru dan terbarukan, diantaranya adalah UU No. 30 tahun 2007 tentang energi yang memprioritaskan penyediaan

dan pemanfaatan energi baru dan terbarukan (DESDM, 2003). Pemerintah menerbitkan Peraturan Pemerintah No. 3 tahun 2005 tentang perubahan atas Peraturan Pemerintah No. 10 tahun 1989 tentang penyediaan dan pemanfaatan tenaga listrik yang menyatakan bahwa guna menjamin ketersediaan energi primer untuk kepentingan umum, diprioritaskan sumber energi setempat dengan kewajiban mengutamakan pemanfaatan sumber energi terbarukan (DESDM, 2005).

Indonesia memiliki potensi laut yang besar sebagai energi alternatif karena morfologi negara Indonesia yang berbentuk kepulauan. Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) tersebar di Indonesia dengan total 75.091 MW, sementara pemanfaatannya masih 11% dari total potensi (BPPT 2016). Pembangunan PLTA mengalami peningkatan setiap tahunnya mulai dari tahun 2011 (3.880,83 MW) sampai tahun 2015 (5.079,06 MW). Klasifikasi PLTA berdasarkan kapasitasnya adalah: PLTA besar (lebih dari 100 MW), PLTA menengah (15 – 100 MW), PLTA kecil (1 – 15 MW), PLTM / mini hidro (100 kW – 1 MW), PLTMH / mikro hidro (5 kW – 100 kW), dan pico hidro (kurang dari 5 kW) (Prayogo, 2003).

Sistem energi terbarukan dengan memanfaatkan *Vortex-Induced Vibration* (VIV) di dalam aliran air sebagai pembangkit listrik adalah salah satu dalam pemanfaatan energi yang tergolong pico hidro. *Vortex-Induced Vibration* (VIV) merupakan fenomena yang menempatkan kekuatan vortisitas yang terbentuk di dalam aliran air sehingga mampu menggetarkan *bluff body*. Getaran dari *bluff body* kemudian di konversi menjadi energi listrik melalui mekanisme transduksi. Mekanisme transduksi secara umum terdiri dari tiga metode, yaitu elektromagnetik, elektrostatik, dan piezoelektrik (Williams dkk., 1996).

Bernitsas, dkk., (2006), melakukan penelitian pertama dalam memanfaatkan fenomena *Vortex-Induced Vibration* (VIV) sebagai energi terbarukan untuk menghasilkan listrik. Alat penelitian tersebut diberi nama *The Vortex-Induced Vibration Aquatic Clean Energy* (VIVACE). VIVACE terdiri dari *bluff body* berbentuk silinder kaku yang dipasang pada pegas linier dan ditempatkan tegak lurus terhadap arus yang stabil. Hasil penelitian menunjukkan bahwa VIV terjadi pada rentang bilangan Reynold (Re) yang luas, bahkan dari arus yang lambat senilai 0,25 m/s. VIVACE dapat mengekstrak energi dengan rasio konversi daya yang

tinggi sehingga membuat arus laut atau arus sungai menjadi sumber daya yang lebih mudah diakses dan ekonomis.

Mehmood, dkk., (2013), melakukan simulasi konsep *energy harvesting* dari silinder sirkular yang mengalami *Vortex-Induced Vibration* (VIV). Energi di ambil dengan menggunakan piezoelektrik pada derajat kebebasan melintang. Simulasi numerik dilakukan untuk bilangan Reynolds ( $Re$ ) pada kisaran  $96 \leq Re \leq 118$ , yang mencakup area pra-sinkronisasi, sinkronisasi, dan pasca-sinkronisasi. Resistansi beban ( $R$ ) pada kisaran  $500 \Omega \leq R \leq 5 M\Omega$ . Hasilnya menunjukkan bahwa resistansi beban memiliki pengaruh signifikan terhadap keluaran tegangan, dan daya. Wilayah sinkronisasi melebar saat beban resistansi meningkat. Penelitian ini juga menemukan bahwa ada nilai optimum dari resistansi beban dimana daya yang dihasilkan maksimal.

Dai, dkk., (2014), melakukan penelitian tentang potensi penggunaan piezoelektrik sebagai *energy harvesting* dari eksitasi natural dan *Vortex-Induced Vibration* (VIV). Alat penelitian terdiri dari batang kantilever yang dilapisi oleh piezoelektrik dengan silinder yang menempel pada ujung bebasnya, kemudian ditempatkan dalam aliran udara yang seragam. Prinsip Euler-Lagrange dan prosedur Galerkin digunakan untuk mendapatkan model parameter distribusi nonlinier untuk hasil dengan kombinasi getaran dari eksitasi dasar (natural) dan getaran yang diinduksikan oleh *vortex*. Analisis linier dan nonlinier dilakukan untuk mengetahui pengaruh hambatan beban listrik, kecepatan angin, dan percepatan pada frekuensi yang digabungkan, redaman elektromekanik, dan kinerja alat. Hasil penelitian menunjukkan bahwa ketika angin berada di daerah pra- atau postsinkronisasi, redaman elektromekanik meningkat dan karenanya daya yang diperoleh berkurang. Kecepatan angin berada di area sinkronisasi menunjukkan ada peningkatan yang signifikan pada tingkat daya dihasilkan.

Berdasarkan penelitian sebelumnya, dapat diperoleh metode dan pendekatan untuk melanjutkan pemanfaatan *Vortex-Induced Vibration* (VIV) sebagai penghasil listrik. Penelitian ini berupaya memanfaatkan VIV yang dihasilkan sistem kantilever *bluff body*. Energi listrik dihasilkan oleh piezoelektrik yang ditempel

pada kantilever. Sistem kantilever *bluff body* kemudian diletakkan pada aliran air dalam pipa dengan kecepatan konstan.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas maka dapat diambil rumusan masalah sebagai berikut: “Bagaimana pengaruh massa *bluff body* dan panjang kantilever terhadap tegangan listrik?”

## 1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini diambil untuk menghindari agar pembahasan tidak meluas, sebagai berikut:

- a. Kecepatan aliran dianggap konstan
- b. Dimensi *bluff body* tetap
- c. Penampang *bluff body* berbentuk silindris
- d. Luas penampang aliran dan panjang pipa tetap
- e. Lebar batang kantilever tetap.

## 1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

- a. Mengetahui pengaruh panjang kantilever dan massa *bluff body* terhadap frekuensi *vortex shedding*
- b. Mengetahui pengaruh frekuensi *vortex shedding* terhadap tegangan listrik
- c. Mengetahui nilai angka Strouhal dari model konverter pada kondisi diameter *bluff body* tetap dan aliran air konstan.

## 1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah:

- a. Memasyarakatkan *Vortex-Induced Vibration (VIV)* sebagai sumber energi terbarukan
- b. Mengembangkan energi terbarukan yang ramah lingkungan

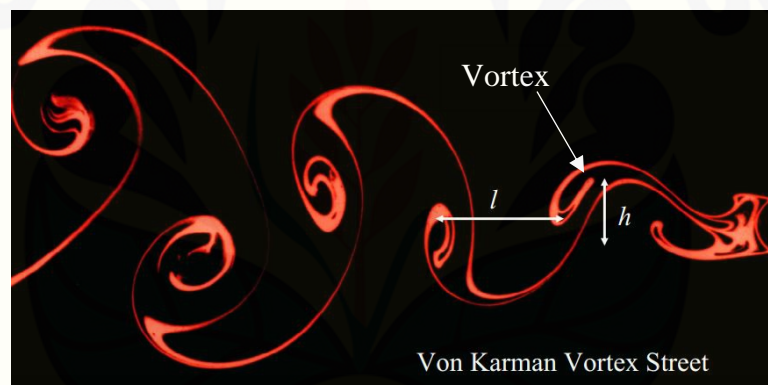
- c. Dapat mengetahui faktor-faktor yang mempengaruhi *Vortex-Induced Vibration* (VIV)
- d. Mengetahui pengaruh massa *bluff body* dan dimensi batang kantilever terhadap tegangan yang dihasil



## BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 *Vortex Shedding*

*Vortex shedding* (penumpahan pusaran) adalah fenomena munculnya bentuk *vortex* apabila benda (silindris) diletakkan dalam aliran fluida, sehingga muncul dua lapisan batas akibat gesekan viskositas fluida yang bergerak secara periodik seperti yang terlihat pada Gambar 2.1 (Bearman, 1984). Theodore Von Karman merupakan orang pertama yang menggambarkan gerak periodik pada *vortex shedding* pada tahun 1912, sehingga gerak periodik tersebut dikenal sebagai “*Karman Vortex Street*” (Gopalkrishnan, 1993). Karman menemukan bahwa jarak ideal untuk Karman vortex street adalah  $h/l = 0.281$ , dimana  $h$  adalah jarak vertikal antara vortisitas, dan  $l$  adalah jarak horizontal antara vortisitas.



Gambar 2.1 *Von Karman Street* (Sumber: Techet, 2005)

Bilangan Reynold sangat mempengaruhi bentuk *Von Karman Street* yang dihasilkan. Bilangan Reynold didefinisikan sebagai rasio antara gaya inersia terhadap gaya viskositas atau dapat didefinisikan juga sebagai parameter non-dimensional yang dipengaruhi oleh kecepatan fluida, panjang karakteristik benda, dan viskositas kinematik dari fluida (Diltz, dkk., 2017):

$$Re = \frac{UD}{\nu} \quad (2.1)$$

Dengan:

$Re$  = Bilangan Reynold (non-dimensional)

$U$  = Kecepatan aliran fluida (m/s)



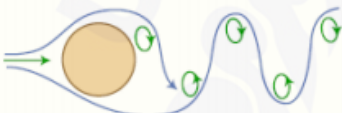





$D$  = Diameter penampang aliran atau pipa (m)

$\nu$  = Viskositas Kinematik ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

Fluida dengan bilangan Reynold sangat rendah tidak membentuk vortisitas, atau membentuk namun tidak terpisah. *Vortex shedding* mulai muncul pada bilangan Reynold diatas  $Re = 40$ , dipicu dengan gangguan kecil dalam aliran atau di permukaan benda (Dahl, 2008). Bilangan Reynold yang mempengaruhi *vortex shedding* dari sebuah silindris diringkas dalam Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Bilangan Reynold untuk aliran fluida pada silindris (Sumber: Lienhard, 1966)

	Regime of Unseparated Flow	$Re < 5$
	A Fixed Pair of Foppl Vortices in Wake	$5-15 < Re < 40$
	Two Regimes in which Vortex Street is Laminar	$40 < Re < 150$
	Transition Range to Turbulence in Vortex Street is Fully Turbulent	$150 < Re < 300$ <i>Transition to Turbulence</i> $300 < Re < 3 \times 10^5$
	Laminary Boundary Layers has Undergone Turbulent Transition and Wake is Narrower and Disorganized	$3 \times 10^5 < Re < 3,5 \times 10^6$
	Re-establishment of Turbulent Vortex Street	$3,5 \times 10^6 < Re$

Aliran fluida pada bilangan Reynold dibawah  $Re = 5$  mengikuti kontur silindris dan tidak ada *vortex* yang terbentuk. Aliran mulai terpisah di belakang silindris pada bilangan Reynold dari  $5 \leq Re \leq 40$ , namun bentuknya masih sepaang simetris. Seiring meningkatnya bilangan Reynold, salah satu vortisitas menjauh sehingga memicu pembentukan *karman street*. *Vortex shedding* terbentuk secara laminar pada bilangan Reynold  $40 \leq Re \leq 150$ . Kisaran bilangan Reynold  $150 \leq Re \leq 300$  vortisitas menjadi turbulen, namun lapisan batas dan aliran bebas masih

laminar. Gaya angkat pada kisaran bilangan tersebut tidak ada. Kisaran bilangan Reynold  $300 \leq Re \leq 3 \times 10^5$  terdapat pusaran (*shedding*) periodik yang kuat, mampu menghasilkan *vortex street* yang sepenuhnya bergejolak dan stabil. Sebagian besar eksperimen *Vortex-Induced Vibration* (VIV) dilakukan pada kisaran bilangan Reynold  $300 \leq Re \leq 3 \times 10^5$ , karena menghasilkan *vortex street* yang paling stabil dan daya angkat yang besar. Lebih dari bilangan Reynold  $3 \times 10^5$ , lapisan batas menjadi bergejolak, bentuk pusaran menjadi tidak terorganisir dan tidak dapat diprediksi. Di beberapa titik sekitar bilangan Reynold  $3 \times 10^6$ , *vortex shedding* kembali terbentuk namun dengan lapisan batas yang turbulen (Diltz, dkk., 2017)

## 2.2 *Vortex-Induced Vibration* (VIV)

Vortisitas yang dibentuk dari benda (silindris) mengerahkan gaya angkat oskilator pada benda karena adanya tekanan bergantian (periodik). Jika benda bersifat fleksibel atau tidak tetap, kekuatan ini akan menyebabkan benda berosilasi (Gabbai dan Benaroya, 2005). Osilasi dari gertakan benda (silindris) karena *vortex shedding* dikenal sebagai *vortex-induced vibration* (VIV). Benda yang berosilasi akibat VIV ini dikenal dengan sebutan *bluff body* (Collette, 2014).

Perbedaan prinsip antara *vortex shedding* dengan *vortex-induced vibration* (VIV) adalah kebebasan *bluff body* yang mengalami *vortex shedding* untuk bergerak bebas, setidaknya dalam satu derajat kebebasan. Ketika kecepatan aliran meningkat, suatu kondisi tercapai dimana frekuensi *vortex shedding* ( $f_s$ ) menjadi cukup dekat dengan frekuensi alami dari *bluff body*, sehingga tekanan dari vortisitas yang ditumpahkan mulai mendorong gerakan. Singkatnya, ketika *vortex shedding* terjadi pada frekuensi yang mendekati frekuensi alami silindris yang dipasang secara elastis atau fleksibel akan menghasilkan gerakan amplitudo yang besar. Ketika gerakan dibatasi hanya bergerak tegak lurus dengan arah arus (gerak melintang), maka gerakan hanya bisa sampai 1,5 – 2,0 kali diameter *body* (Bearman, 1984).

*Lock-in* terjadi ketika dinamika fluida struktur mencapai kesetimbangan akhir melalui penyesuaian impedansi efektif antara fluida dan struktur. Mekanisme akan menghasilkan getaran yang besar ketika frekuensi *vortex shedding* dan frekuensi

alami serupa. Gaya yang disebabkan oleh *vortex shedding* dapat mengubah massa efektif dari sistem dan memaksa sistem untuk bergerak pada frekuensi alami yang efektif, yaitu frekuensi *lock-in* (Collette, 2014). *Vortex-induced vibration* dari silindris tergantung pada beberapa kunci parameter. Parameter penting pertama adalah bilangan Reynold, seperti yang dibahas sebelumnya. Bilangan Reynold mempengaruhi pola *vortex shedding* dari aliran, yang berarti VIV hanya akan terjadi di bilangan Reynold dimana ada *vortex street* yang stabil. Sebagian besar aplikasi VIV berada di bilangan Reynold antara 300 dan  $3 \times 10^5$  (Diltz, dkk., 2017).

Parameter lain yang mempengaruhi VIV adalah bilangan Strouhal. Parameter nondimensional yang signifikan dalam VIV karena ciri mekanisme aliran berosilasi. Frekuensi *vortex shedding* tergantung pada kecepatan aliran, ukuran objek, dan diatur oleh bilangan Strouhal, sehingga didefinisikan sebagai (Diltz, dkk., 2017):

$$St = \frac{f_s D}{U} \quad (2.2)$$

Dengan:

$St$  = Bilangan Strouhal (Non-dimensional)

$f_s$  = Frekuensi *Vortex Shedding* (Hz)

$U$  = Kecepatan aliran fluida (m/s)

$D$  = Diameter silindris (m)

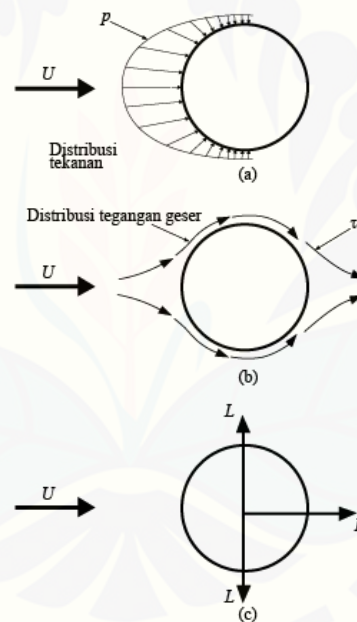
Bilangan Strouhal untuk silindris adalah fungsi dari bilangan Reynold, kekasaran permukaan, dan turbulensi aliran bebas (Gabbai dan Benaroya, 2005). Mengambil bilangan Strouhal menjadi konstan berfungsi untuk menyederhakan persamaan untuk fungsi *vortex shedding*, kecepatan aliran dan diameter silindris (Diltz, 2017).

### 2.3 Gaya yang Bekerja pada Silindris

Interaksi antara benda dengan fluida terjadi ketika sebuah benda apapun bergerak melalui sebuah fluida. Efek ini dapat digambarkan dalam bentuk gaya-gaya pada pertemuan antar-muka fluida dengan benda sehingga menimbulkan tegangan-tegangan: tegangan geser dinding ( $\tau_w$ ) akibat efek viskos dan tegangan

normal ( $p$ ) akibat tekanan (Munson, dkk., 2003). Sebagai contoh sebuah benda berbentuk silindris mengalami distribusi tegangan geser dan tekanan yang ditunjukkan pada Gambar 2.2a dan 2.2b.

Seringkali berguna jika mengetahui distribusi terperinci dari tegangan geser dan tekanan di seluruh permukaan benda, meskipun informasi serupa sulit untuk didapatkan. Namun demikian, seringkali yang diperlukan hanya efek resultan secara keseluruhan. Gaya resultan dalam arah yang sama dengan kecepatan hulu disebut sebagai *drag* atau gaya seret ( $D$ ), dan gaya resultan yang tegak lurus terhadap arah kecepatan hulu disebut sebagai *lift* atau gaya angkat ( $L$ ) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.2c.



Gambar 2.2 Gaya dari fluida di sekeliling sebuah benda silindris dua dimensi: (a) gaya tekanan, (b) gaya viskos, (c) gaya resultan (*lift* dan *drag*) (sumber: Munson, dkk., 2003)

Banyak upaya telah dilakukan dalam menentukan besaran *lift* dan *drag*. Tetapi karena kerumitan yang terlibat dan tanpa informasi terperinci yang berkaitan dengan distribusi tegangan geser dan tekanan pada sebuah benda, alternatif yang banyak digunakan adalah dengan mendefinisikan koefisien *lift* dan *drag* yang tak berdimensi dan menentukan nilai-nilai perkiraannya dengan cara baik menggunakan analisis yang disederhanakan, atau dengan beberapa teknik numerik,

atau eksperimen yang sesuai. Persamaan untuk gaya yang mempengaruhi *bluff body* silinder berdasarkan Gambar 2.2c adalah sebagai berikut (El-Mageed, 2001):

$$F_y = -F_D \sin \alpha - F_L \cos \alpha \quad (2.3)$$

Dimana gaya angkat dan gaya hambat diperoleh dari persamaan:

$$F_L = \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 A C_L \quad (2.4)$$

$$F_D = \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 A C_D \quad (2.5)$$

Dengan:

$F_y$  = gaya kearah sumbu y (N)

$F_D$  = gaya hambat (N)

$F_L$  = gaya angkat (N)

$C_L$  = koefisien gaya angkat

$C_D$  = koefisien gaya hambat

$U_{rel}$  = kecepatan angin relatif (m/s)

$A$  = luas area *bluff body* (m<sup>2</sup>)

Besarnya kecepatan aliran air ( $U_{rel}$ ) dan luas area *bluff body* ( $A$ ) dapat diperoleh dari (El-Mageed, 2001):

$$U_{rel} \cos \alpha = U \quad (2.6)$$

$$A = D \cdot L \quad (2.7)$$

Dengan:

$U$  = kecepatan aliran (m/s)

$D$  = lebar atau diameter *bluff body* (m)

$L$  = panjang *bluff body* (m)

Sehingga  $C_L$  dan  $C_D$  dapat diperoleh dengan:

$$C_L = \frac{2F_L}{\rho U_{rel}^2 D L} \quad (2.8)$$

$$C_D = \frac{2F_D}{\rho U_{rel}^2 D L} \quad (2.9)$$

## 2.4 Persamaan Bernoulli

Daniel Bernoulli (1700 – 1782) mempublikasikan *hydrodynamic* yang memuat sebuah ekivalen yang dikenal dengan persamaan Bernoulli. Prinsip Bernoulli menyatakan bahwa jumlah energi pada suatu titik di dalam aliran sama

besarnya dengan jumlah energi di titik lain pada jalur aliran yang sama, sehingga dapat didefinisikan pada Persamaan 2.10 sebagai berikut (Munson, dkk., 2003):

$$p + \frac{1}{2}\rho V^2 + \gamma z = \text{konstan} \quad (2.10)$$

Dengan:

$p$  = tekanan fluida (Pa)

$V$  = kecepatan fluida (m/s)

$\rho$  = massa jenis fluida ( $\text{kg/m}^3$ )

$\gamma$  = berat jenis fluida atau massa jenis ( $\rho$ ) dikalikan percepatan gravitasi ( $g$ ) (non-dimensional)

$z$  = Ketinggian relatif terhadap suatu referensi (m)

Persamaan Bernoulli diperoleh dengan pengintegralan persamaan gerak sepanjang arah koordinat "alamiah: dari garis-arus. Untuk menghasilkan sebuah percepatan, harus terdapat ketidakseimbangan dari gaya-gaya resultan, dimana hanya gaya tekanan dan gravitasi yang dianggap penting. Jadi, ada tiga proses yang terlibat dalam aliran-massa dikalikan percepatan ( $\rho V^2/2$ ), tekanan ( $p$ ) dan berat jenis ( $\gamma z$ ). Bentuk lain yang ekuivalen dari persamaan Bernoulli diperoleh dengan membagi setiap suku Persamaan 2.10 dengan berat jenis ( $\gamma$ ), menjadi (Munson, dkk., 2003):

$$\frac{p}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} + z = \text{konstan} \quad (2.11)$$

Setiap suku dalam Persamaan 2.11 memiliki satuan energi per satuan berat ( $LF/F = L$ ) atau panjang (feet, meter) dan menunjukkan suatu jenis *head*.

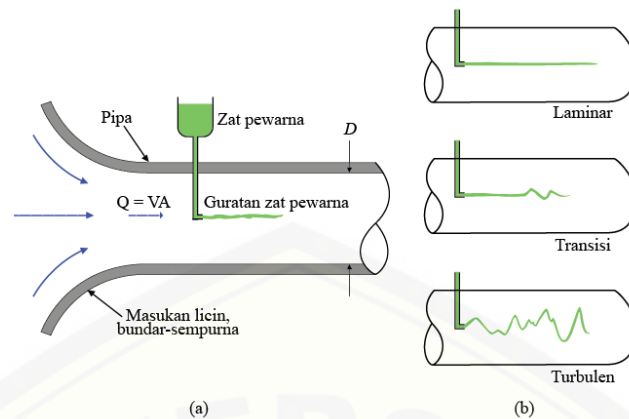
Suku ketinggian ( $z$ ), berkaitan dengan energi potensial dari partikel dan disebut sebagai *head* ketinggian. Suku tekanan ( $p/\gamma$ ) disebut *head* tekanan dan menunjukkan ketinggian kolom fluida yang diperlukan untuk menghasilkan tekanan  $p$ . Suatu kecepatan  $V^2/2g$ , adalah *head* kecepatan dan menunjukkan jarak vertikal yang dibutuhkan oleh fluida untuk jatuh bebas (dengan mengabaikan gesekan) jika fluida tersebut ingin mencapai kecepatan  $V$  dari keadaan diam. Persamaan Bernoulli menyatakan bahwa jumlah dari *head* tekanan, *head* kecepatan, dan *head* ketinggian adalah konstan sepanjang garis arus (Munson, dkk., 2003)

## 2.5 Aliran dalam Pipa

Aliran fluida seringkali digunakan asumsi fluida ideal. Fluida ideal diasumsikan tidak mempunyai kekentalan. Jika memperhatikan fluida nyata, maka pengaruh-pengaruh kekentalan harus diperhitungkan ke dalam permasalahan. Semua partikel bergerak pada garis-garis sejajar dengan kecepatan sama pada fluida ideal yang mengalir melalui suatu tabung lurus,. Kecepatan aliran fluida nyata yang terdekat dengan dinding akan nol, dan akan bertambah besar pada jarak pendek dari dinding (Orianto dan Pratikto, 1989). Adapun yang mempengaruhi aliran fluida dalam pipa adalah sebagai berikut:

### 2.5.1 Bilangan Reynold pada Aliran Fluida

Aliran fluida di dalam sebuah pipa dapat diklarifikasikan laminar atau turbulen. Osborne Reynolds (1842-1912), ilmuwan dan ahli matematika inggris adalah orang yang pertama kali membedakan dua klasifikasi aliran ini dengan menggunakan sebuah peralatan sederhana seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4a. Jika air mengalir melalui sebuah pipa berdiameter  $D$  dengan kecepatan rata-rata  $V$ , sifat-sifat berikut ini dapat diamati dengan menginjeksikan zat pewarna yang mengambang seperti ditunjukkan. Untuk “laju aliran yang cukup kecil” guratan zat pewarna (sebuah garis-gurat) akan tetap berupa garis yang terlihat jelas selama mengalir, hanya sedikit saja menjadi kabur karena difusi molekuler dari zat pewarna ke air di sekelilingnya. Untuk suatu “laju aliran sedang” yang lebih besar, guratan zat pewarna berfluktuasi menurut waktu dan ruang, dan olakan putus-putus dengan perilaku tak beraturan muncul di sepanjang guratan. Sementara itu, untuk “laju aliran yang cukup besar” guratan zat pewarna dengan sangat segera menjadi kabur dan menyebar di seluruh pipa dengan pola yang acak. Ketiga karakteristik ini, yang masing-masing disebut sebagai aliran laminar, transisi, dan turbulen diilustrasikan pada Gambar 2.3b.



Gambar 2.3 (a) Eksperimen untuk mengilustrasikan jenis aliran. (b) Guratan zat pewarna menunjukkan jenis alirannya (Sumber: Munson, dkk., 2003)

Parameter tak berdimensi pada aliran pipa yang paling penting adalah bilangan Reynold ( $Re$ ), perbandingan antara efek inersia dan viskos dalam aliran atau didefinisikan pada Persamaan 2.12 berikut (Munson, dkk., 2003):

$$Re = \rho V D / \mu \quad (2.12)$$

Dengan:

$Re$  = Bilangan Reynold (non-dimensional)

$\rho$  = massa jenis fluida ( $\text{kg/m}^3$ )

$V$  = Kecepatan aliran fluida (m/s)

$D$  = Diameter pipa (m)

$\mu$  = Viskositas fluida ( $\text{N.s/m}^2$ )

Kisaran bilangan Reynold dimana akan diperoleh aliran pipa yang laminar, transisi atau turbulen tidak dapat ditentukan dengan tepat. Transisi yang aktual dari aliran laminar ke turbulen berlangsung pada berbagai bilangan Reynold, tergantung pada berapa besar aliran terganggu oleh getaran pipa, kekasaran dari daerah masuk, dan hal-hal sejenis lainnya. Untuk keperluan teknik pada umumnya (artinya tanpa upaya menghilangkan terlebih dahulu gangguan-gangguan tersebut), nilai-nilai berikut cukup memadai: Aliran di dalam pipa bundar adalah laminar jika bilangan Reynoldnya kurang dari 2100. Aliran di dalam pipa bundar adalah turbulen jika bilangan Reynoldnya lebih besar dari 4000. Untuk bilangan Reynolds di antara kedua batas ini, aliran mungkin berubah dari keadaan laminar menjadi turbulen dengan perilaku acak yang jelas (aliran transisi) (Munson, dkk., 2003).



### 2.5.2 Viskositas Aliran

Viskositas atau juga disebut viskositas dinamik merupakan hasil dari gaya-gaya antara molekul yang timbul pada saat lapisan fluida berusaha menggeser satu dengan lainnya atau sifat dari zat cair untuk melawan tegangan geser pada waktu bergerak/mengalir. Sangat sering dalam persoalan aliran fluida, viskositas muncul dalam bentuk yang dikombinasikan dengan kerapatan sebagai: (Munson, dkk., 2003):

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2.13)$$

Dengan:

$\nu$  = Viskositas kinematik ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

$\mu$  = Viskositas dinamik ( $\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ )

$\rho$  = Massa jenis fluida ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

Perbandingan antara viskositas dinamik dengan massa jenis fluida disebut sebagai viskositas kinematik dan dilambangkan dengan huruf Yunani  $\nu$  (nu). Nilai dari viskositas kinematik untuk beberapa zat cair yang umum diberikan dalam Lampiran 2.1. Tabel yang lebih lengkap untuk menunjukkan viskositas dinamik dan kinematik terhadap temperature untuk fluida air diberikan dalam Lampiran 2.2 (Munson, dkk., 2003).

### 2.5.3 Kerugian Mayor karena Gesekan dalam Pipa

Bila fluida mengalir melalui suatu pipa dan tekanan fluida diukur pada dua tempat sepanjang pipa, akan dijumpai kenyataan bahwa tekanan berkurang dalam arah aliran. (Nurcholis, 2008). Penurunan tekanan dan kerugian head dalam sebuah pipa tergantung pada tegangan geser dinding ( $\tau_w$ ) antara fluida dengan dan permukaan pipa yang didefinisikan dengan Persamaan 2.14 (Munson, dkk., 2003):

$$\tau_w = \frac{\Delta p D}{4l} \quad (2.14)$$

Dengan:

$\tau_w$  = tegangan geser dinding pipa ( $\text{kg}/\text{m}^2$ )

$\Delta p$  = perubahan tekanan pada pipa ( $\text{kg}/\text{m}^2$ )

$D$  = diameter pipa (m)

$l$  = panjang pipa (m)

Sebuah perbedaan yang mendasar antara aliran laminar dan turbulen adalah bahwa tegangan geser untuk aliran turbulen adalah fungsi dari kerapatan fluida ( $\rho$ ). Untuk aliran laminar, tegangan geser tidak tergantung pada kerapatan, namun hanya viskositas ( $\mu$ ). Penurunan tekanan sepanjang pipa dapat dinyatakan sebagai (Munson, dkk., 2003):

$$\Delta p = f \frac{l}{D} \frac{\rho V^2}{2} \quad (2.15)$$

Dengan:

- $\Delta p$  = Penurunan tekanan ( $\text{N/m}^2$ )
- $f$  = Faktor gesekan (non-dimensional)
- $l$  = Panjang pipa (m)
- $D$  = Diameter penampang pipa (m)
- $\rho$  = Massa jenis fluida yang mengalir ( $\text{kg/m}^3$ )
- $V$  = Kecepatan aliran (m/s)

Untuk aliran laminar, nilai  $f$  secara sederhana dapat dinyatakan sebagai  $f = 64/Re$ . Sedangkan untuk aliran turbulen, ketergantungan fungsional dari faktor gesekan terhadap bilangan Reynold dan kekasaran relatif,  $f = \phi(Re, \frac{\epsilon}{D})$ , sedikit rumit sehingga belum dapat diperoleh melalui analisis teoritis. Hasil diperoleh dari banyak eksperimen dan disajikan biasanya dalam bentuk rumus pencocokan kurva atau bentuk grafik yang ekuivalen. Nilai kekasaran ekuivalen untuk beberapa jenis pipa yang sering digunakan dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Kekasaran Ekuivalen untuk Pipa Baru (Sumber: Munson, dkk., 2003)

Pipa	Kekasaran ekuivalen, $\epsilon$	
	(feet)	(millimeter)
Paku baja	0,003-0,03	0,9-9,0
Beton	0,001-0,01	0,3-3,0
Kayu diampelas	0,0006-0,003	0,18-0,9
Besi tuang	0,00085	0,26
Besi galvanisir	0,0005	0,15
Besi komersial atau besi tempa	0,00015	0,45
Pipa saluran	0,000005	0,0015
Plastik, gelas	0,0 (halus)	0,0 (halus)

Aliran dalam pipa tergolong dalam aliran tak mampu mampat dan tunak. Aliran air pada penelitian ini diperkirakan memiliki distribusi kecepatan yang *uniform* dan bersifat laminar karena pipa yang digunakan terbuat dari plastik akrilik yang memiliki nilai kekasaran ekivalen 0 seperti yang dipaparkan pada Tabel 2.2. Jika aliran tunak tak mampu mampat yang ditinjau juga melibatkan efek viskos yang dapat diabaikan (aliran tanpa gesekan), maka persamaan Bernoulli dapat digunakan untuk menggambarkan apa yang terjadi di antara dua bagian aliran. Kemudian mengubah persamaan Bernoulli ke dalam energi per satuan massa, sehingga didapat Persamaan 2.16 berikut (Munson, dkk., 2003):

$$\frac{p_1}{\gamma} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\gamma} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_L \quad (2.16)$$

Dengan:

$p_1$	= tekanan fluida pada titik 1 (kg/m <sup>2</sup> )
$p_2$	= tekanan fluida pada titik 2 (kg/m <sup>2</sup> )
$\alpha_1$	= koefisien energi kinetic pada titik 1 (non-dimensional)
$\alpha_2$	= koefisien energi kinetic pada titik 2 (non-dimensional)
$V_1$	= kecepatan aliran di titik 1 (m/s)
$V_2$	= kecepatan aliran di titik 2 (m/s)
$z_1$	= jarak titik 1 dari referensi (m)
$z_2$	= jarak titik 2 dari referensi (m)
$g$	= percepatan gravitasi (m/s <sup>2</sup> )
$h_L$	= kerugian <i>head</i> (non-dimensional)

Koefisien energi kinetic adalah kompensasi untuk kenyataan bahwa profil kecepatan di seluruh penampang pipa tidak seragam. Untuk profil kecepatan seragam  $\alpha = 1$ , sementara untuk setiap profil yang tidak seragam  $\alpha > 1$ . Kerugian *head* terletak antara titik 1 dan 2 dengan asumsi pipa berdiameter konstan ( $D_1 = D_2$  sehingga  $V_1 = V_2$ ), horizontal ( $z_1 = z_2$ ) dengan aliran berkembang penuh ( $\alpha_1 = \alpha_2$ ), persamaan 2.16 menjadi Persamaan 2.17 adalah (Munson, dkk., 2003):

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \gamma h_L \quad (2.17)$$

yang kemudian dikombinasikan dengan Persamaan 2.15 sehingga menghasilkan Persamaan 2.18 sebagai berikut (Munson, dkk., 2003):

$$h_L = f \frac{l V^2}{D 2g} \quad (2.18)$$

Persamaan 2.18 disebut sebagai persamaan Darcy-Weisbach yang berlaku untuk setiap aliran pipa tunak, tak mampu mampat dan berkembang penuh baik posisi pipa horizontal atau berada pada suatu kemiringan (Munson, dkk., 2003)

## 2.6 Transduksi Piezoelektrik

Getaran dapat dikonversi menjadi listrik menggunakan tiga mekanisme transduksi yaitu elektromagnetik, elektrostatik dan piezoelektrik (William, dkk., 1996). Beberapa publikasi yang telah muncul dengan menggunakan masing-masing dari ketiga mekanisme transduksi, dapat dilihat bahwa transduksi piezoelektrik mendapat perhatian terbesar selama lima tahun terakhir (Erturk, dkk., 2011).

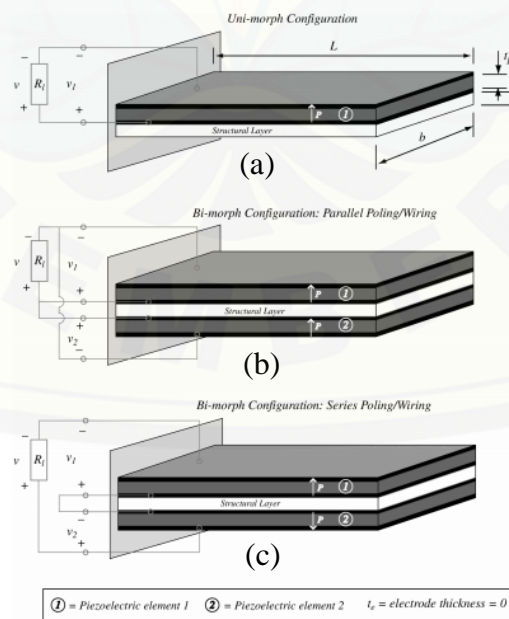
Mekanisme transduksi dengan metode elektrostatik merupakan metode yang mampu menghasilkan massa jenis energi yang paling besar, yaitu sebesar 4 mJ/cm<sup>3</sup>, disusul oleh metode piezoelektrik sebesar 35,4 mJ/cm<sup>3</sup>, dan elektromagnetik sebesar 24,8 mJ/cm<sup>3</sup> (Roundy, 2004). Meski energi yang dihasilkan piezoelektrik lebih kecil dari elektrostatik, mekanisme piezoelektrik dapat digunakan dengan rentang frekuensi yang luas dan mudah diimplementasikan (Mitcheson, 2004). Luaran tegangan dalam *energy harvesting* menggunakan elektromagnetik biasanya sangat rendah dan sering *multistage* pasca pemrosesan diperlukan untuk mencapai tingkat tegangan yang dapat mengisi komponen penyimpanan. Berbeda dengan piezoelektrik, luaran tegangan dapat diperoleh langsung dari bahan piezoelektrik itu sendiri (Rafique, 2018).

Potensi daya piezoelektrik dapat dimanfaatkan untuk menyuplai daya pada *wireless sensing devices* yang digunakan untuk memonitor suatu struktur atau sistem secara nirkabel, karena memiliki keunggulan ukuran yang kompak, tidak terpengaruhi gangguan elektromagnetik, tanpa polusi dan minim perbaikan (Zhao dkk., 2017). Tabel 2.3 menunjukkan potensi energi listrik yang dihasilkan piezoelektrik dibandingkan sumber penghasil listrik lainnya.

Tabel 2.3 Potensi daya energi yang dapat dihasilkan pada berbagai macam sumber (Sumber: Rafique, 2018)

Sumber energi	Mekanisme konversi	Energy Level
Getaran	Piezoelektrik	100 mW/cm <sup>3</sup>
	Elektromagnetik	0,5 – 8 mW/cm <sup>3</sup>
	Elektrostatik	8 nW – 42,9 μW/cm <sup>3</sup>
Cahaya	Fotovoltaik (luar ruangan)	100 mW/cm <sup>2</sup>
	Fotovoltaik (dalam ruangan)	100 μW/cm <sup>2</sup>
Radiasi lingkungan	Frekuensi radio	≤ 1 mW/cm <sup>2</sup>
Angin	Turbin	200 – 800 μW/cm <sup>2</sup>
Panas	<i>Thermoelectric, thermionic, thermo-tunnelling</i>	60 μW/cm <sup>2</sup>

Keuntungan yang lain dari piezoelektrik adalah dapat digunakan baik dalam skala makro maupun mikro. Piezoelektrik digunakan pada batang kantilever dengan satu atau dua lapisan piezoelektrik (yaitu unimorph atau bimorph) seperti terlihat pada Gambar 2.4.

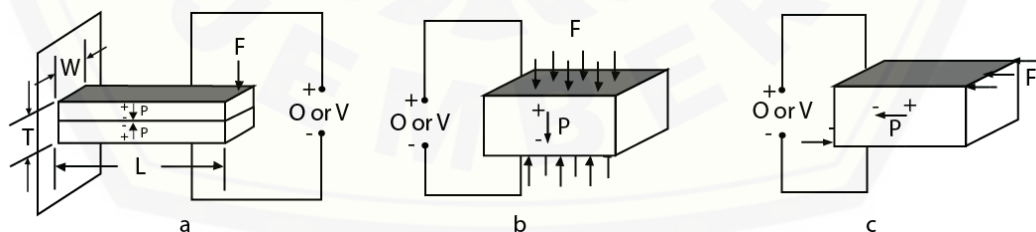


Gambar 2.4 (a) Rangkaian paralel pada unimorph (b) Rangkaian paralel pada bimorph (c) Rangkaian seri pada bimorph (Sumber: Dutoit, dkk., 2006)

Batang kantilever diletakkan pada struktur yang bergetar, kemudian diinduksi pada lapisan piezoelektrik menghasilkan keluaran berupa tegangan bolak-balik di seluruh elektroda pada piezoelektrik.

Bahan piezoelektrik memiliki kemampuan untuk mengubah tekanan mekanis menjadi energi listrik. Bahan ini memiliki struktur kristal dan umumnya mengandung dipol listrik. Ketika stress (tegangan) mekanik diterapkan, akan mengubah arah polarisasi dan menghasilkan medan listrik (Ledoux, 2011). Jumlah tegangan yang dihasilkan berbanding lurus dengan tekanan pada material tersebut. Bahan piezoelektrik sering berupa kristal seperti kuarsa dan keramik seperti ZnO, AlN, dan timbal zirkonat titanat (PZT). PZT adalah material piezoelektrik yang paling umum digunakan karena relatif murah, kuat dan tahan lama. Film piezoelektrik seperti polyvinylidene fluoride (PVDF) juga sering digunakan sebagai pengganti kristal dan keramik. Film piezoelektrik dengan kombinasi keramik membuat piezoelektrik lebih cocok untuk aplikasi dengan perpindahan yang besar. Namun salah satu keterbatasan film piezoelektrik adalah tidak efektif dalam melakukan konversi elektromekanik, terutama pada frekuensi rendah (Rafique, 2018).

Bahan piezoelektrik digunakan untuk pembangkit listrik dengan menginduksi tegangan mekanik pada elemen piezo yang terhubung ke sirkuit resistif. Tegangan mekanik dapat berupa kelenturan, kompresi, atau tegangan geser seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.5.

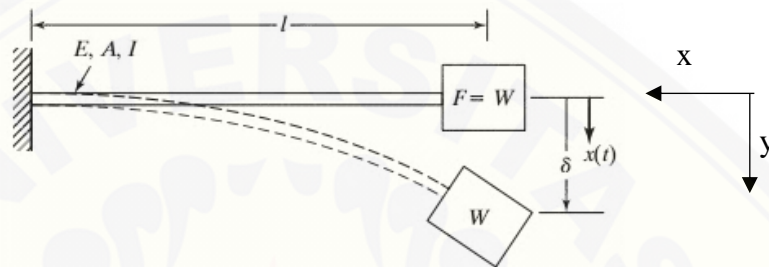


Gambar 2.5 Tegangan mekanik pada elemen piezo (a) Bending (b) kompresi (c) geser (sumber: Diltz dkk, 2017)

## 2.7 Batang Kantilever (*Cantilever Beam*)

Batang yang dikenai gaya serta momen yang terletak pada suatu bidang yang mempunyai sumbu longitudinal disebut balok (*beam*). Suatu balok jika dijepit pada

salah satu ujungnya, sehingga sumbu balok tidak dapat berputar pada titik tersebut, maka balok disebut dengan balok kantilever (*cantilever beam*). Sebuah balok kantilever dengan ketebalan tertentu mampu menggantikan fungsi pegas untuk melakukan osilasi. Apabila sebuah massa diletakkan pada salah satu ujung balok yang lain dengan diberi gaya maka massa akan bergetar secara periodik. Penerapan gaya  $F$  pada blok massa  $m$  seperti terlihat pada Gambar 2.6 menghasilkan perpindahan  $\delta$  (Rao, 2011).



Gambar 2.6 Kantilever dengan Gaya Diujung Batang (Sumber: Rao, 2011)

Blok massa melekat pada balok tipis atau lebih tepatnya disebut batang tipis, maka besar kekakuan pada batang kantilever didapat menggunakan Persamaan 2.19 (Rao, 2011):

$$k = \frac{F}{\delta} \quad (2.19)$$

Dengan

$k$  = Kekakuan batang kantilever (N/m)

$F$  = Gaya yang diberikan pada batang (N)

$\delta$  = Jarak defleksi dari titik kesetimbangan (m)

Sifat kekakuan pada suatu material kantilever dideskripsikan pada Persamaan 2.19. Apabila Gaya ( $F$ ) diperbesar maka jarak defleksi ( $\delta$ ) akan bertambah, sehingga nilai kekakuan suatu material bernilai konstan. Nilai defleksi kekakuan secara teoritis didefinisikan dengan Persamaan 2.20 (Rao, 2011):

$$\delta = \frac{Wl^3}{3EI} \quad (2.20)$$

Dengan

$\delta$  = Nilai defleksi batang (m)

$W$  = Berat beban pada ujung batang (N)

$l$  = Panjang batang (m)

$E$  = Modulus Young batang ( $\text{N/m}^2$ )

$I$  = Momen inersia batang ( $\text{kg.m}^2$ )

Diasumsikan bahwa berat batang diabaikan untuk penyederhanaan dan beban terkonsentrasi pada  $F$  yang disebabkan oleh berat beban  $W$ . Sehingga  $F = W$ , maka persamaan 2.20 dikombinasikan dengan Persamaan 2.19 menghasilkan Persamaan 2.21 berikut:

$$k = \frac{W}{\delta} = \frac{3EI}{l^3} \quad (2.21)$$

Jika gaya tiba-tiba dihilangkan, blok akan berosilasi di sekitar daerah kesetimbangan. Energi regangan awal berubah menjadi energi kinetic dan sebaliknya. Massa batang jika lebih kecil dari massa blok, maka inersia batang dapat diabaikan dan batang bersifat sebagai pegas. Untuk penampang persegi dapat diketahui momen inersianya adalah (Beer, dkk., 2006):

$$I = \frac{wd^3}{12} \quad (2.22)$$

Dengan

$w$  = lebar batang (m)

$d$  = ketebalan batang (m).

Sebuah batang menerima beban, maka batang tersebut akan mengalami lendutan atau defleksi. Defleksi diperbolehkan asal masih dalam wilayah toleransi yang diijinkan. Hubungan antara jari-jari lenturan dengan momen lentur adalah (Beer, dkk., 2006):

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{EI} \quad (2.23)$$

Dengan

$\rho$  = Jari-jari lenturan (mm)

$M$  = Momen lenturan (N)

$E$  = Modulus Elastisitas ( $\text{N/m}^2$ )

$I$  = Momen Inersia ( $\text{m}^4$ )

Lenturan  $\frac{1}{\rho}$  berbanding lurus dengan  $M$  dan berbanding terbalik dengan  $EI$ . Jika

$M = 0$  maka  $\rho \rightarrow \infty$  yang berarti elemen struktur tersebut lurus, seperti yang seharusnya terjadi pada elemen struktur yang momennya nol. Jika momennya



semakin besar, maka jari-jari kelengkungannya semakin kecil, yang berarti elemen struktur semakin lengkung saat dibebani.

Persamaan 2.23 dapat dinyatakan sebagai lendutan struktur batang. Karena momen  $M$  pada elemen struktur umumnya berubah-ubah disepanjang elemen struktur, maka jari-jari sesaat kelengkungan juga berubah-ubah, sehingga kelengkungan di sepanjang elemen struktur tersebut tidak seragam. Jika kurva lendutan didefinisikan sebagai  $y = y(x)$ , maka dengan penyelesaian kalkulus akan diperoleh Persamaan 2.24 sebagai berikut (Beer, dkk., 2006):

$$\frac{1}{\rho} = \frac{(d^2y/dx^2)}{[1 + (dy/dx)^2]^{3/2}} \approx \frac{d^2y}{dx^2} \quad (2.24)$$

$dy/dx$  menyatakan kemiringan struktur di suatu titik, sehingga

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{M}{EI} \quad (2.25)$$

Banyak metode yang dapat digunakan dalam menghitung defleksi, salah satunya menggunakan metode integrasi menggunakan Persamaan 2.25. Dimana  $M$  sama dengan  $W$  yang bekerja yang didefinisikan pada Persamaan 2.26 (Beer, dkk., 2006):

$$W = mg \quad (2.26)$$

Persamaan 2.26 dimasukkan ke Persamaan 2.25, maka:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{1}{EI} mg \quad (2.27)$$

Hasil pengintegralan dari Persamaan 2.27 adalah (Beer, dkk., 2006):

$$y = \frac{1}{EI} \left( \frac{Wx^3}{6} + C_1x + C_2 \right) \quad (2.28)$$

Menentukan syarat batas untuk mencari persamaan  $C_1$  dan  $C_2$ , dimana batas untuk  $C_1$  adalah  $x = L; dy/dx = 0$ , maka:

$$\begin{aligned} \frac{dy}{dx} &= \frac{1}{EI} \left( \frac{Wx^2}{2} + C_1 \right) \\ 0 &= \frac{1}{EI} \left( \frac{WL^2}{2} + C_1 \right) \\ C_1 &= \frac{WL^2}{2EI} \end{aligned} \quad (2.29)$$

Mencari nilai  $C_2$  dimana batasnya untuk  $x = L; y = 0$ , maka:

$$\begin{aligned}
 y &= \frac{1}{EI} \left( \frac{Wx^3}{6} + \frac{WL^2}{2}x + C_2 \right) \\
 0 &= \frac{1}{EI} \left( \frac{WL^3}{6} + \frac{WL^2}{2}L + C_2 \right) \\
 0 &= \frac{1}{EI} \left( \frac{WL^3}{6} + \frac{WL^3}{2} + C_2 \right) \\
 C_2 &= \frac{WL^3}{3EI}
 \end{aligned} \tag{2.30}$$

Persamaan 2.29 dan 2.30 dimasukkan ke Persamaan 2.28 sehingga menghasilkan Persamaan 2.31 sebagai berikut (Beer, dkk., 2006):

$$y = \frac{1}{EI} \left( \frac{Wx^3}{6} + \frac{WL^2}{2}x + \frac{WL^3}{3} \right) \tag{2.31}$$

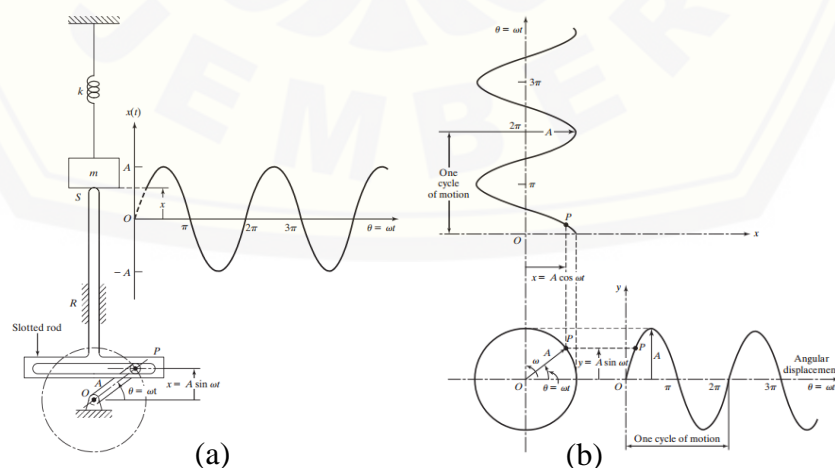
Dengan  $y$  adalah besar defleksi pada titik  $x$ .

## 2.8 Getaran Mekanik

Gerak osilasi massa pada batang kantilever akan menghasilkan suatu grafik getaran longitudinal. Grafik tersebut digunakan untuk menentukan karakteristik getaran yang dihasilkan oleh suatu sistem. Beberapa bagian dari getaran yang perlu diperhatikan, yaitu sebagai berikut:

### 2.8.1 Siklus

Siklus getaran adalah massa yang bergerak bolak balik dari posisi kesetimbangan ke posisi ekstremnya dalam satu arah, kemudian kembali ke posisi kesetimbangan dan menuju ke posisi ekstrem di arah yang berbeda, dan kembali ke posisi kesetimbangan seperti digambarkan pada Gambar 2.7a dan 2.7b.



Gambar 2.7 (a) Mekanisme Scotch Yoke (b) Gerak harmonik sebagai proyeksi akhir dari vector yang berputar (Sumber: Rao, 2011)

### 2.8.2 Amplitudo

Simpangan terjauh pada massa yang bergetar dari posisi kesetimbangannya disebut amplitude getaran. Amplitudo disimbolkan huruf  $A$  pada Gambar 2.7.

### 2.8.3 Periode Osilasi

Waktu yang dibutuhkan untuk melakukan satu siklus gerak dikenal sebagai periode osilasi atau periode waktu dan dilambangkan dengan  $\tau$ . Periode ini sama dengan waktu yang dibutuhkan untuk vektor  $OP$  berputar melalui sudut  $2\pi$ . Sehingga dapat didefinisikan dengan Persamaan 2.32 (Rao, 2011):

$$\tau = \frac{2\pi}{\omega} \quad (2.32)$$

Dengan:

$$\begin{aligned} \tau &= \text{Periode osilasi (s)} \\ \omega &= \text{Kecepatan sudut (m/s)} \end{aligned}$$

Periode adalah kebalikan dari frekuensi, sehingga persamaanya adalah (Rao, 2011):

$$\tau = \frac{1}{f} \quad (2.33)$$

Dengan:

$$f = \text{frekuensi osilasi (Hz)}$$

Karena periode diartikan sebagai waktu yang dibutuhkan dalam melakukan 1 siklus sehingga periode juga dapat di definisikan dengan persamaan (Rao, 2011):

$$\tau = \frac{t}{n} \quad (2.34)$$

Dengan:

$$\begin{aligned} t &= \text{waktu (s)} \\ n &= \text{jumlah siklus} \end{aligned}$$

### 2.8.4 Frekuensi Osilasi

Jumlah siklus dalam satuan waktu disebut dengan frekuensi yang dilambangkan dengan  $f$ . Frekuensi osilasi dapat didefinisikan sebagai (Rao, 2011):

$$f = \frac{1}{\tau} = \frac{\omega}{2\pi} \quad (2.35)$$

Karena frekuensi diartikan sebagai jumlah siklus yang terjadi dalam satuan waktu juga kebalikan dari periode, maka persamaan frekuensi menjadi (Rao, 2011):

$$f = \frac{n}{t} \quad (2.36)$$

## 2.9 Frekuensi Natural pada Sistem

Jika suatu sistem setelah diberi gaya awal dari luar kemudian dibiarkan bergetar sendiri, frekuensi berosilasi tanpa gaya eksternal dikenal sebagai frekuensi alami atau frekuensi natural. Persamaan yang digunakan untuk mencari frekuensi natural secara teoritis pada suatu sistem adalah (Thomson, 1980):

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.37)$$

Dengan:

$k$  = Kekakuan pegas (N/m)

$m$  = Massa benda (g)

$\omega_n$  = Frekuensi radial (Rad/s)

Karena  $\omega_n$  diasumsikan sama dengan  $\omega$  pada Persamaan 2.35, sehingga kombinasi antara persamaan 2.35 dengan 2.37 menjadi:

$$2\pi f = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.38)$$

Maka persamaan untuk mencari frekuensi natural secara teoritis adalah (Rao, 2011):

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.39)$$

Dengan:

$f_n$  = Frekuensi natural (Hz)

Frekuensi natural dari osilator harmonik sederhana tergantung pada kekakuan dalam sistem dan besar massa. Untuk massa ( $m$ ) menempel pada batang yang memiliki kekakuan ( $k$ ) dengan salah satu ujung batang dijepit sementara ujung yang lain terdapat massa yang bergetar. Pada fenomena VIV apabila frekuensi *vortex shedding* mendekati atau sama dengan frekuensi natural osilasi struktur ( $f_s \approx f_n$ ), struktur akan merespon dengan ikut bergetar yang disebut fenomena resonansi. Resonansi yang terjadi akan memperkuat amplitudo getaran (Assi, 2009).

Frekuensi natural dari batang kantilever sangat bergantung dengan fluida dimana batang tersebut berada. Fluida air memiliki tingkat massa jenis yang lebih tinggi dibandingkan udara. Akibatnya batang kantilever akan menerima gaya redam yang lebih besar, sehingga frekuensi naturalnya berkurang. Perbandingan antara

frekuensi natural batang kantilever di ruang hampa dengan frekuensi natural di dalam fluida dapat diimplementasikan menggunakan Persamaan 2.40 (Chu,1963):

$$\frac{f_n^{fluid}}{f_n^{vac}} = \left(1 + \frac{\pi\rho b}{4\rho_b h}\right)^{-1/2} \quad (2.40)$$

Dengan:

$f_n^{fluid}$  = Frekuensi natural batang di fluida (Hz)

$f_n^{vac}$  = Frekuensi natural batang di ruang hampa (Hz)

$\rho$  = Massa jenis fluida ( $\text{kg/m}^3$ )

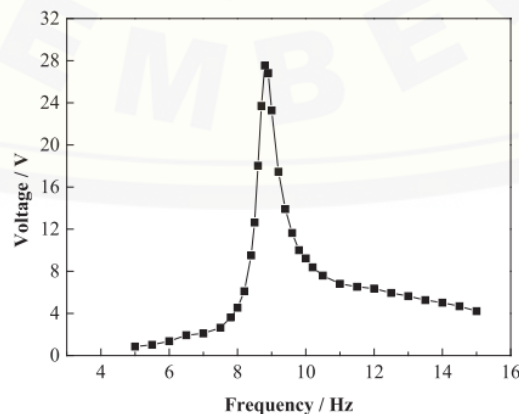
$b$  = Lebar batang kantilever (m)

$h$  = Tebal batang kantilever (m)

$\rho_b$  = Massa jenis batang kantilever ( $\text{kg/m}^3$ )

Beberapa simulasi kantilever untuk mencari frekuensi natural di dalam air telah dilakukan. Hasilnya menunjukkan nilai frekuensi di udara mendekati nilai frekuensi natural di ruang hampa, hanya memiliki selisih yang kecil. Sehingga frekuensi natural di udara dapat diasumsikan sebagai  $f_n^{vac}$ . Berdasarkan penelitian yang telah dilakukann, nilai frekuensi natural di air mengalami penurunan sebesar 20% dari frekuensi natural di udara (Elabbasi, 2014).

Sistem akan beresonansi ketika menerima frekuensi eksitasi lingkungan yang setara dengan frekuensi naturalnya. Amplitudo dan tegangan listrik yang dihasilkan oleh piezoelektrik pada saat resonansi mencapai nilai maksimum. Adapun hubungan frekuensi natural terhadap tegangan listrik ditunjukkan pada Gambar 2.8 (Zhao, dkk., 2017).



Gambar 2.8 Grafik Hubungan frekuensi natural (Hz) terhadap tegangan listrik (V)  
(Sumber: Zhao, dkk., 2017)

Gambar 2.8 adalah grafik hasil penelitian yang dilakukan oleh Zhao tahun 2017. Hasilnya menunjukkan bahwa terdapat frekuensi tertentu yang merupakan frekuensi natural suatu sistem. Tegangan mencapai nilai maksimum saat sistem bergetar pada frekuensi naturalnya.

### 2.10 Fourier Transform

Transformasi Fourier adalah persamaan yang digunakan untuk mentransformasi sinyal nonperiodik dari waktu kontinyu ke dalam kawasan frekuensi. Transformasi Fourier  $F(\omega)$  dari waktu kontinyu  $f(t)$  didefinisikan pada Persamaan 2.41 dan invers transformasi pada Persamaan 2.42 sebagai berikut (Hsu, 1976):

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt \quad (2.41)$$

Invers Transformasi:

$$f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega)e^{i\omega t} d\omega \quad (2.42)$$

Dengan:

$F(\omega)$  = Fungsi dalam domain frekuensi (Hz)

$f(t)$  = Fungsi dalam domain waktu (s)

$\omega$  = Frekuensi radial  $0 - 2\pi f$  (rad/s)

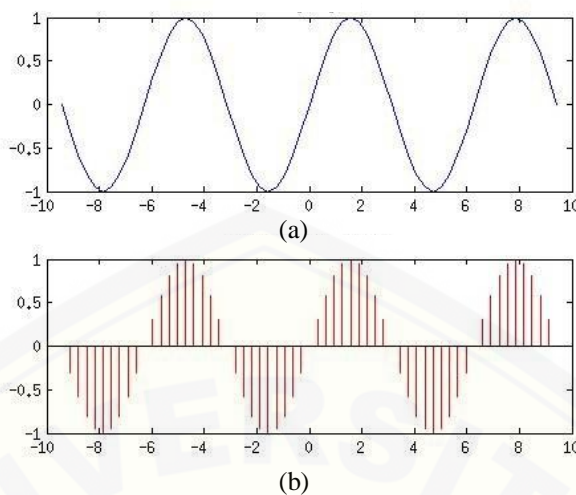
Atau  $\omega$  dapat dituliskan dengan Persamaan 2.43 yaitu:

$$\omega = 2\pi f \quad (2.43)$$

Dengan  $f$  adalah frekuensi (Hz)

#### 3.10.1 Discrete Fourier Transform (DFT)

Transformasi Fourier memerlukan sampel-sampel pada kawasan frekuensi dan waktu untuk dapat digunakan dalam operasi digital. Sampel sinyal kontinyu pada kawasan waktu akan mempresentasikan keseluruhan sinyal kontinyu tersebut. Sampel yang membentuk sebuah grafik getaran (Gambar 2.8a) juga dapat diketahui bentuk grafik diskritnya seperti terlihat pada Gambar 2.8b.



Gambar 2.9 Grafik getaran domain waktu (a) Grafik analog (b) Grafik diskrit

Transformasi fourier diskrit atau disebut dengan *Discrete Fourier Transform* (DFT) adalah model transformasi fourier yang dikenakan pada fungsi diskrit. Persamaan 2.44 mendefinisikan DFT untuk sampel sinyal dalam domain waktu (Matter, 2008):

$$F(k) = \sum_{n=1}^N f(n)e^{-j2\pi knT/N} \quad (2.44)$$

Dengan:

$F(k)$  = Fungsi diskrit ke-k ( $k = 0, 1, 2, 3, \dots$ )

$N$  = Jumlah Sampel

$n$  = Sampel ke-n

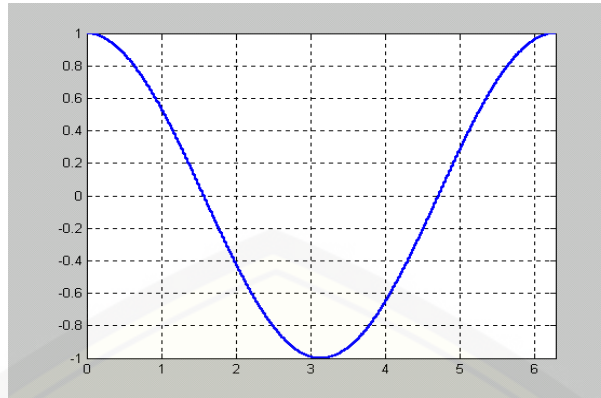
$T$  = Periode sampling (s)

$j$  = variable integer

Periode sampling mempengaruhi proses perhitungan DFT, sehingga aturan frekuensi Niquist digunakan sebagai acuan bahwa frekuensi sampling minimal dua kali frekuensi informasi (data) atau periode sampling maksimal setengah kali periode dari nilai fungsinya (Matter,2008).

### 3.10.2 *Fast Fourier Transform* (FFT)

*Fast Fourier Transform* atau disingkat FFT adalah algoritma perhitungan untuk menghitung DFT dengan cepat dan efisien (Hsu, 1976). Sebagai contoh sebuah grafik diperlihatkan pada Gambar 2.9 berikut:



Gambar 2.10 Gelombang fungsi cosinus 1 periode (Sumber: Matter, 2008)

Nilai fungsi cosinus untuk setengah bagian di sebelah kiri terlihat sama dengan setengah bagian di sebelah kanan, atau nilai fungsi cosinus untuk setengah periode adalah kebalikan horizontal (*shift*) dari nilai setengah periode sebelumnya, sehingga dapat dituliskan dengan Persamaan 2.45 sebagai berikut (Matter, 2008):

$$\cos\left(\frac{T}{2} - x\right) = -\cos(x), \text{ untuk } 0 < x < T/2 \quad (2.45)$$

Dengan:

$x$  = nilai pada sumbu  $x$

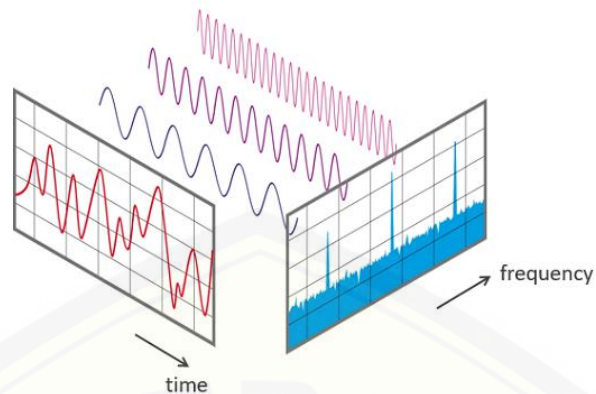
$T$  = Periode sampling (s)

Berdasarkan sifat diatas, maka perhitungan DFT dapat disederhanakan dengan menghitung setengah periode, sedangkan setengah periode berikutnya dapat dihitung dengan Persamaan 2.46 sebagai berikut (Matter, 2008):

$$F\left(x + \frac{T}{2}\right) = \text{Real}\left\{F\left(\frac{T}{2} - x\right)\right\} - j \text{Im}\{F(x)\} \quad (2.46)$$

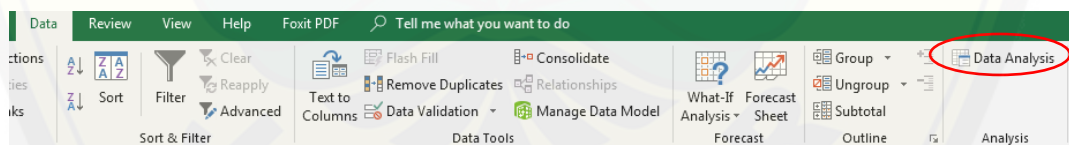
Transformasi Fourier mendeskripsikan spektrum dari getaran atau sinyal yang tidak homogen. Salah satu contoh adalah terdapat sinyal selama periode waktu yang dibagi menjadi komponen frekuensi. Komponen-komponen ini adalah osilasi sinusoidal tunggal pada frekuensi, amplitude, dan fase yang berbeda pada tiap komponennya. Transformasi ini diilustrasikan pada Gambar 2.10 (Matter, 2008). Selama periode waktu yang diukur, sinyal mengandung 3 frekuensi dominan yang berbeda





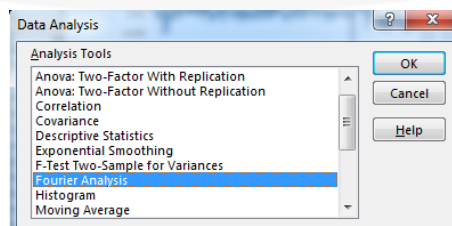
Gambar 2.11 Konversi Sinyal dari Domain Waktu ke Domain Frekuensi (Sumber: Matter, 2008)

Perhitungan FFT digunakan untuk mengetahui nilai frekuensi dari grafik tegangan yang dihasilkan dari pembacaan alat oscilloscope. FFT dapat dilakukan dengan menggunakan beberapa perangkat lunak, salah satunya adalah pada Ms. Excel. Data sampel yang didapat dari pembacaan alat oscilloscope sebanyak  $N$  data dengan jarak waktu  $t$  detik. Maka nilai *sample rate* adalah  $N/t = x(n)$ . Artinya dalam waktu 1 detik dapat diambil sebanyak  $x(n)$  data. Nilai tegangan ditransformasi menggunakan *Fourier analysis* yang ada pada Ms. Excel. Caranya adalah klik Data pada *menu bar* kemudian pilih *Data Analysis* seperti yang terlihat pada Gambar 2.11.



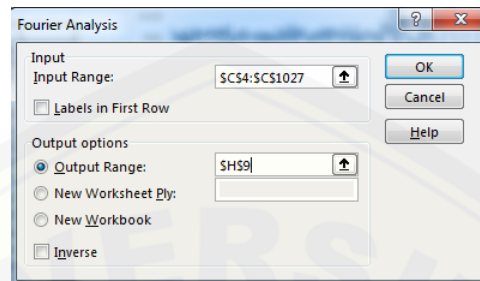
Gambar 2.12 Pilihan *Data Analysis* pada *Menu Bar* Ms. Excel

Setelah *Data Analysis* diklik maka akan muncul tampilan seperti Gambar 2.12. Pilih *Fourier Analysis*, kemudian klik Ok.



Gambar 2.13 Tampilan *Data Analysis*

Maka akan muncul tampilan seperti Gambar 2.13. Masukkan data grafik tegangan dari oscilloscope pada kolom *input range*, masukkan kolom untuk menampilkan hasilnya pada kolom *output range*. Kemudian klik Ok.



Gambar 2.14 Tampilan *Fourier Analysis* pada Ms. Excel

Excel akan menampilkan hasil bilangan kompleks dari Fourier analysis pada kolom *output*. Bilangan kompleks adalah gabungan dari bilangan nyata (*real*) dengan bilangan imajiner. Bentuk umum bilangan kompleks seperti ditunjukkan pada Persamaan 2.47:

$$z = a + bi \quad (2.47)$$

Dengan:

$z$  = Bilangan kompleks

$a$  = Bilangan real

$bi$  = Bilangan imajiner

Seperti yang dijelaskan pada Persamaan 2.46 bahwa hasil perhitungan analisis Fourier berupa bilangan kompleks. Hasil bilangan kompleks tersebut kemudian diubah ke bilangan mutlak menggunakan formula IMABS pada perangkat lunak Ms. Excel atau menggunakan Persamaan 2.48 sebagai berikut:

$$R = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (2.48)$$

Dengan:

$R$  = Bilangan mutlak

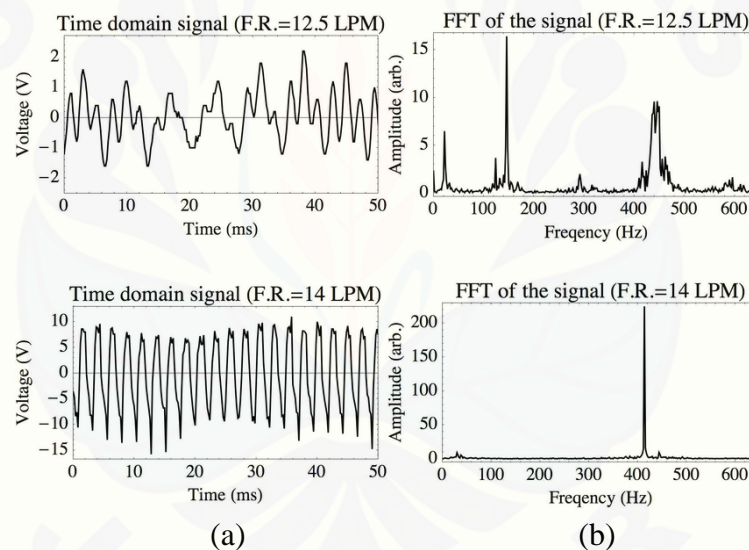
$a$  = Bilangan real

$b$  = Koefisien bilangan imajiner

Tiap sel kompleks hasil *Fourier analysis* mewakili koefisien untuk frekuensi mulai dari 0 dan kelipatannya hingga sel terakhir memiliki frekuensi akhir sebesar nilai *sample rate*. Frekuensi didapat dari perkalian jumlah langkah

sebelumnya dikali dengan *sample rate* yang dibagi oleh jumlah data dikurangi satu. Formula excel untuk frekuensi adalah  $=F11*(\$G\$4)/(\$G\$3-1)$ , dengan kolom F11 adalah jumlah langkah sebelumnya, G4 adalah *sample rate*, dan G3 adalah jumlah sampel.

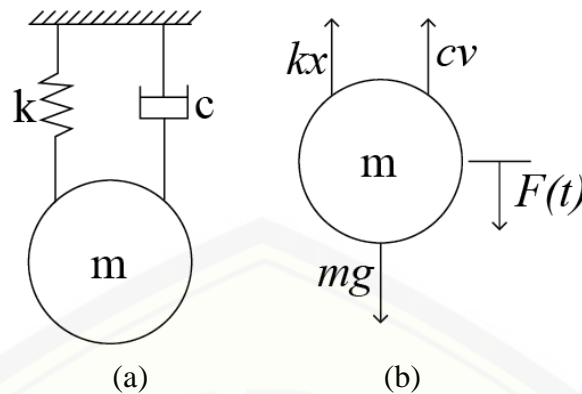
Frekuensi yang dimiliki oleh getaran acak dapat diketahui dari grafik antara bilangan mutlak dengan frekuensi. Bilangan mutlak biasa disebut sebagai *magnitude*. Letak bilangan *magnitude* yang paling besar menunjukkan nilai frekuensi yang dimiliki oleh grafik getaran acak. Grafik getaran acak dengan domain waktu sebagai sumbu x dapat dilihat pada Gambar 2.14a kemudian grafik tersebut diubah ke domain frekuensi sebagai sumbu x yang ditunjukkan pada Gambar 2.14b.



Gambar 2.15 (a) Grafik Getaran domain waktu (b) Grafik Hasil FFT domain frekuensi (Sumber: Sherrit, 2015)

### 3.11 Persamaan Matematis Sistem Konverter

Sistem konverter dapat dimodelkan secara matematis dalam suatu sistem massa pegas seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.16a. Model konverter menggunakan sistem getaran 1-DOF (*Degree Of Freedom*) yang terdiri dari massa ( $m$ ), kekakuan pegas ( $k$ ), dan konstanta peredam ( $c$ ). Arah gaya yang bekerja pada massa bergetar ditunjukkan pada Gambar 2.16b.



Gambar 2.16 Model matematis (a) Sistem massa dengan pegas dan peredam (b) Gaya yang bekerja pada massa (Sumber: Rao, 2011)

Massa bergerak secara translasi akibat gaya dari luar, sehingga berlaku hukum Newton kedua yang menyatakan bahwa sebuah massa ( $m$ ) mengalami gaya resultan sebesar  $F$  mengalami percepatan ( $a$ ) yang arahnya sama dengan arah gaya, dan besarnya berbanding lurus terhadap  $F$  dan berbanding terbalik terhadap  $M$  atau dapat ditunjukkan dengan Persamaan 2.49 (Kelly, 2011):

$$\sum F = ma \quad (2.49)$$

Dengan:

$m$  = massa silindris (kg)

$a$  = percepatan ( $m/s^2$ )

Berdasarkan arah gaya yang bekerja pada massa seperti ditunjukkan pada

Gambar 2.16b, maka persamaan resultan gaya dapat ditulis (Kelly, 2011):

$$mg - kx - cv + F(t) = ma \quad (2.50)$$

$$ma + cv + kx = mg + F(t) \quad (2.51)$$

Dengan:

$k$  = kekakuan pegas (N/m)

$c$  = koefisien peredam (Ns/m)

$x$  = jarak simpangan (m)

$g$  = percepatan gravitasi ( $m/s^2$ )

$v$  = kecepatan (m/s)

$F(t)$  = gaya dari luar (N)

Variabel  $ma$  mewakili gaya inersia dari silinder. Redaman dalam sistem diakibatkan karena gaya gesek viskos dari fluida, sehingga bentuk persamaan redamannya adalah (Stinson, dkk., 2011):

$$c = 2m\zeta\omega_n \quad (2.52)$$

Dengan:

$\zeta$  = konstanta redaman fluida (nondimensional)

$\omega_n$  = frekuensi natural silindris (Hz)

Variabel  $F(t)$  adalah gaya periodik yang diberikan pada silindris oleh vortisitas aliran. Diasumsikan  $F(t)$  adalah fungsi sinusoidal dengan frekuensi yang setara dengan frekuensi natural silindris. Persamaan  $F_L$  digunakan untuk mengetahui amplitudo  $F(t)$ , dimana persamaan  $F_L$  adalah (Stinson, dkk., 2011):

$$F_L = \frac{1}{2}\rho_{fluid}U^3DLC_L \quad (2.53)$$

Dengan:

$F_L$  = gaya lift pada silindris (N)

$\rho_{fluid}$  = massa jenis fluida ( $\text{kg/m}^3$ )

$U$  = kecepatan aliran fluida (m/s)

$D$  = diameter silindris (m)

$L$  = panjang silindris (m)

$C_L$  = koefisien lift

Persamaan amplitudo silindris terhadap waktu didefinisikan pada Persamaan 2.54 sebagai berikut (Stinson, dkk., 2011):

$$A(t) = \frac{F_L \times \sin\left(\omega_n t + \frac{\pi}{2}\right)}{k \sqrt{\left(1 - \left(\frac{f_s}{f_n}\right)^2\right)^2 + 4\zeta^2 \left(\frac{f_s}{f_n}\right)^2}} \quad (2.54)$$

Dengan:

$f_s$  = frekuensi vortex shedding (Hz)

$f_n$  = frekuensi natural (Hz)

Kecepatan silindris ditentukan dengan menurunkan Persamaan 2.54 terhadap waktu menjadi (Stinson, dkk., 2011):

$$v(t) = \frac{d}{dt} A(t) \quad (2.55)$$

Dengan:

$$v(t) = \text{Kecepatan silindris (m/s)}$$

Daya ditentukan dari hasil perhitungan kecepatan dan gaya lift pada silindris akibat *vortex shedding* ditunjukkan pada Persamaan 2.56 (Stinson, dkk., 2011):

$$P(t) = v(t) \times F_L \times \sin(\omega_n t) \quad (2.56)$$

Rata-rata daya yang dihasilkan dapat ditentukan dengan Persamaan 2.57 (Stinson, dkk., 2011):

$$P_{avr} = \frac{P_{max}}{\sqrt{2}} \quad (2.57)$$

Dengan:

$$P_{avr} = \text{daya rata-rata (W)}$$

$$P_{max} = \text{daya maksimum dari sistem (W)}$$

Daya maksimum yang mampu dihasilkan dari kondisi fluida tertentu dapat ditentukan menggunakan Persamaan 2.58 (Stinson, dkk., 2011):

$$P_{fluid} = \frac{1}{2} \rho_{fluid} \times U^3 \times D \times L \quad (2.58)$$

Dengan:

$$P_{fluid} = \text{Daya maksimum pada fluida tertentu (W)}$$

$$\rho_{fluid} = \text{massa jenis fluida (kg/m}^3\text{)}$$

Efisiensi sistem dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.59 (Stinson, dkk., 2011):

$$\eta = \frac{P_{avr}}{P_{fluid}} \quad (2.59)$$

### 3.12 Hipotesis

Berdasarkan kajian pustaka di atas, maka hipotesis yang dapat diambil dalam penelitian ini adalah:

- a. Semakin bertambah panjang kantilever akan menurunkan nilai kekakuan dan frekuensi naturalnya, karena nilai frekuensi natural rendah akan menurunkan tegangan yang dihasilkan pada kecepatan aliran air tertentu.
- b. Variasi massa *bluff body* yang paling ringan akan mudah berosilasi dikarenakan gaya yang diperlukan lebih kecil.

## BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Metode Penelitian

Penelitian ini tentang pemanfaatan *vortex-induced vibration* (VIV) untuk mengetahui pengaruh massa *bluff body* dan panjang batang kantilever terhadap tegangan yang dihasilkan oleh piezoelektrik. Penelitian menggunakan metode eksperimen yaitu membuat sistem aliran air dalam pipa dan model konverter berupa batang kantilever dengan *bluff body* pada salah satu ujung batangnya. Batang kantilever terbuat dari material galvalum yang ditempelkan piezoelektrik. Model konverter kemudian diletakkan di dalam sistem aliran pipa. Alat oscilloscope di sambungkan pada piezoelektrik untuk membaca grafik tegangan yang dihasilkan. Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Rekayasa Mekanika Universitas Jember dan sungai di area Jalan Kaliurang Kabupaten Jember yang dimulai tanggal 24 Mei 2018

### 3.2 Alat dan Bahan Penelitian

#### 3.2.1 Alat

- a. Oscilloscope (Proscope Parallax USB Oscilloscope)
- b. Alat uji bending (*Twist and Bend Machine Testing Ph*)
- c. Timbangan digital (*Professional Digital Table Top Scale 500g × 0.01g*)
- d. Jangka sorong (Mitutoyo ketelitian 0,01 mm)
- e. Pompa air (TPR1 30CX *Centrifugal Pump*)

#### 3.2.2 Bahan

- a. Silindris diameter 11 mm dan tinggi 28 mm
- b. Plat galvalum
- c. Piezoelektrik tipe bending model MEAS LDT0-028K
- d. Pipa akrilik diameter luar 50 mm dan diameter dalam 46 mm
- e. Pipa PVC diameter 1,5 inch
- f. Plastisin
- g. Tangki air 43 L
- h. Plat logam tebal 0,5 mm

### 3.3 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian untuk melakukan uji coba pemanfaatan *vortex-induced vibration* (VIV) sebagai penghasil listrik tenaga air meliputi:

1. Studi Literatur

Studi literatur dilakukan dengan mengumpulkan kajian teori yang bersumber dari buku, jurnal, dan hasil penelitian sebelumnya. Materi yang dipelajari antara lain: mekanika fluida, *vortex-induced vibration* (VIV), karakteristik piezoelektrik, dan getaran mekanik.

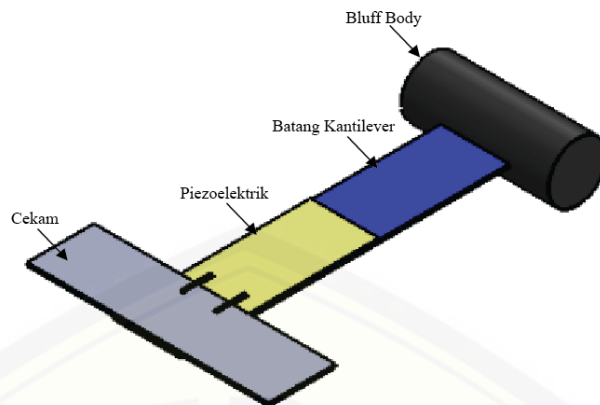
2. Pembuatan Aliran Air dalam Pipa

Pembuatan aliran air dalam pipa ini terdiri dari 1 tangki, pipa akrilik, pipa PVC, pompa, selang, serta *sealer*. Kapasitas tangki yang digunakan adalah 43 L. Pipa yang digunakan adalah pipa akrilik berukuran diameter luar 50 mm dan diameter dalam 46 mm dengan panjang 200 mm. Pipa akrilik kemudian disambungkan di antara pipa PVC dengan panjang pipa PVC luar adalah 326 mm dan panjang pipa PVC dalam adalah 566 mm, sehingga panjang rangkaian pipa adalah 1092 mm. Pipa rangkaian kemudian dipasang pada tangki dengan jarak antara titik tengah lubang dengan permukaan air adalah 390 mm, dan jarak antara dasar tangki dengan lubang adalah 60 mm. Gambar rancangan sistem aliran dapat dilihat pada Lampiran 3.1. Pompa air dengan bahan bakar bensin digunakan untuk mengalirkan air ke dalam tangki hingga tumpah. Tujuannya adalah untuk mempertahankan jarak antara lubang keluaran dengan permukaan air, sehingga kecepatan aliran dalam pipa dapat dianggap konstan. Adapun spesifikasi pompa diesel dapat dilihat pada Lampiran 3.2.

3. Pembuatan Model Konverter

Model konverter terbuat dari bahan galvalum sebagai batang kantilever, silindris plastik sebagai *bluff body* dan plastisin sebagai pengisi massa *bluff body*. Cekam terbuat dari plat logam dengan tebal 0,5 mm. Model konverter dapat dilihat pada Gambar 3.1. Penelitian ini menggunakan 9 model konverter dengan spesifikasi yang berbeda, adapun spesifikasi model konverter dapat dilihat pada Tabel 3.2.





Gambar 3.1 Bagian-bagian model konverter

Tabel 3.1 Spesifikasi Model Konverter

Bluff Body	Massa (gram)	1,5 ; 2,5 ; 3,5
	Diameter (mm)	11
	Tinggi (mm)	28
Batang Kantilever	Panjang (mm)	30 ; 40 ; 50
	Lebar (mm)	17
	Tebal (mm)	0,26
Piezoelektrik	Panjang (mm)	25
	Lebar (mm)	13
	Tebal ( $\mu\text{m}$ )	28

#### 4. Pengujian Getaran Bebas Model Konverter

Pengujian getaran bebas pada model konverter bertujuan untuk mengetahui nilai frekuensi natural ( $f_n$ ) sekaligus nilai kekakuan ( $k$ ) tiap variasi.

#### 5. Pengujian Model Konverter

Pengujian dilakukan dengan meletakkan model konverter pada penampang pipa akrilik dengan menggunakan plat logam sebagai cekamnya. Posisi model konverter adalah horizontal dengan posisi *bluff body* sejajar dengan gaya gravitasi. *Bluff body* menghadap ke arah datangnya aliran, sehingga fenomena *vortex-induce vibration* dapat terjadi. Air sungai dialirkan ke dalam tangki hingga tumpah dengan menggunakan pompa. Air dalam tangki akan mengalir melalui pipa dan menghantam model konverter. Model konverter bergetar

akibat adanya *vortex-induced vibration* (VIV) yang ditimbulkan oleh aliran air yang menghantam *bluff body*, kemudian getaran dikonversikan menjadi tegangan listrik menggunakan piezoelektrik. Oscilloscope yang dihubungkan pada piezoelektrik akan membaca tegangan yang dihasilkan berupa data grafik

#### 6. Hasil dan Pembahasan

Hasil pengujian berupa data angka dan grafik antara waktu dan tegangan. Data kemudian dianalisis untuk menentukan nilai frekuensi *vortex shedding* ( $f_s$ ), tegangan listrik (V), dan angka Strouhal (St).

#### 7. Kesimpulan

Penarikan kesimpulan didapat dari hasil analisis data pengujian tiap variasi

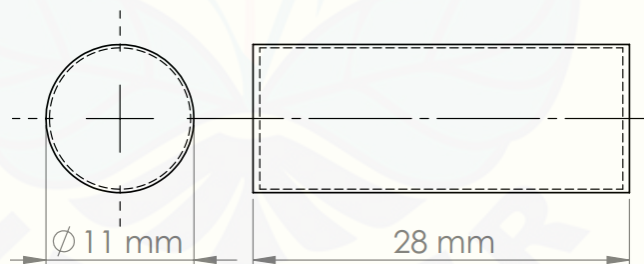
### 3.4 Pelaksanaan Penelitian

#### 3.4.1 Variabel Penelitian

Variabel pada penelitian ini meliputi variabel kontrol, variabel bebas dan variabel terikat sebagai berikut:

##### a. Variabel Kontrol

- 1) Dimensi bluff body, dengan diameter 11 mm dan panjang 28 mm



Gambar 3.2 Dimensi *Bluff Body*

- 2) Aliran air dengan kecepatan konstan 2,68 m/s

##### b. Variabel Terikat

Variabel terikat yang diukur akibat pengaruh dari variabel bebas pada penelitian ini adalah:

- 1) Tegangan (V)

Tegangan yang dihasilkan dari piezoelektrik akibat model konverter yang beresilasi.

2) Frekuensi Natural ( $f_n$ )

Nilai frekuensi natural pada model konverter didalam fluida air.

3) Frekuensi *Vortex Shedding* ( $f_s$ )

Frekuensi *Vortex shedding* yang dihasilkan dari tiap variasi model konverter pada kecepatan aliran air konstan.

## c. Variabel bebas

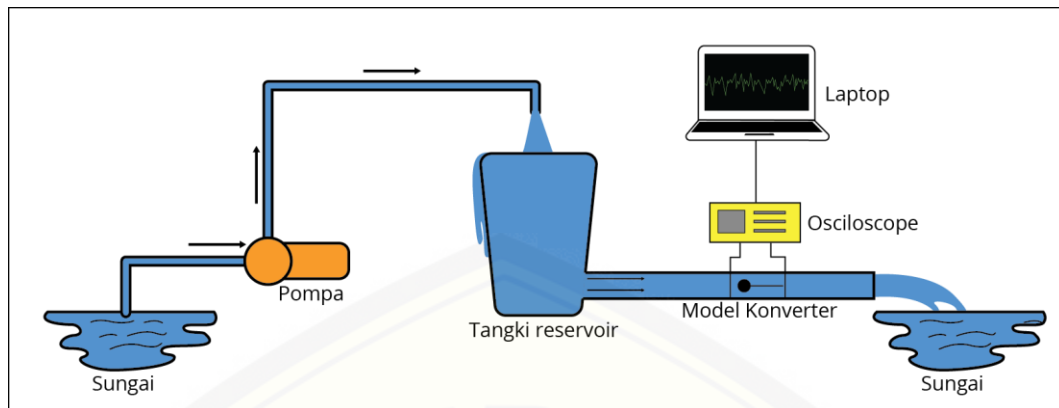
Variabel bebas yang menjadi faktor pengaruh pada penelitian ini adalah massa *bluff body* dan panjang kantilever yang dapat dilihat pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Variasi Model Konverter

	<b>Massa Bluff Body (<math>m_b</math>)</b>			
		1,5 gram	2,5 gram	3,5 gram
Panjang batang ( $L_c$ )	30 mm	Model Konverter 1 Panjang: 30 mm Massa BD: 1,5 gr	Model Konverter 2 Panjang: 30 mm Massa BD: 2,5 gr	Model Konverter 3 Panjang: 30 mm Massa BD: 3,5 gr
	40 mm	Model Konverter 4 Panjang: 40 mm Massa BD: 1,5 gr	Model Konverter 5 Panjang: 40 mm Massa BD: 2,5 gr	Model Konverter 6 Panjang: 40 mm Massa BD: 3,5 gr
	50 mm	Model Konverter 7 Panjang: 50 mm Massa BD: 1,5 gr	Model Konverter 8 Panjang: 50 mm Massa BD: 2,5 gr	Model Konverter 9 Panjang: 50 mm Massa BD: 3,5 gr

## 3.4.2 Pengujian Model Konverter

Penelitian dilakukan dengan menggunakan aliran air dalam pipa yang mengalir dari tangki penampung. Air sungai dialirkan ke dalam tangki hingga tumpah dengan menggunakan pompa. Akibat tekanan air di bawah lebih besar, maka air akan mengalir keluar melalui pipa dan kembali ke sungai. Skema penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.3.



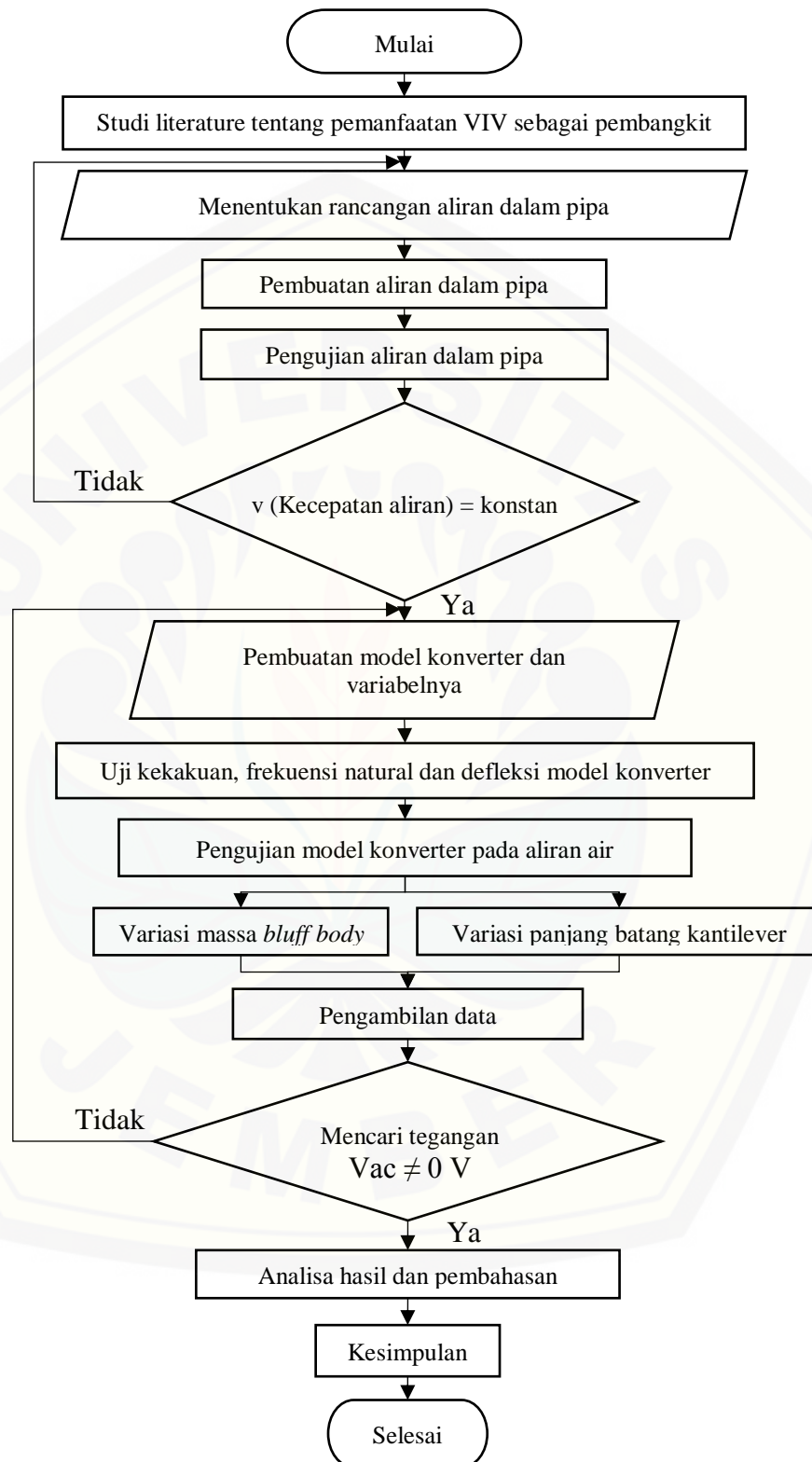
Gambar 3.3 Skema penelitian dengan metode eksperimen

Pompa akan terus menaikkan air ke dalam tangki untuk mempertahankan ketinggian air. Kecepatan aliran air pada pipa akan konstan apabila ketinggian air tetap. Model konverter dipasang pada bagian tengah pipa untuk menerima aliran air. Oscilloscope akan membaca tegangan AC yang dihasilkan dari piezoelektrik yang bergetar pada model konverter, kemudian grafik tegangan ditampilkan pada laptop. Oscilloscope diatur dengan skala waktu 200 ms dan skala tegangan 100 mV dapat dilihat pada Gambar 3.4. Data yang dihasilkan sebanyak 1024 sampel dalam waktu 4,187 detik.



Gambar 3.4 Pengaturan pada Oscilloscope

## 3.5 Diagram Alir Penelitian



## BAB 5. PENUTUP

### 5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian tentang pemanfaatan *Vortex-Induced Vibration* (VIV) sebagai penghasil tegangan tenaga air adalah sebagai berikut:

- Frekuensi *vortex shedding* terbesar adalah  $f_s = 18,41$  Hz terjadi pada kantilever paling pendek ( $L_c = 30$  mm) dengan massa *bluff body* paling kecil ( $m_b = 1,5$  g) dan frekuensi *vortex shedding* terkecil adalah  $f_s = 6,45$  Hz terjadi pada kantilever paling panjang ( $L_c = 50$  mm) dengan massa *bluff body* paling besar ( $m_b = 3,5$  g).
- Nilai tegangan listrik terbesar adalah  $V = 43$  mV tercapai pada saat frekuensi *vortex shedding* paling besar ( $f_s = 18,41$  Hz) dan nilai tegangan listrik terkecil adalah  $V = 18$  mV yang dihasilkan pada frekuensi *vortex shedding* paling kecil ( $f_s = 6,45$  Hz).
- Angka Strouhal tekecil adalah  $S_t = 0,026$  pada frekuensi *vortex shedding*  $f_s = 6,45$  Hz dan angka Strouhal terbesar adalah  $S_t = 0,075$  pada frekuensi *vortex shedding*  $f_s = 18,41$  Hz, dimana kondisi diameter *bluff body* tetap dan kecepatan aliran air konstan.

### 5.2 Saran

Penelitian tentang pemanfaatan *Vortex-Induced Vibration* (VIV) sebagai penghasil tegangan listrik tenaga air ini terdapat kekurangan yang perlu diperbaiki diantaranya adalah

- Sambungan pipa baiknya menggunakan shock untuk mengurangi turbulensi akibat permukaan pipa.
- Piezoelektrik mengalami defleksi akibat gravitasi, sehingga perlu mengetahui defleksi piezoelektrik pada kondisi tanpa eksitasi.

Adapun hal yang perlu dilanjutkan dari peneliti ini yaitu dalam hal:

- Pengaruh kecepatan aliran air terhadap tegangan listrik
- Pengaruh material pipa terhadap kerugian (*losses*) terhadap daya listrik.

- c. Pengkondisian aliran air mendekati riil (aliran sungai, gelombang laut dan lain sebagainya).
- d. Pengaruh variasi bentuk model konverter terhadap frekuensi *vortex shedding*



**DAFTAR PUSTAKA**

- Anton, Steven R., dan Henry A. Sodano. 2007. A review of power energy harvesting using piezoelectric materials (2003-2006). *Smart materials and structures*. 16(2007): R1-R21.
- Assi, G. R. S. 2009. Mechanism for Flow-Induced Vibration of Interfering Bluff Bodies. *Tesis*. London: Degree of Doctor of Philosophy. University of London.
- Audio, NTi. How an FFT Works. [www.nti-audio.com](http://www.nti-audio.com) [diakses tanggal 26 Oktober 2018]
- Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi. 2017. *Outlook Energi Indonesia 2017*. Jakarta: Pusat Teknologi Sumber Daya Energi dan Industri Kimia.
- Bernitsas, Michael M., Kamaldev Raghavan, Y. Ben-Simon, E. M. H. Garcia. 2008. VIVACE (Vortex Induced Vibration Aquatic Clean Energy): A New Concept in Generation of Clean and Renewable Energy from Fluid Flow. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. 130: 041101.
- Blevins, R. (1990). *Flow-Induced Vibration*. New York: Van Nostrand Reinhold.
- Chu, W.-H., Technical Report No. 2, DTMB, Contract No.86396(X), Southwest Research Institute, San Antonio, TX, 1963.
- Collete, Marina I. R. 2014. Prediction Method of the Vortex Induced Vibration of a One Degree-of-Freedom Spring-Mass System. *Tesis*. Washington: Ocean Engineering. University of Rhode Island.
- Cook-Chennault, K.A, N. Thambi, dan A.M. Sastry. 2008. Powering MEMS portable device – a review of non-regenerative and regenerative power supply system with emphasis on piezoelectric energy harvesting systems. *Smart Materials and Structures*.17: 043001.
- Currie, I. G. 2003. *Fundamental Mechanics of Fluids*. Third Edition. New York: Marcel Dekker, Inc.
- Dai, H. L., A. Abdelkefi, dan L. Wang. 2014. Theoretical modeling and nonlinear analysis of piezoelectric energy harvesting from vortex-induced vibrations. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*: 1-14.
- Diltz, Natalie, Julie Gagnon, Jacqueline O'Connor, Jessica Wedell. 2017. Energy Harvesting through Piezoelectric Transducers. *Skripsi*. Worcester: Worcester Polytechnic Institute.



- Dutoit, Noel E., dan Brian L. Wardle. 2006. Performance of microfabricated piezoelectric vibration energy harvesters. *Integrated Ferroelectrics: An International Journal*. 83(1): 13-32
- Ellabasi, Nagi. 2014. Natural Frequencies of Immersed Beams. <https://www.comsol.com/blogs/natural-frequencies-immersed-beams> [Diakses tanggal 8 Oktober 2018]
- Erturk, A., D. J. Inman. 2008. A distributed parameter electromechanical model for cantilevered piezoelectric energy harvesters. *Journal of Vibration and Acoustics*. 130: 041002.
- Erturk, Alper, dan Daniel J. Inman. 2011. *Piezoelectric Energy Harvesting*. First Edition. Chichester: John Wiley and Sons, Ltd.
- El-Mageed, Mostafa G., Mustara Arafa, Mohamed Elaraby. 2014. Simulation and experimental investigation of an energy harvester utilizing flow induced vibration. *Proceeding of the ASME IDETC/CIE 2014*. DETC2014-34596.
- Gaddai, R. D., H. Benaroya. 2004. An overview of modeling and experiments of vortex-induced vibration of circular cylinders. *Journal of sound and vibration*. 282 (2005): 575-616.
- Juwito, Arif Febriansyah, Sasongko Pramonohadi, T. Haryono. 2012. Optimalisasi Energi Terbarukan pada Pembangkit Tenaga Listrik dalam Menghadapi Desa Mandiri Energi di Margajaya. *Jurnal Ilmiah Semesta Teknika*. 15(1): 22-34.
- Kelly, S. Graham. 2012. *Mechanical Vibrations Theory and Applications*. SI Edition. Stamford: Cengage Learning.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. 2016. *Outlook Energi Indonesia 2016*. Jakarta: Sekretariat Jenderal Dewan Energi Nasional.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. 2016. *Statistik Ketenagalistrikan 2015*. Edisi nomor 29. Jakarta: Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. 2017. *Statistik Ketenagalistrikan 2016*. Edisi nomor 30. Jakarta: Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan.
- Massachusetts Institute of Technology. 2004. *Laboratory module No. 1 elastic behavior in tension, bending, buckling, and vibration*. Cambridge: Department of Mechanical Engineering.

- Mehmood, A., A. Abdelkefi, M. R. Hajj, A. H. Nayfeh, I. Akhtar, dan A.O. Nuhait. 2013. Piezoelectric energy harvesting from vortex-induced vibrations of circular cylinder. *Journal of Sound and Vibration*. 332(2013): 4656-4667.
- Munson, Bruce R., Donald F. Young, dan Theodore H Okiishi. 2002. *Fundamentals of Fluid Mechanics*. Fourth edition. USA: John Wiley and Sons, Inc. Terjemahan oleh Harinaldi, dan Budiarmo. 2003. *Mekanika Fluida Jilid 1*. Edisi keempat. Jakarta: Erlangga.
- Munson, Bruce R., Donald F. Young, dan Theodore H Okiishi. 2002. *Fundamentals of Fluid Mechanics*. Fourth edition. USA: John Wiley and Sons, Inc. Terjemahan oleh Harinaldi, dan Budiarmo. 2003. *Mekanika Fluida Jilid 2*. Edisi keempat. Jakarta: Erlangga.
- Nurcholis, Lutfi. 2008. Perhitungan Laju Aliran Fluida pada Jaringan Pipa. *Jurnal Unimus*. 7: ISSN 1693-3451.
- Rao, Singiresu S. 2011. *Mechanical Vibration*. Fifth Edition. Upper Saddle River: Pearson Education, Inc.
- Roundy, S., and P. K. Wright. 2004. A piezoelectric vibration based generator for wireless electronics. *Smart Materials and Structures*. 13(2004): 1131 – 1142.
- Sudarja. 2016. *Mekanika Fluida*. Yogyakarta: Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.
- Van Loan, Charles. 1992. Computational Frameworks for the Fast Fourier Transform. *SIAM*.
- Williamson, C.H.K., dan R. Govardhan. 2004. Vortex-Induced Vibrations. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 36(1): 413-455
- Zulhadi, Trian, dan Said Fazli. 2010. Identifikasi Sumber Energi Terbarukan. *Balitbang Bengkalis*: 196-209.

LAMPIRAN

Lampiran 2.1 Tabel Properti Fisika dari Beberapa Cairan yang Umum (Satuan SI)

Cairan	Temperatur (°C)	Densitas, $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Berat Jenis, $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Viskositas Dinamik, $\mu$ (N.s/m <sup>2</sup> )	Viskositas Kinematik, $\nu$ (m <sup>2</sup> /s)	Tegangan Permukaan <sup>a</sup> , $\sigma$ (N/m)	Tegangan Uap, $p_v$ [N/m <sup>2</sup> (abs)]	Modulus Bulk <sup>b</sup> , $E_v$ (N/m <sup>2</sup> )
Karbon tetraklorida	20	1.590	15,6	9.58E-04	6.03E-07	2.69E-02	1.30E+04	1.31E+09
Etil alkohol	20	789	7,74	1,19E-03	1,51E-06	2,28E-02	5,90E+03	1,06E+09
Bensin <sup>c</sup>	15,6	680	6,67	3,10E-04	4,60E-07	2,20E-02	5,50E+04	1,30E+09
Gliserin	20	1.260	12,4	1,50E+00	1,19E-03	6,33E-02	1,40E-02	4,52E+09
Air Raksa (Merkuri)	20	1.3600	133	1,57E-03	1,15E-07	4,66E-01	1,60E-01	2,85E+10
Minyak <sup>c</sup> SAE 30	15,6	912	8,95	3,80E-01	4,20E-04	3,60E-02	-	1,50E+09
Air laut	15,6	1.030	10,1	1,20E-03	1,17E-06	7,34E-02	1,77E+03	2,34E+09
Air	15,6	999	9,8	1,12E-03	1,12E-06	7,34E-02	1,77E+03	2,15E+09

<sup>a</sup>Bersentuhan dengan udara.

<sup>b</sup>Modulus Bulk Isentropik yang dihitung dari kecepatan suara.

<sup>c</sup>Nilai tipikalnya (Properti dari produk minyak bumi bervariasi).

Lampiran 2.2 Tabel Properti Fisika dari Air (Satuan SI)<sup>a</sup>

Temperatur (°C)	Densitas, $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Berat Jenis <sup>b</sup> , $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Viskositas Dinamik, $\mu$ (N.s/m <sup>2</sup> )	Viskositas Kinematik, $\nu$ (m <sup>2</sup> /s)	Tegangan Permukaan <sup>c</sup> , $\sigma$ (N/m)	Tekanan Uap, $p_v$ [N/m <sup>2</sup> (abs)]	Kecepatan Suara <sup>d</sup> , $c$ (m/s)
0	999,9	9,806	1,787 E-3	1,787 E-6	7,56 E-2	6,105 E+2	1403
5	1000,0	9,807	1,519 E-3	1,519 E-6	7,49 E-2	8,722 E+2	1427
10	999,7	9,804	1,307 E-3	1,307 E-6	7,42 E-2	1,228 E+3	1447
20	998,2	9,789	1,002 E-3	1,004 E-6	7,28 E-2	2,338 E+3	1481
30	995,7	9,765	7,975 E-4	8,009 E-7	7,12 E-2	4,243 E+3	1507
40	992,2	9,731	6,529 E-4	6,580 E-7	6,96 E-2	7,376 E+3	1526
50	988,1	9,690	5,468 E-4	5,534 E-7	6,79 E-2	1,233 E+4	1541
60	983,2	9,642	4,665 E-4	4,745 E-7	6,62 E-2	1,992 E+4	1552
70	977,8	9,589	4,042 E-4	4,134 E-7	6,44 E-2	3,116 E+4	1555
80	971,8	9,530	3,547 E-4	3,650 E-7	6,26 E-2	4,734 E+4	1555
90	965,3	9,467	3,147 E-4	3,260 E-7	6,08 E-2	7,010 E+4	1550
100	958,4	9,399	2,818 E-4	2,940 E-7	5,89 E-2	1,013 E+5	1543

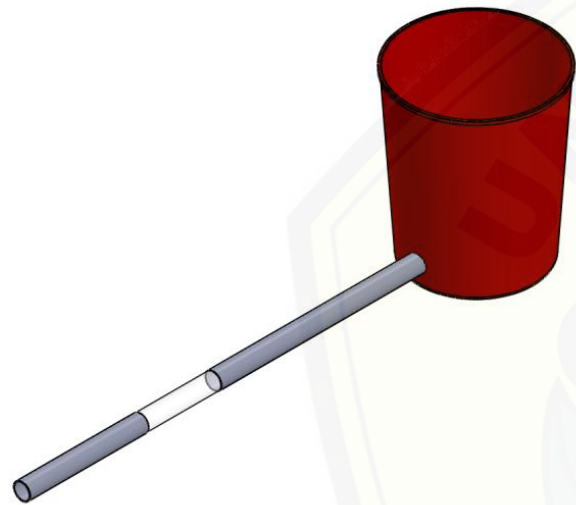
<sup>a</sup>Didasarkan atas data dari *Handbook of Chemistry and Physics*, 69<sup>th</sup> Ed., CRC Press, 1988.

<sup>b</sup>Densitas dan berat jenis berhubungan melalui persamaan  $\gamma = \rho g$ . Untuk tabel ini,  $g = 9,807 \text{ m/s}^2$ .

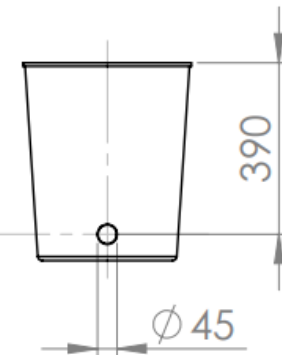
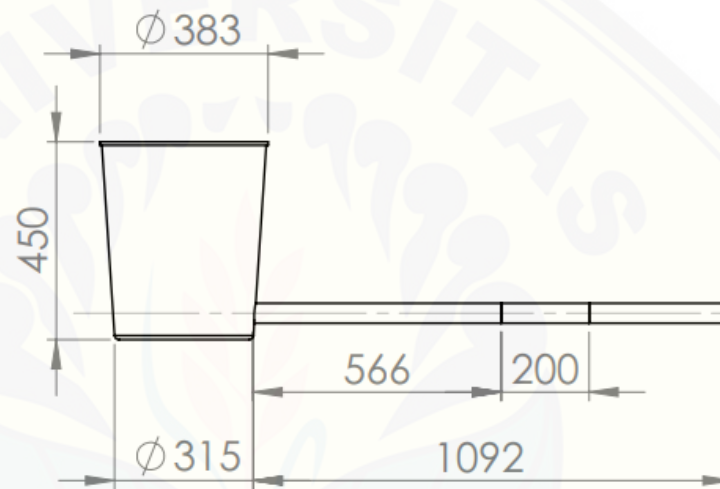
<sup>c</sup>Bersentuhan dengan udara.

<sup>d</sup>Dari R. D. Blevins, *Applied Fluid Dynamics Handbook*, Van Nostrand Reinhold Co., Inc., New York, 1984.

Lampiran 3.1 Perencanaan Tangki Reservoir



Rancangan 3D Tangki Reservoir



Rancangan 2D Tangki Reservoir

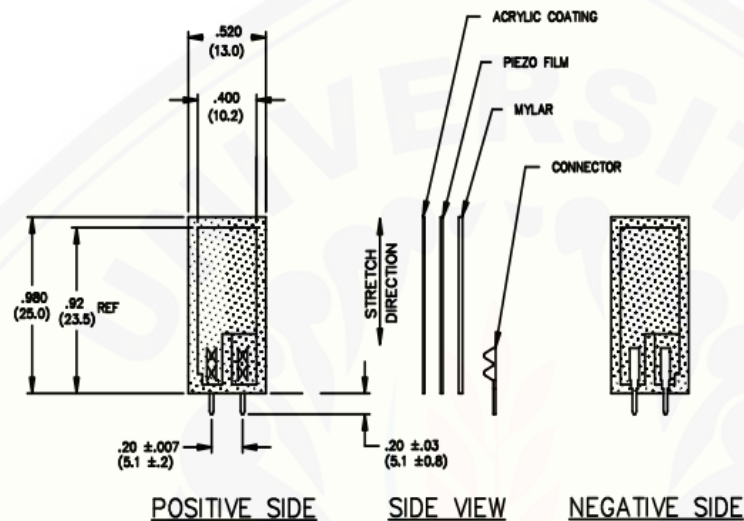
**Lampiran 3.2 Spesifikasi Pompa Air**

Pump	Model	30CX
	Type	Centrifugal Pump
	Net weight (kg)	30
	Discharge head-max (m)	27
	Suction head-max (m)	6
	Capacity-max (m <sup>3</sup> /h)	70
	Water inlet diameter (mm)	80
	Water outlet diameter (mm)	80
Engine	Engine model	GP200
	Bore × stroke (mm × mm)	68 × 54
	Displacement Volume (cc)	196
	Compression Ratio	8,5 : 1
	Rated power (HP/rpm)	6.5/3600
	Max torque (N.m/rpm)	13/2500
	Fuel Volume (L)	3.6
	Oil Volume (L)	0.6
	Min fuel consumption (g/kW.h)	395

### Lampiran 3.3 Spesifikasi Piezoelektrik



#### Dimintions:



#### Features:

- Solder Tab Connection
- Both No Mass & With Mass Versions
- Withstands High Impact
- Operating Temperature: 0°C to 85°C
- Storage Temperature: -40°C to 85 °C
- Higher Temperature Version up to 125 °C available on a Custom Basis

Sumber: Sensor Solutions /// LDT0-028K Piezo Vibration Rev 1, TE Connectivity

**Lampiran 4.1 Data Hasil Pengujian Getaran Bebas**

Model Konverter 1			Model Konverter 2		
Sampel ke-n	Waktu (ms)	Tegangan (mV)	Sampel ke-n	Waktu (ms)	Tegangan (mV)
746	3054	0.285	414	1695	0.252
747	3058	0.494	415	1699	0.494
748	3062	0.190	416	1703	0.440
749	3066	-0.398	417	1707	0.146
750	3070	-0.367	418	1711	-0.331
751	3074	-0.173	419	1715	-0.422
752	3078	0.130	420	1719	-0.322
753	3082	0.460	421	1723	-0.129
754	3086	0.332	422	1727	0.165
755	3090	-0.243	423	1731	0.383
756	3095	-0.319	424	1736	0.441
757	3099	-0.218	425	1740	0.233
758	3103	0.022	426	1744	-0.169
759	3107	0.311	427	1748	-0.393
760	3111	0.363	428	1752	-0.319
761	3115	-0.060	429	1756	-0.184
762	3119	-0.265	430	1760	0.057
763	3123	-0.229	431	1764	0.282
764	3127	-0.060	432	1768	0.409
765	3131	0.166	433	1772	0.290
766	3136	0.342	434	1777	-0.001
767	3140	0.099	435	1781	-0.333
768	3144	-0.191	436	1785	-0.308
769	3148	-0.210	437	1789	-0.217
770	3152	-0.114	438	1793	-0.039
771	3156	0.069	439	1797	0.194
772	3160	0.257	440	1801	0.349
773	3164	0.189	441	1805	0.313
774	3168	-0.089	442	1809	0.101
775	3172	-0.175	443	1813	-0.218
776	3176	-0.137	444	1817	-0.309
777	3181	-0.005	445	1822	-0.226
778	3185	0.169	446	1826	-0.092
779	3189	0.212	447	1830	0.111
780	3193	0.011	448	1834	0.272
781	3197	-0.137	449	1838	0.306
818	3348	0.034	450	1842	0.169



Model Konverter 3

Sampel ke-n	Waktu (ms)	Tegangan (mV)
373	1527	0.110
374	1531	0.195
375	1535	0.223
376	1539	0.199
377	1543	0.069
378	1547	-0.119
379	1551	-0.211
380	1555	-0.201
381	1560	-0.128
382	1564	-0.020
383	1568	0.100
384	1572	0.180
385	1576	0.218
386	1580	0.161
387	1584	0.041
388	1588	-0.097
389	1592	-0.171
390	1596	-0.167
391	1601	-0.105
392	1605	-0.015
393	1609	0.083
394	1613	0.154
395	1617	0.181
396	1621	0.133
397	1625	0.032
398	1629	-0.075
399	1633	-0.139
400	1637	-0.137
401	1641	-0.085
402	1646	-0.009
403	1650	0.071
404	1654	0.130
405	1658	0.152
406	1662	0.114
407	1666	0.028
408	1670	-0.060
409	1674	-0.112

Model Konverter 4

Sampel ke-n	Waktu (ms)	Tegangan (mV)
77	315	0.220
78	319	0.407
79	323	0.358
80	327	0.036
81	332	-0.285
82	336	-0.319
83	340	-0.240
84	344	-0.052
85	348	0.191
86	352	0.372
87	356	0.338
88	360	0.051
89	364	-0.252
90	368	-0.308
91	372	-0.230
92	377	-0.062
93	381	0.171
94	385	0.339
95	389	0.314
96	393	0.061
97	397	-0.220
98	401	-0.293
99	405	-0.222
100	409	-0.053
101	413	0.140
102	418	0.304
103	422	0.288
104	426	0.071
105	430	-0.171
106	434	-0.271
107	438	-0.206
108	442	-0.061
109	446	0.126
110	450	0.267
111	454	0.265
112	458	0.077
113	463	-0.147

Model Konverter 5

Sampel ke-n	Waktu (ms)	Tegangan (mV)
540	2210	0.204
541	2215	0.449
542	2219	0.493
543	2223	0.342
544	2227	0.029
545	2231	-0.296
546	2235	-0.430
547	2239	-0.357
548	2243	-0.221
549	2247	0
550	2251	0.274
551	2255	0.443
552	2260	0.426
553	2264	0.241
554	2268	-0.073
555	2272	-0.349
556	2276	-0.395
557	2280	-0.293
558	2284	-0.143
559	2288	0.100
560	2292	0.330
561	2296	0.407
562	2300	0.327
563	2305	0.111
564	2309	-0.181
565	2313	-0.342
566	2317	-0.326
567	2321	-0.217
568	2325	-0.051
569	2329	0.186
570	2333	0.353
571	2337	0.358
572	2341	0.226
573	2345	-0.007
574	2350	-0.236
575	2354	-0.313
576	2358	-0.263

Model Konverter 6

Sampel ke-n	Waktu (ms)	Tegangan (mV)
318	1302	0.161
319	1306	0.250
320	1310	0.300
321	1314	0.337
322	1318	0.266
323	1322	0.108
324	1326	-0.160
325	1330	-0.365
326	1334	-0.354
327	1339	-0.253
328	1343	-0.137
329	1347	0.015
330	1351	0.172
331	1355	0.256
332	1359	0.290
333	1363	0.295
334	1367	0.216
335	1371	0.059
336	1375	-0.182
337	1379	-0.324
338	1384	-0.313
339	1388	-0.220
340	1392	-0.107
341	1396	0.031
342	1400	0.164
343	1404	0.245
344	1408	0.275
345	1412	0.269
346	1416	0.178
347	1420	0.014
348	1424	-0.187
349	1429	-0.292
350	1433	-0.272
351	1437	-0.186
352	1441	-0.079
353	1445	0.044
354	1449	0.157

Model Konverter 7

Sampel ke-n	Waktu (ms)	Tegangan (mV)
326	1334	0.051
327	1339	0.159
328	1343	0.230
329	1347	0.258
330	1351	0.201
331	1355	0.074
332	1359	-0.086
333	1363	-0.207
334	1367	-0.234
335	1371	-0.184
336	1375	-0.090
337	1379	0.031
338	1384	0.139
339	1388	0.210
340	1392	0.238
341	1396	0.187
342	1400	0.075
343	1404	-0.066
344	1408	-0.178
345	1412	-0.206
346	1416	-0.168
347	1420	-0.087
348	1424	0.022
349	1429	0.126
350	1433	0.192
351	1437	0.219
352	1441	0.175
353	1445	0.073
354	1449	-0.056
355	1453	-0.165
356	1457	-0.197
357	1461	-0.158
358	1465	-0.084
359	1470	0.014
360	1474	0.110
361	1478	0.178
362	1482	0.207

Model Konverter 8

Sampel ke-n	Waktu (ms)	Tegangan (mV)
292	1195	0.098
293	1199	0.223
294	1203	0.314
295	1208	0.345
296	1212	0.277
297	1216	0.132
298	1220	-0.051
299	1224	-0.206
300	1228	-0.297
301	1232	-0.290
302	1236	-0.217
303	1240	-0.118
304	1244	-0.003
305	1248	0.117
306	1253	0.227
307	1257	0.310
308	1261	0.314
309	1265	0.232
310	1269	0.090
311	1273	-0.081
312	1277	-0.218
313	1281	-0.291
314	1285	-0.264
315	1289	-0.185
316	1293	-0.089
317	1298	0.020
318	1302	0.132
319	1306	0.226
320	1310	0.296
321	1314	0.284
322	1318	0.191
323	1322	0.048
324	1326	-0.103
325	1330	-0.216
326	1334	-0.268
327	1339	-0.234
328	1343	-0.159

## Model Konverter 9

<b>Sampel ke-n</b>	<b>Waktu (ms)</b>	<b>Tegangan (mV)</b>
250	1023	0.030
251	1027	0.108
252	1032	0.175
253	1036	0.219
254	1040	0.240
255	1044	0.220
256	1048	0.162
257	1052	0.079
258	1056	-0.010
259	1060	-0.110
260	1064	-0.184
261	1068	-0.203
262	1072	-0.190
263	1077	-0.157
264	1081	-0.107
265	1085	-0.046
266	1089	0.022
267	1093	0.091
268	1097	0.156
269	1101	0.201
270	1105	0.221
271	1109	0.205
272	1113	0.161
273	1117	0.084
274	1122	-0.002
275	1126	-0.086
276	1130	-0.161
277	1134	-0.194
278	1138	-0.185
279	1142	-0.153
280	1146	-0.105
281	1150	-0.048
282	1154	0.017
283	1158	0.080
250	1023	0.030
251	1027	0.108
252	1032	0.175



## Lampiran 4.2 Data Getaran Model Konverter Akibat Aliran Air

Model Konverter 1

Sampel ke-n	Waktu (ms)	Tegangan (mV)
2	8	0
3	12	-0.010
4	16	-0.016
5	20	-0.021
6	25	-0.004
7	29	0.008
8	33	0.021
9	37	0.028
10	41	0.030
11	45	0.037
12	49	0.024
13	53	0.017
14	57	0.015
15	61	0
16	65	-0.002
17	70	-0.017
18	74	-0.021
19	78	-0.011
20	82	0.006
21	86	0.014
22	90	0.026
23	94	0.034
24	98	0.038
25	102	0.032
26	106	0.026
27	111	0.013
28	115	0.009
29	119	-0.005
30	123	-0.025
31	127	-0.016
32	131	-0.015
33	135	-0.003
34	139	0.014
35	143	0.031
36	147	0.040
37	151	0.040
38	156	0.033

Model Konverter 2

Sampel ke-n	Waktu (ms)	Tegangan (mV)
2	8	-0.001
3	12	-0.007
4	16	-0.003
5	20	0
6	25	0.009
7	29	0.012
8	33	0.014
9	37	0.033
10	41	0.034
11	45	0.034
12	49	0.02
13	53	0.02
14	57	0.01
15	61	0.006
16	65	-0.004
17	70	-0.001
18	74	-0.002
19	78	-0.001
20	82	0
21	86	0.01
22	90	0.014
23	94	0.015
24	98	0.033
25	102	0.024
26	106	0.033
27	111	0.021
28	115	0.014
29	119	0.006
30	123	0.008
31	127	-0.003
32	131	-0.003
33	135	0
34	139	-0.002
35	143	0.007
36	147	0.01
37	151	0.014
38	156	0.019

Model Konverter 3

Sampel ke-n	Waktu (ms)	Tegangan (mV)
2	8	-0.013
3	12	-0.023
4	16	0.014
5	20	-0.028
6	25	-0.029
7	29	-0.01
8	33	-0.018
9	37	0
10	41	0.023
11	45	0.028
12	49	0.021
13	53	0.025
14	57	0.01
15	61	0.03
16	65	0.025
17	70	0.014
18	74	-0.001
19	78	-0.01
20	82	-0.02
21	86	0.017
22	90	-0.028
23	94	-0.027
24	98	-0.025
25	102	-0.009
26	106	0.009
27	111	0.03
28	115	0.03
29	119	0.025
30	123	0.022
31	127	0.025
32	131	0.027
33	135	0.021
34	139	0.009
35	143	-0.005
36	147	-0.017
37	151	-0.023
38	156	-0.029

Model Konverter 4

Sampel ke-n	Waktu (ms)	Tegangan (mV)
2	8	0.007
3	12	0.01
4	16	0.013
5	20	0.014
6	25	0.019
7	29	0.017
8	33	0.013
9	37	0.02
10	41	0.016
11	45	0.018
12	49	0.015
13	53	0.013
14	57	0.008
15	61	0.006
16	65	0.006
17	70	0
18	74	0
19	78	0
20	82	0.006
21	86	0.006
22	90	0.012
23	94	0.008
24	98	0.009
25	102	0.012
26	106	0.012
27	111	0.015
28	115	0.019
29	119	0.021
30	123	0.023
31	127	0.02
32	131	0.012
33	135	0.013
34	139	0.009
35	143	0.006
36	147	0
37	151	0
38	156	0.007

Model Konverter 5

Sampel ke-n	Waktu (ms)	Tegangan (mV)
2	8	0.008
3	12	0.007
4	16	0.01
5	20	0.012
6	25	0.011
7	29	0.009
8	33	0.011
9	37	0
10	41	0.006
11	45	0.01
12	49	0.01
13	53	0.014
14	57	0.014
15	61	0.017
16	65	0.014
17	70	0.015
18	74	0.014
19	78	0.015
20	82	0.008
21	86	0.013
22	90	0.006
23	94	0.006
24	98	0
25	102	0.01
26	106	0.007
27	111	0.011
28	115	0.011
29	119	0.014
30	123	0.009
31	127	0.017
32	131	0.014
33	135	0.014
34	139	0.016
35	143	0.014
36	147	0.012
37	151	0.008
38	156	0.006

Model Konverter 6

Sampel ke-n	Waktu (ms)	Tegangan (mV)
2	8	0.006
3	12	-0.002
4	16	0
5	20	0.006
6	25	0.014
7	29	0.021
8	33	0.019
9	37	0.013
10	41	0.017
11	45	0.017
12	49	0.014
13	53	0.017
14	57	0.019
15	61	0.013
16	65	0.009
17	70	0
18	74	-0.001
19	78	0
20	82	0.006
21	86	-0.001
22	90	0
23	94	0
24	98	0
25	102	0.011
26	106	0.014
27	111	0.013
28	115	0.021
29	119	0.015
30	123	0.02
31	127	0.014
32	131	0.014
33	135	0.019
34	139	0.011
35	143	0.007
36	147	-0.001
37	151	0
38	156	-0.002



Model Konverter 7

Sampel ke-n	Waktu (ms)	Tegangan (mV)
2	8	0.009
3	12	0.01
4	16	0.011
5	20	0.01
6	25	0.01
7	29	0.009
8	33	0.01
9	37	0.011
10	41	0.011
11	45	0.01
12	49	0.005
13	53	0.011
14	57	0.0052
15	61	0.012
16	65	0.01
17	70	0.01
18	74	0.008
19	78	0.01
20	82	0.011
21	86	0.01
22	90	0.01
23	94	0.01
24	98	0.009
25	102	0.012
26	106	0.01
27	111	0.012
28	115	0.011
29	119	0.009
30	123	0.011
31	127	0.011
32	131	0.011
33	135	0.01
34	139	0.011
35	143	0.011
36	147	0.011
37	151	0.011
38	156	0.01

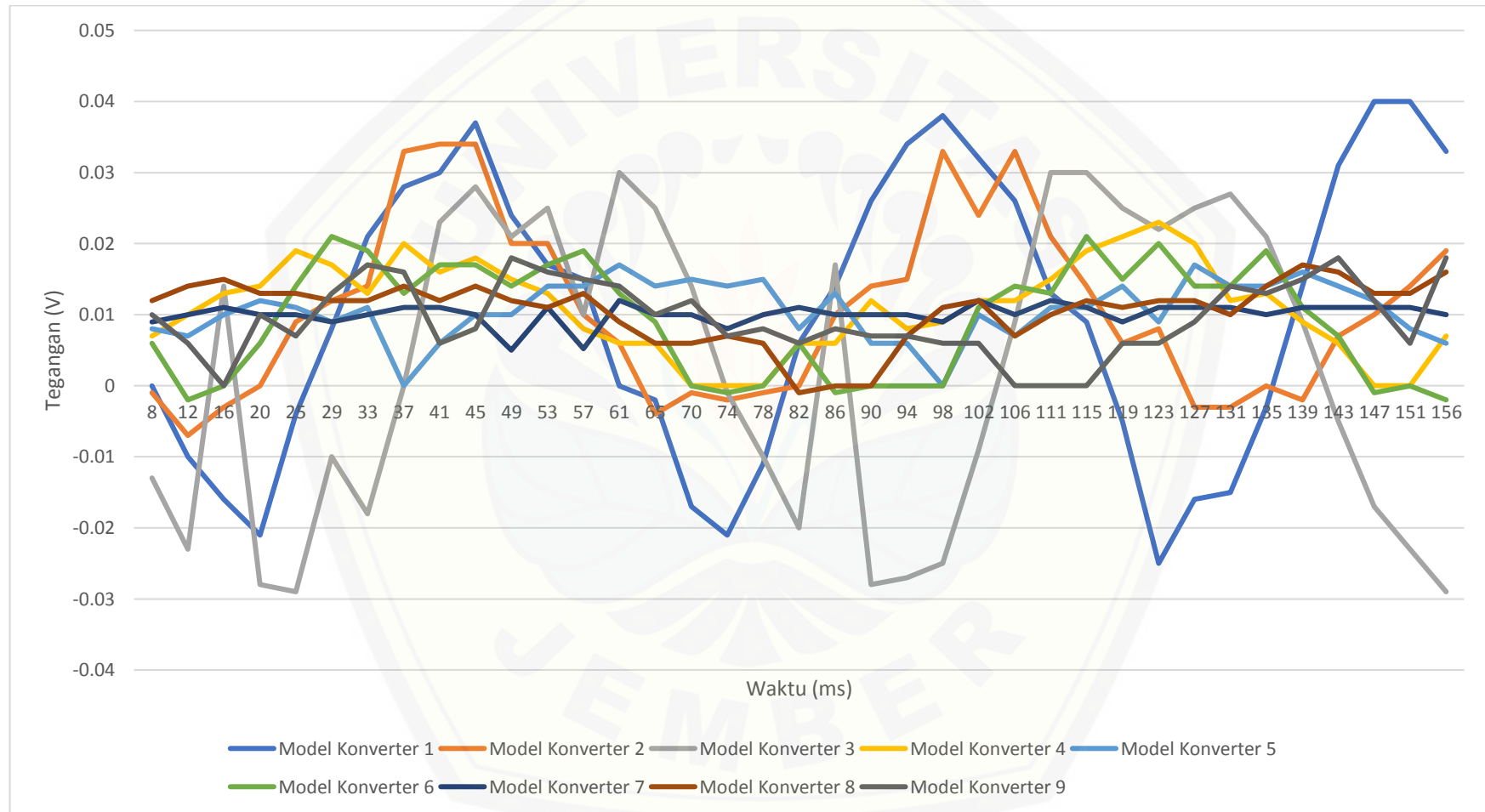
Model Konverter 8

Sampel ke-n	Waktu (ms)	Tegangan (mV)
2	8	0.012
3	12	0.014
4	16	0.015
5	20	0.013
6	25	0.013
7	29	0.012
8	33	0.012
9	37	0.014
10	41	0.012
11	45	0.014
12	49	0.012
13	53	0.011
14	57	0.013
15	61	0.009
16	65	0.006
17	70	0.006
18	74	0.007
19	78	0.006
20	82	-0.001
21	86	0
22	90	0
23	94	0.007
24	98	0.011
25	102	0.012
26	106	0.007
27	111	0.01
28	115	0.012
29	119	0.011
30	123	0.012
31	127	0.012
32	131	0.01
33	135	0.014
34	139	0.017
35	143	0.016
36	147	0.013
37	151	0.013
38	156	0.016

## Model Konverter 9

Sampel ke-n	Waktu (ms)	Tegangan (mV)
2	8	0.01
3	12	0.006
4	16	0
5	20	0.01
6	25	0.007
7	29	0.013
8	33	0.017
9	37	0.016
10	41	0.006
11	45	0.008
12	49	0.018
13	53	0.016
14	57	0.015
15	61	0.014
16	65	0.01
17	70	0.012
18	74	0.007
19	78	0.008
20	82	0.006
21	86	0.008
22	90	0.007
23	94	0.007
24	98	0.006
25	102	0.006
26	106	0
27	111	0
28	115	0
29	119	0.006
30	123	0.006
31	127	0.009
32	131	0.014
33	135	0.013
34	139	0.015
35	143	0.018
36	147	0.012
37	151	0.006
38	156	0.018

Grafik Getaran Model Konverter Akibat Aliran Air



**Lampiran 4.3 Data Hasil Perhitungan FFT untuk Getaran Akibat *Vortex Shedding***

Model Konverter 1

Fast Fourier Transform				
Step	Waktu	complex	magnitude	frekuensi
68	0.274222	0.408230158670851+1.18658319768098E-02i	0.000796	16.01755
69	0.278315	0.155045499724596+0.442612334845037i	0.000914	16.25662
70	0.282408	-0.592409863842329-0.116611847277968i	0.001177	16.49569
71	0.2865	-0.208385683829523+0.399687738702648i	0.000879	16.73476
72	0.290593	0.797073744906218-1.15754341742788i	0.00274	16.97382
73	0.294686	5.7704535897154E-02-0.130770146723096i	0.000279	17.21289
74	0.298779	-0.653573593951852+3.28468237380524E-02i	0.001276	17.45196
75	0.302872	-0.646799164165423+0.880696307037009i	0.00213	17.69103
76	0.306965	0.112124710868002+3.09928057090683i	0.006045	17.9301
77	0.311058	2.804532875195+0.497834846898473i	0.005552	18.16916
78	0.315151	-3.16548100482037+10.7907107926211i	0.021921	18.40823
79	0.319243	0.976181453371062+0.412951915045644i	0.002066	18.6473
80	0.323336	1.82201829655005-2.11821190757804i	0.005446	18.88637
81	0.327429	-0.932512730331355-0.932680893267329i	0.002571	19.12544
82	0.331522	-0.188565753893821+0.638611506567689i	0.001298	19.3645
83	0.335615	0.19657771380352-8.11944144168885E-02i	0.000415	19.60357
84	0.339708	0.455831635655508+0.586165437991663i	0.001447	19.84264
85	0.343801	-0.232930994911125-0.246430588411979i	0.000661	20.08171
86	0.347893	4.51655684127332E-02-0.297432024487956i	0.000586	20.32078
87	0.351986	-0.129577812070052-0.557217067372936i	0.001115	20.55984
88	0.356079	-5.92404512946074E-02+0.261337131863625i	0.000522	20.79891
89	0.360172	0.282187081898415-0.293026235063678i	0.000793	21.03798
90	0.364265	-0.433440326830745-0.526625702774014i	0.00133	21.27705
91	0.368358	-0.154093271470991-0.140920598551645i	0.000407	21.51612
92	0.372451	-0.102316016519078-0.24508245633843i	0.000518	21.75518
93	0.376543	6.07249235642593E-02-7.65485167744589E-02i	0.00019	21.99425
94	0.380636	3.85536800324716E-02-0.386572833934348i	0.000757	22.23332
95	0.384729	-0.263595681581946+0.108449550981312i	0.000556	22.47239
96	0.388822	-1.54541866369975E-02-0.291753528459819i	0.00057	22.71146
97	0.392915	4.3010382010451E-02-2.74500143349809E-03i	8.4E-05	22.95052
98	0.397008	0.287768884087392-0.334071934538799i	0.00086	23.18959
99	0.401101	-4.03865538229182E-02-0.1856132051254i	0.00037	23.42866
100	0.405194	0.36482682556464-3.05458786555464E-02i	0.000714	23.66773
101	0.409286	-0.459745868183434+8.69532030696761E-02i	0.000912	23.9068
102	0.413379	0.187781161852575+0.209797189724588i	0.000549	24.14586

## Model Konverter 2

Fast Fourier Transform				
Step	Waktu	complex	magnitude	frekuensi
60	0.241479	-0.487429410360103+0.294525771278816i	0.00111014	14.10501
61	0.245572	-0.518610001483982+0.334773979696987i	0.00120327	14.34408
62	0.249665	0.131787105017578-0.30470166824474i	0.00064714	14.58315
63	0.253758	0.289521232080191-0.378411461168505i	0.00092878	14.82221
64	0.25785	-1.40029803722777-9.93168795035154E-02i	0.00273648	15.06128
65	0.261943	0.426524769052038+1.74485532267599E-02i	0.00083213	15.30035
66	0.266036	-1.35613927387439-2.08178522960844i	0.00484316	15.53942
67	0.270129	-1.76809464325956+0.918928144761935i	0.00388428	15.77848
68	0.274222	-4.70612359310549+2.56000746090267i	0.01044318	16.01755
69	0.278315	2.01360426831026-2.17306994607722i	0.00577499	16.25662
70	0.282408	0.405835974954857-0.451788217448556i	0.00118382	16.49569
71	0.2865	1.47663553968857+0.20490227243959i	0.00290601	16.73476
72	0.290593	0.364939703817649-0.375813102319439i	0.00102115	16.97382
73	0.294686	0.341108441973039+1.091178560347i	0.00222856	17.21289
74	0.298779	0.483884668307948-0.217782769925425i	0.00103438	17.45196
75	0.302872	0.171470497634961+0.170214688962215i	0.00047097	17.69103
76	0.306965	0.537124769236123+3.31020731813565E-02i	0.00104901	17.9301
77	0.311058	0.176969693765255-3.05113862412539E-03i	0.00034502	18.16916
78	0.315151	0.198452893571834+0.137645236870227i	0.00047079	18.40823
79	0.319243	9.42934196401004E-02-0.205261911532468i	0.00044032	18.6473
80	0.323336	1.10753089525888E-02+6.86422281317587E-02i	0.00013554	18.88637
81	0.327429	0.153126942423144+1.14544849260214E-02i	0.00029933	19.12544
82	0.331522	8.65204818611607E-02+4.70087012565241E-02i	0.00019194	19.3645
83	0.335615	0.202116518135918+6.2059961055594E-02i	0.00041214	19.60357
84	0.339708	0.125244706979111+3.61201658228263E-02i	0.00025409	19.84264
85	0.343801	-4.62891427983567E-02+3.08927419582447E-02i	0.00010848	20.08171
86	0.347893	0.122226174658626-7.87403069919905E-02i	0.00028342	20.32078
87	0.351986	0.103048515880131-2.88887496447739E-02i	0.00020862	20.55984
88	0.356079	0.333871129870016-8.34029585393992E-02i	0.00067082	20.79891
89	0.360172	0.13797932085554-6.44959682963856E-02i	0.0002969	21.03798
90	0.364265	7.69904082690507E-02-3.94943574111214E-02i	0.00016867	21.27705
91	0.368358	2.59157522384052E-04-4.28273390721627E-02i	8.3486E-05	21.51612
92	0.372451	0.135405232376672+1.36846970926329E-02i	0.00026529	21.75518
93	0.376543	9.84260854436138E-02-7.22313147361885E-02i	0.00023798	21.99425
94	0.380636	7.32428237754621E-02+5.87975611322667E-02i	0.00018309	22.23332

## Model Konverter 3

Fast Fourier Transform				
Step	Waktu	complex	magnitude	frekuensi
49	0.196457	0.248604779239543-7.50262612255272E-02i	0.000506	11.47526
50	0.20055	-0.265549905563223-0.510890298289056i	0.001122	11.71433
51	0.204643	-0.368194127165779-0.414372358098742i	0.001081	11.9534
52	0.208736	-0.654475825894015+0.826473179326088i	0.002055	12.19247
53	0.212829	6.58725392602859E-02+0.328618445618847i	0.000653	12.43153
54	0.216922	0.489209004739705-0.124158314708523i	0.000984	12.6706
55	0.221015	-0.956748989450635-0.645566744139278i	0.00225	12.90967
56	0.225108	0.228311817994176-1.06739519816489i	0.002128	13.14874
57	0.2292	-9.35108830177418E-02-0.659769056064341i	0.001299	13.38781
58	0.233293	0.413727512092953-1.48382734306257i	0.003003	13.62687
59	0.237386	1.84323921809023+0.812315861408716i	0.003927	13.86594
60	0.241479	-1.5879946782288-4.48139776872484i	0.009268	14.10501
61	0.245572	4.27515915602483+16.0970119526208i	0.032466	14.34408
62	0.249665	1.14264769750216+4.20540528987i	0.008495	14.58315
63	0.253758	0.31931406904049-0.901023859953164i	0.001863	14.82221
64	0.25785	1.30945963749568+0.357334740104824i	0.002646	15.06128
65	0.261943	0.359063228469965+0.852502876765811i	0.001803	15.30035
66	0.266036	0.35070860349068+0.820784615752108i	0.00174	15.53942
67	0.270129	0.211304925718609+0.199569240962276i	0.000567	15.77848
68	0.274222	0.220240690862349+0.212468115755925i	0.000597	16.01755
69	0.278315	0.39097661731852+0.30655139798218i	0.000968	16.25662
70	0.282408	0.288338454677651-8.09110199539316E-02i	0.000584	16.49569
71	0.2865	-0.206976179359655+0.305354925669869i	0.000719	16.73476
72	0.290593	0.219341988635445-5.06408811145475E-02i	0.000439	16.97382
73	0.294686	-3.83229563019734E-02+7.35678514259075E-02i	0.000162	17.21289
74	0.298779	1.38882797753369E-02+5.97097147491183E-02i	0.00012	17.45196
75	0.302872	0.245401621601997-6.07549986948963E-02i	0.000493	17.69103
76	0.306965	7.96042816823586E-02-0.202096574236434i	0.000423	17.9301
77	0.311058	-5.53403062877806E-02-0.211044125947757i	0.000425	18.16916
78	0.315151	-3.58478815912346E-02-0.249470962126723i	0.000491	18.40823
79	0.319243	-4.41240108436791E-02+4.90715348429774E-02i	0.000129	18.6473
80	0.323336	7.05042249197267E-02+3.71021749183285E-03i	0.000138	18.88637
81	0.327429	0.212026817572011-4.96949118883322E-02i	0.000425	19.12544
82	0.331522	2.46607702123961E-03+0.243304042129231i	0.000474	19.3645
83	0.335615	-0.128581482069422-0.114271167149983i	0.000335	19.60357

## Model Konverter 4

Fast Fourier Transform				
Step	Waktu	complex	magnitude	frekuensi
51	0.204643	-0.118105015244253-2.44599815000872E-02i	0.00023511	11.9534
52	0.208736	-3.78891828541479E-02+0.597351402225052i	0.001166768	12.19247
53	0.212829	-0.146178608984794-0.144541888673072i	0.000400728	12.43153
54	0.216922	-0.226069682981331+0.587960385317531i	0.001227923	12.6706
55	0.221015	-1.75361824866238E-02+0.5070827849103i	0.000989056	12.90967
56	0.225108	-9.47065599075018E-02+0.387462847648196i	0.000777523	13.14874
57	0.2292	-0.321683957996714-0.744041156198447i	0.001580124	13.38781
58	0.233293	-0.546363091344662-0.383655705208789i	0.001301386	13.62687
59	0.237386	-0.749796421920827-0.776617819098179i	0.002104297	13.86594
60	0.241479	-0.800495178437201-0.29799366646894i	0.001665033	14.10501
61	0.245572	-0.339946714299976+9.86656153578585E-02i	0.000690011	14.34408
62	0.249665	-0.299809235082502+0.140090428976949i	0.000645077	14.58315
63	0.253758	-0.385866525445057+0.623825566974521i	0.001429863	14.82221
64	0.25785	0.235630937326713-3.38420460883207E-03i	0.000459367	15.06128
65	0.261943	-0.668037732691943+0.281271333647145i	0.001412937	15.30035
66	0.266036	1.0356181260296+0.867864916578919i	0.002633884	15.53942
67	0.270129	4.27767751838122E-02+0.405887348611348i	0.000795585	15.77848
68	0.274222	-9.76776516304662E-02-0.768575405621518i	0.001510248	16.01755
69	0.278315	-0.161310033562424+9.72389580114318E-02i	0.000367157	16.25662
70	0.282408	0.550316750499238+9.86473674578144E-02i	0.001089841	16.49569
71	0.2865	0.211635553241578-0.673934711616311i	0.001376966	16.73476
72	0.290593	-0.179036835424938+0.279334149152891i	0.000646756	16.97382
73	0.294686	0.12128642430815+0.597098278191862i	0.001187704	17.21289
74	0.298779	7.44355479092527E-02-0.593567302467013i	0.001166114	17.45196
75	0.302872	0.332654438767689-0.195001863220206i	0.00075165	17.69103
76	0.306965	-0.351070737680113+6.4494457842115E-02i	0.0006958	17.9301
77	0.311058	-0.157526038947186-0.407168013800654i	0.000851029	18.16916
78	0.315151	-0.207519944359105+2.56798466667453E-02i	0.000407608	18.40823
79	0.319243	0.114480518550538-0.341506745837411i	0.000702113	18.6473
80	0.323336	-0.742643517399563+1.14749681435709E-02i	0.001447821	18.88637
81	0.327429	-0.138104395470355+0.544382284107919i	0.001094789	19.12544
82	0.331522	-6.83878264758758E-02+0.230880192139799i	0.000469387	19.3645
83	0.335615	-1.74864580841228E-02-1.41332321543445E-02i	4.38282E-05	19.60357
84	0.339708	-0.245038945171822+0.490565374076951i	0.001068927	19.84264
85	0.343801	0.573706665187705+0.369206010624318i	0.001329904	20.08171

## Model Konverter 5

Fast Fourier Transform				
Step	Waktu	complex	magnitude	frekuensi
45	0.180086	0.188837801470263+0.206083646055238i	0.000544869	10.51899
46	0.184179	3.478760883192E-03-9.78113093225428E-02i	0.000190786	10.75806
47	0.188272	0.277286803843202+0.361373429204703i	0.000887911	10.99713
48	0.192365	0.357867759667248-2.74020545624503E-02i	0.00069964	11.23619
49	0.196457	4.83696733480703E-02-0.196778005248754i	0.000395001	11.47526
50	0.20055	-8.784458664359E-02+1.93973758500583E-03i	0.000171279	11.71433
51	0.204643	0.225308953144293-0.336402350284363i	0.000789247	11.9534
52	0.208736	-0.177401984264918-8.02270856148056E-04i	0.000345816	12.19247
53	0.212829	-0.316137394540519-4.88098151703198E-02i	0.000623554	12.43153
54	0.216922	0.471056815212223+2.00231996866455E-02i	0.000919069	12.6706
55	0.221015	-0.760659622058402-0.12795829857754i	0.001503601	12.90967
56	0.225108	-0.62094613848767-0.125771310395566i	0.001235001	13.14874
57	0.2292	-1.30418353449121-7.23397616065552E-02i	0.002546176	13.38781
58	0.233293	-0.50825256174937+0.322953233620243i	0.001173838	13.62687
59	0.237386	-0.425226620929748-0.596377777318013i	0.001427779	13.86594
60	0.241479	-0.615818683664389+0.196299228123322i	0.001259938	14.10501
61	0.245572	0.375367733115286-2.94715398934571E-02i	0.000733963	14.34408
62	0.249665	-4.89677861179677E-02-0.45432950957969i	0.000890762	14.58315
63	0.253758	-0.593213435526005+0.393977029112517i	0.001388155	14.82221
64	0.25785	1.78218078561158E-02-5.11510659532608E-02i	0.000105588	15.06128
65	0.261943	-0.153701940561206+0.180606880885728i	0.000462293	15.30035
66	0.266036	0.615050930664014+9.87855387104532E-02i	0.001214295	15.53942
67	0.270129	-0.703599247371106+0.435075580377926i	0.001612573	15.77848
68	0.274222	-0.194410348289561-0.111397282940864i	0.000436772	16.01755
69	0.278315	0.217183304826402+8.96924756967855E-04i	0.000423363	16.25662
70	0.282408	0.17303936603966-0.239324080356303i	0.000575688	16.49569
71	0.2865	8.04919789240166E-02-0.175936231869289i	0.000377144	16.73476
72	0.290593	0.119943161292127+0.174893210383085i	0.000413393	16.97382
73	0.294686	-0.152044967404946+0.184007316692118i	0.000465297	17.21289
74	0.298779	-0.403495314273747-0.280984383458665i	0.000958463	17.45196
75	0.302872	0.232889797880767+0.223073414381148i	0.000628634	17.69103
76	0.306965	-0.123808566419782+0.189112819990556i	0.000440616	17.9301
77	0.311058	-0.22962619681216-4.83801980284705E-02i	0.000457442	18.16916
78	0.315151	0.174162057564818-2.87737799416333E-02i	0.000344099	18.40823
79	0.319243	-7.42555178704303E-02-0.144703556581476i	0.000317044	18.6473



## Model Konverter 6

Fast Fourier Transform				
Step	Waktu	complex	magnitude	frekuensi
41	0.163715	-0.106364584347376-0.249447729856639i	0.000528612	9.562718
42	0.167807	-1.65607239087559E-03+4.71388475101743E-02i	9.19453E-05	9.801786
43	0.1719	0.194412082421228-1.5333920244618E-02i	0.000380148	10.04085
44	0.175993	0.40642218937353-3.31630077680532E-02i	0.000794879	10.27992
45	0.180086	-0.110974257269868-0.324072402986458i	0.000667732	10.51899
46	0.184179	-0.42356842614887-0.246700541431098i	0.000955507	10.75806
47	0.188272	-7.4941594003425E-02+0.113634819265799i	0.000265344	10.99713
48	0.192365	0.103860662258607-3.71712832850288E-02i	0.000215033	11.23619
49	0.196457	-1.97211963139008E-02-0.144091680645475i	0.000283499	11.47526
50	0.20055	-0.896119005084407-0.415677399376049i	0.001925603	11.71433
51	0.204643	-0.820838202870704-0.207302886495061i	0.001650313	11.9534
52	0.208736	-0.496101575045911-0.137313806950292i	0.001003419	12.19247
53	0.212829	0.281279401336877-0.145104158484011i	0.000616962	12.43153
54	0.216922	-0.914922265186842+0.545430367231904i	0.002076346	12.6706
55	0.221015	-1.71627597750905+0.657774261214186i	0.00358286	12.90967
56	0.225108	-0.44546959631195+1.24725151447469i	0.002581709	13.14874
57	0.2292	-0.168954943050926+0.44942614219084i	0.000935936	13.38781
58	0.233293	0.617296128791607-0.163999564639823i	0.001245049	13.62687
59	0.237386	0.355706789925668+0.621451253289923i	0.001395811	13.86594
60	0.241479	-0.606353141504054-0.120382635907003i	0.001205044	14.10501
61	0.245572	0.406409482917926-0.159468579863046i	0.000851026	14.34408
62	0.249665	-0.43161727153294-5.72212450807894E-02i	0.000848721	14.58315
63	0.253758	0.105933420713064+0.750399934188816i	0.001477272	14.82221
64	0.25785	-0.597596291496233+0.376532766612431i	0.001376856	15.06128
65	0.261943	-0.357826783348719-0.319925216756852i	0.000935657	15.30035
66	0.266036	-0.152405487140755+0.109606607499687i	0.000365938	15.53942
67	0.270129	9.72898505956936E-02+5.30147764116819E-02i	0.000215978	15.77848
68	0.274222	-6.79776109473511E-02-7.81492490732798E-02i	0.000201905	16.01755
69	0.278315	-5.24125375956955E-02+0.179125578187661i	0.000363813	16.25662
70	0.282408	-0.11499595401351-0.15764755633104i	0.000380376	16.49569
71	0.2865	-0.126110976188412+0.135489742323282i	0.000360816	16.73476
72	0.290593	-1.69949959115553E-02-9.92898712387963E-02i	0.000196362	16.97382
73	0.294686	1.5853095914677E-02-0.134952844531453i	0.000264875	17.21289
74	0.298779	-6.21231829853594E-02-0.194538268271551i	0.000398083	17.45196
75	0.302872	0.168406222078595+5.77124152064294E-02i	0.000347019	17.69103

Model Konverter 7

Fast Fourier Transform				
Step	Waktu	complex	magnitude	frekuensi
21	0.081857	-0.250900042630465+7.26914583187004E-02i	0.0005092	4.781359
22	0.08595	6.7083727332706E-02+2.7580537282682E-02i	0.00014139	5.020427
23	0.090043	-4.08077231248196E-02-4.68022524239193E-02i	0.00012104	5.259495
24	0.094136	-0.119772277261202+0.104434099793493i	0.00030976	5.498563
25	0.098229	-0.375069418559858+0.358155501488391i	0.00101093	5.737631
26	0.102322	-0.371347082496839-0.598784886042715i	0.00137346	5.976699
27	0.106414	3.23611593369072E-05-4.9826904802731E-04i	9.7333E-07	6.215767
28	0.110507	0.195445200560295-0.823925254180584i	0.00165066	6.454835
29	0.1146	0.500590751052779+1.03295830455531i	0.00223755	6.693903
30	0.118693	-0.393203732537746+0.533343500358086i	0.00129166	6.932971
31	0.122786	-1.3491448894306+0.963157114397879i	0.00323132	7.172039
32	0.126879	-2.45548405892765-1.84347588745798i	0.00598533	7.411107
33	0.130972	1.98243879710384-1.77668880251751i	0.00518925	7.650174
34	0.135065	-0.875455680337587+0.676705123672738i	0.00215693	7.889242
35	0.139157	0.606766499300646-1.32053043607184i	0.00283287	8.12831
36	0.14325	-4.56735312669547E-02-0.17430988227237i	0.00035126	8.367378
37	0.147343	1.23898309922587-0.405248460857747i	0.00254108	8.606446
38	0.151436	-0.752154293290953-0.255745396161797i	0.00154862	8.845514
39	0.155529	1.21584212122077+0.884234863566744i	0.00293056	9.084582
40	0.159622	5.05310321140195E-02-1.26669791988212i	0.00247116	9.32365
41	0.163715	-0.679867134562872+0.741893055206749i	0.00196158	9.562718
42	0.167807	1.02239759969841+0.227880222368596i	0.00204188	9.801786
43	0.1719	-9.28406524247743E-02-1.05197877724905i	0.00205861	10.04085
44	0.175993	-0.50277919633763+0.546864548397443i	0.00144808	10.27992
45	0.180086	1.08881490995143+0.263447615756183i	0.00218369	10.51899
46	0.184179	-0.274366581149537-0.587288369857744i	0.00126358	10.75806
47	0.188272	-0.485062937149745+0.194688784545791i	0.00101886	10.99713
48	0.192365	0.777628415062841+0.14202344633624i	0.00154092	11.23619
49	0.196457	3.83285878268634E-03-0.272046313306745i	0.00053036	11.47526
50	0.20055	-0.189176919425909+0.271102480994801i	0.00064441	11.71433
51	0.204643	0.122666692339388+0.238252085068523i	0.00052237	11.9534
52	0.208736	-6.42520240542911E-02-0.487056898651318i	0.00095765	12.19247
53	0.212829	2.13955682059912E-02+0.2773145807377i	0.00054218	12.43153
54	0.216922	0.147372891862483-0.134559175129899i	0.00038901	12.6706
55	0.221015	5.23942258853172E-02-7.75847136417051E-02i	0.00018249	12.90967

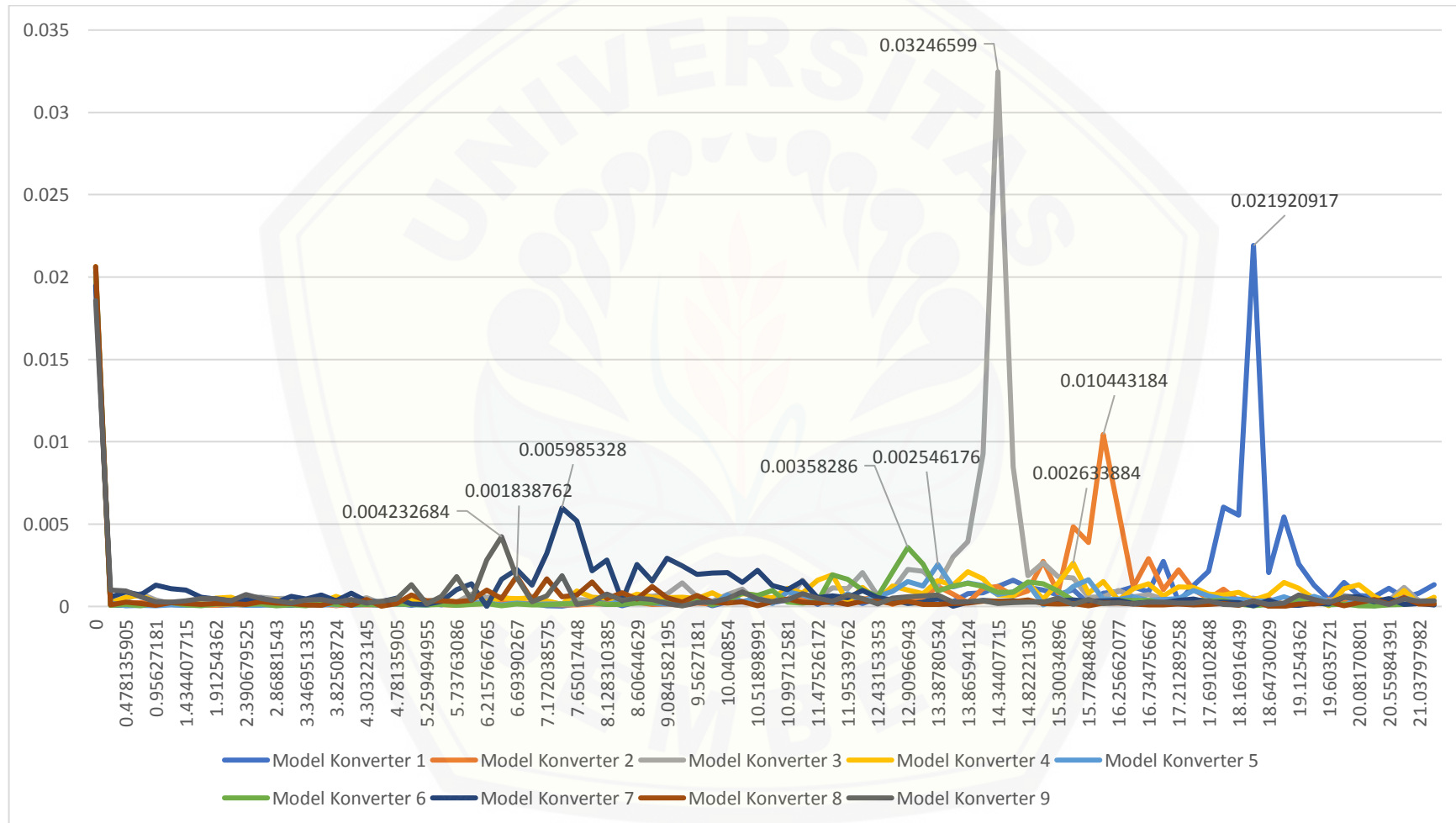
## Model Konverter 8

Fast Fourier Transform				
Step	Waktu	complex	magnitude	frekuensi
17	0.065486	6.89016400313714E-02+0.144836034594299i	0.000312651	3.825087
18	0.069579	-1.83003368500899E-02+3.25934777833442E-02i	7.28648E-05	4.064155
19	0.073672	-0.159716255459903+0.156705718848678i	0.000436168	4.303223
20	0.077764	-4.42225503013414E-03+1.35601799309702E-03i	9.01654E-06	4.542291
21	0.081857	-6.01618652947999E-02+7.19846443745806E-02i	0.000182875	4.781359
22	0.08595	4.38387038643751E-02+0.359987296385653i	0.000706914	5.020427
23	0.090043	1.80355451827119E-03+0.16838260032405i	0.00032825	5.259495
24	0.094136	-8.28780293105727E-02+0.161946843430239i	0.000354623	5.498563
25	0.098229	4.13607681838066E-02-0.14386466517724i	0.000291798	5.737631
26	0.102322	-0.18648718603108-5.86843286439886E-02i	0.000381097	5.976699
27	0.106414	-0.50688984620217-2.97510995465648E-02i	0.00098979	6.215767
28	0.110507	-0.228625936523575-9.26364770233822E-02i	0.000480859	6.454835
29	0.1146	-0.574447041065388-0.498828708973691i	0.001838762	6.693903
30	0.118693	6.75409017632381E-02+0.1878474852443i	0.000389124	6.932971
31	0.122786	0.794051693306031-0.32209790968183i	0.001670356	7.172039
32	0.126879	7.22874254180946E-02-0.298438790711123i	0.000598574	7.411107
33	0.130972	0.29850784357471-0.188092684082393i	0.000687769	7.650174
34	0.135065	0.598371855981176-0.729203681523328i	0.001483045	7.889242
35	0.139157	-9.90940269390589E-02-0.229443842718901i	0.000487189	8.12831
36	0.14325	-0.10976671022904+0.4136963516437i	0.000834329	8.367378
37	0.147343	-0.232130700314645-5.17581228302505E-02i	0.000463608	8.606446
38	0.151436	0.258539039839715-0.565811105493271i	0.001212633	8.845514
39	0.155529	-0.217142885708323-0.161000059010089i	0.000526937	9.084582
40	0.159622	-1.72105084167855E-02+0.133215719433146i	0.000261838	9.32365
41	0.163715	4.0332815760183E-02-0.339960269466627i	0.000667338	9.562718
42	0.167807	-0.12447865708738-5.16770407980953E-02i	0.000262728	9.801786
43	0.1719	3.32998342571371E-02-9.75601811333721E-02i	0.000200949	10.04085
44	0.175993	-0.106302725575111-0.106641059073967i	0.000293517	10.27992
45	0.180086	1.89371820980526E-02-1.7586387539246E-02i	5.03776E-05	10.51899
46	0.184179	-0.151104216011188+6.05471562149853E-03i	0.000294786	10.75806
47	0.188272	0.124695740801834-0.191018476300615i	0.000444671	10.99713
48	0.192365	0.134401227374788+3.92193148202187E-02i	0.000272917	11.23619
49	0.196457	-5.74985085474581E-02-8.01532758332573E-02i	0.000192288	11.47526
50	0.20055	-8.43150296803453E-02+0.117149277872422i	0.000281357	11.71433
51	0.204643	1.26665890554847E-02+6.89647615719061E-02i	0.000136683	11.9534

## Model Konverter 9

Fast Fourier Transform				
Step	Waktu	complex	magnitude	frekuensi
18	0.069579	-0.154630397499334+0.160548712629573i	0.000434512	4.064155
19	0.073672	5.54112396788983E-02+8.83371485944935E-02i	0.000203271	4.303223
20	0.077764	-8.60873200565114E-02-0.14037551626912i	0.000320995	4.542291
21	0.081857	0.150524005173346+0.172492221656993i	0.000446266	4.781359
22	0.08595	-0.30877711631162-0.606071423015459i	0.001325917	5.020427
23	0.090043	-1.33751116127295E-02+7.05363603487638E-02i	0.000139948	5.259495
24	0.094136	-0.105646425982479+0.294725305916082i	0.000610308	5.498563
25	0.098229	0.926788982342174+4.45996578659422E-03i	0.001806627	5.737631
26	0.102322	-0.192687709026666+7.97356928027283E-02i	0.000406499	5.976699
27	0.106414	-0.206280322014885+1.42719307680521i	0.002810962	6.215767
28	0.110507	1.32160744009855-1.72284325881921i	0.004232684	6.454835
29	0.1146	0.85590800560577-0.283409721709309i	0.001757523	6.693903
30	0.118693	-0.105738378781641-0.100831119045614i	0.000284811	6.932971
31	0.122786	-0.231079829382851-0.230434037980088i	0.00063614	7.172039
32	0.126879	-0.554419428904836+0.774959363767008i	0.001857428	7.411107
33	0.130972	-1.74926252060349E-02+5.89681727270166E-02i	0.000119899	7.650174
34	0.135065	8.82360888942001E-02+0.125298041714393i	0.000298731	7.889242
35	0.139157	-0.294826237934074-0.236922892867085i	0.000737283	8.12831
36	0.14325	-0.182318939161181+5.9900269625838E-02i	0.000374087	8.367378
37	0.147343	-0.209679032718125-0.142449021255363i	0.000494132	8.606446
38	0.151436	-5.49140571222867E-02+0.212476210786858i	0.000427793	8.845514
39	0.155529	-5.79522870759775E-02-6.16008825917862E-02i	0.000164866	9.084582
40	0.159622	4.38315163130214E-03+1.56810941726908E-02i	3.17391E-05	9.32365
41	0.163715	-9.61789247198934E-02-6.00578433563716E-02i	0.000221033	9.562718
42	0.167807	-0.129550262485506+2.048355870194E-02i	0.000255672	9.801786
43	0.1719	-0.242886712747471+2.69394142456603E-02i	0.000476367	10.04085
44	0.175993	0.280098708422633+0.365682969734676i	0.000897913	10.27992
45	0.180086	-0.23236623104779+2.96561830407794E-02i	0.00045663	10.51899
46	0.184179	6.90107839514042E-02+0.122466387159786i	0.00027402	10.75806
47	0.188272	-0.20653164973081-3.30799241471808E-03i	0.000402647	10.99713
48	0.192365	-0.170493313320543+0.35563950879442i	0.000768801	11.23619
49	0.196457	0.216191646394491+0.135862107769892i	0.000497734	11.47526
50	0.20055	0.153649813090212-4.93680958101631E-02i	0.000314593	11.71433
51	0.204643	-0.211185420240148-0.282850467691844i	0.000688094	11.9534
52	0.208736	-2.47538606805185E-02+0.250223110642771i	0.000490145	12.19247

Grafik Hasil Perhitungan FFT



Lampiran 4.4 Dokumentasi Pelaksanaan Penelitian



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)



(h)



(i)



(j)



(k)



(l)

Gambar Alat dan Bahan Penelitian:

- (a) Tabung suntikan
- (b) Pelat logam
- (c) Pelat galvalume
- (d) Pipa akrilik
- (e) Piezoelektrik
- (f) Pompa air
- (g) Sambungan pipa PVC dengan pipa akrilik
- (h) Jangka sorong
- (i) Timbangan digital
- (j) *Twist and Bend Machine*
- (k) Tangki 43 L
- (l) Lem bakar



(a)



(b)



(c)



(d)

Pelaksanaan Penelitian

- (a) Model Konverter (b) Model konverter pada dipasangkan pada pipa akrilik  
(c) Pompa menaikkan air dari sungai menuju tangka (d) Sistem aliran air