



**PENGARUH KEKAKUAN (*STIFFNESS*) KANTILEVER  
DAN ORIENTASI *BLUFF BODY* TERHADAP TEGANGAN  
LISTRIK PADA *VORTEX-INDUCED VIBRATION*  
TENAGA BAYU**

**SKRIPSI**

Oleh:

**Saiful Ma'arif  
NIM 141910101067**

**PROGRAM STUDI STRATA 1 TEKNIK MESIN  
JURUSAN TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS JEMBER  
2018**



**PENGARUH KEKAKUAN (*STIFFNESS*) KANTILEVER  
DAN ORIENTASI *BLUFF BODY* TERHADAP TEGANGAN  
LISTRIK PADA *VORTEX-INDUCED VIBRATION*  
TENAGA BAYU**

**SKRIPSI**

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

Oleh:

**Saiful Ma'arif**  
**NIM 141910101067**

**PROGRAM STUDI STRATA 1 TEKNIK MESIN  
JURUSAN TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS JEMBER  
2018**

## PERSEMBAHAN

Skripsi ini saya persembahkan untuk:

1. Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat serta anugerah-Nya sehingga dapat memperoleh kesempatan menuntut ilmu dijenjang perguruan tinggi;
2. Ibunda Siti Mu'ayanah, ayahanda Dalhari, serta segenap keluarga besar Ibrahim dan Syamsyuri tercinta;
3. Guru-guruku sejak taman kanak-kanak sampai dengan perguruan tinggi yang telah membimbing dan memberikan ilmu yang insyaallah bermanfaat;
4. Almamater Fakultas Teknik Universitas Jember.

**MOTO**

“Allah akan meninggikan orang-orang yang beriman di antara kamu dan orang-orang yang diberi ilmu pengetahuan beberapa derajat”  
(terjemahan Surat *Al-Mujadalah* ayat 11)<sup>\*)</sup>

“*If you can't explain it simply, you don't understand it well enough*”  
(Albert Einstein)

“Tuhan tidak menuntut kita untuk sukses, Tuhan hanya menyuruh kita berjuang tanpa henti”  
(Muhammad Ainun Nadjib)

---

<sup>\*)</sup> Departemen Agama Republik Indonesia. 1998. *Al Qur'an dan Terjemahannya*. Semarang: PT. Kumudasmoro Grafindo.

**PERNYATAAN**

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Saiful Ma'arif

NIM : 141910101067

menyatakan dengan sesungguhnya bahwa karya ilmiah yang berjudul “Pengaruh Kekakuan (*Stiffness*) Kantilever dan Orientasi *Bluff Body* terhadap Tegangan Listrik pada *Vortex-Induced Vibration* Tenaga Bayu” 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 di kemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, 6 September 2018

Yang menyatakan,

Saiful Ma'arif

141910101067

**SKRIPSI**

**PENGARUH KEKAKUAN (*STIFFNESS*) KANTILEVER  
DAN ORIENTASI *BLUFF BODY* TERHADAP TEGANGAN  
LISTRIK PADA *VORTEX-INDUCED VIBRATION*  
TENAGA BAYU**

Oleh  
Saiful Ma'arif  
NIM 141910101067

Pembimbing

Dosen Pembimbing Utama : Dr. Gaguk Jatisukamto, S.T., M.T.  
Dosen Pembimbing Anggota : Muh. Nurkoyim K., S.T., M.T.

**PENGESAHAN**

Skripsi berjudul “Pengaruh Kekakuan (*Stiffness*) Kantilever dan Orientasi *Bluff Body* terhadap Tegangan Listrik pada *Vortex-Induced Vibration* Tenaga Bayu” karya Saiful Ma’arif telah diuji dan disahkan pada:

Hari, tanggal : Selasa, 25 September 2018

Tempat : Fakultas Teknik Universitas Jember.

**Tim Pembimbing:**

Dosen Pembimbing Utama,

Dosen Pembimbing Anggota,

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

Muh. Nurkoyim K., S.T., M.T.

NIP. 196902091998021001

NIP. 196911221997021001

**Tim Penguji:**

Penguji I,

Penguji II,

Dr. Nasrul Ilminnafik, S.T., M.T.

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

NIP. 197111141999031002

NIP. 197008072002121001

Mengesahkan

Dekan Fakultas Teknik Universitas Jember,

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

NIP 196612151995032001

## RINGKASAN

**Pengaruh Kekakuan (*Stiffness*) Kantilever dan Orientasi *Bluff Body* terhadap Tegangan Listrik pada *Vortex-Induced Vibration* Tenaga Bayu;** Saiful Ma'arif, 141910101067; 2018: 62 halaman; Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember.

Energi adalah kemampuan untuk melakukan kerja. Energi diklasifikasikan menjadi: energi gerak, energi panas, energi cahaya, energi listrik, energi elektrokimia, energi nuklir dan energi gravitasi. Kebutuhan energi primer dunia terus meningkat sebanyak 45% dari 13.070 juta TOE pada rentan waktu 2011 – 2013. Konsumsi energi Indonesia mengalami peningkatan dari 75 juta TOE menjadi 134 juta TOE dengan laju pertumbuhan 5,5% pertahun selama tahun 2010 – 2013. Ketergantungan energi fosil mengakibatkan Indonesia rentan mengalami krisis energi. Pengembangan energi baru dan terbarukan merupakan pilihan menuju kemandirian energi nasional.

Pemanfaatan energi terbarukan harus ditingkatkan. Salah satu metode pemanfaatan energi terbarukan adalah dengan metode *Energy Harvesting* yang dikembangkan untuk menyuplai daya pada alat elektronik portabel dan *Micro Electromechanical Systems* berdaya rendah. *Piezoelectric Vibration Energy Harvesting/Harvester* merupakan metode *Energy Harvesting* yang umumnya menggunakan batang kantilever berlapis piezoelektrik. Piezoelektrik berfungsi mengubah energi mekanik getaran dari lingkungan menjadi energi listrik. Potensi energi yang tinggi membuat *Piezoelectric Vibration Energy Harvesting/Harvester* digunakan untuk menyuplai daya pada *wireless sensing device* untuk menggantikan baterai yang memiliki kekurangan dalam *service live* dan ukuran alat.

Metode penelitian yang digunakan adalah metode eksperimental. Pengujian pertama adalah pengujian kekakuan batang kantilever yang dilakukan di laboratorium Perancangan Mekanik Universitas Jember, pengujian kedua adalah pengujian *wind tunnel* yang dilakukan di laboratorium Mobil Listrik Universitas Jember. Tujuan penelitian adalah untuk mengetahui pengaruh kekakuan dan



orientasi *bluff body* terhadap tegangan listrik dan daerah resonansi penghasil listrik. Hasil penelitian diharapkan dapat menumbuhkembangkan energi ramah lingkungan.

Hasil penelitian menunjukkan Nilai kekakuan tertinggi diperoleh dengan variasi panjang 60 mm dan lebar 40 mm yaitu 11,395 N/m. Tegangan listrik paling optimum sebesar 0,207 V diperoleh pada batang kantilever panjang 80 mm lebar 40 mm. Area resonansi optimum diperoleh pada batang kantilever panjang 60 mm lebar 40 mm yang dapat bekerja pada rentang  $U = 1 - 5,2$  m/s. Orientasi *bluff body* vertikal lebih unggul dalam menghasilkan tegangan listrik dan memiliki area resonansi yang lebih luas.

## SUMMARY

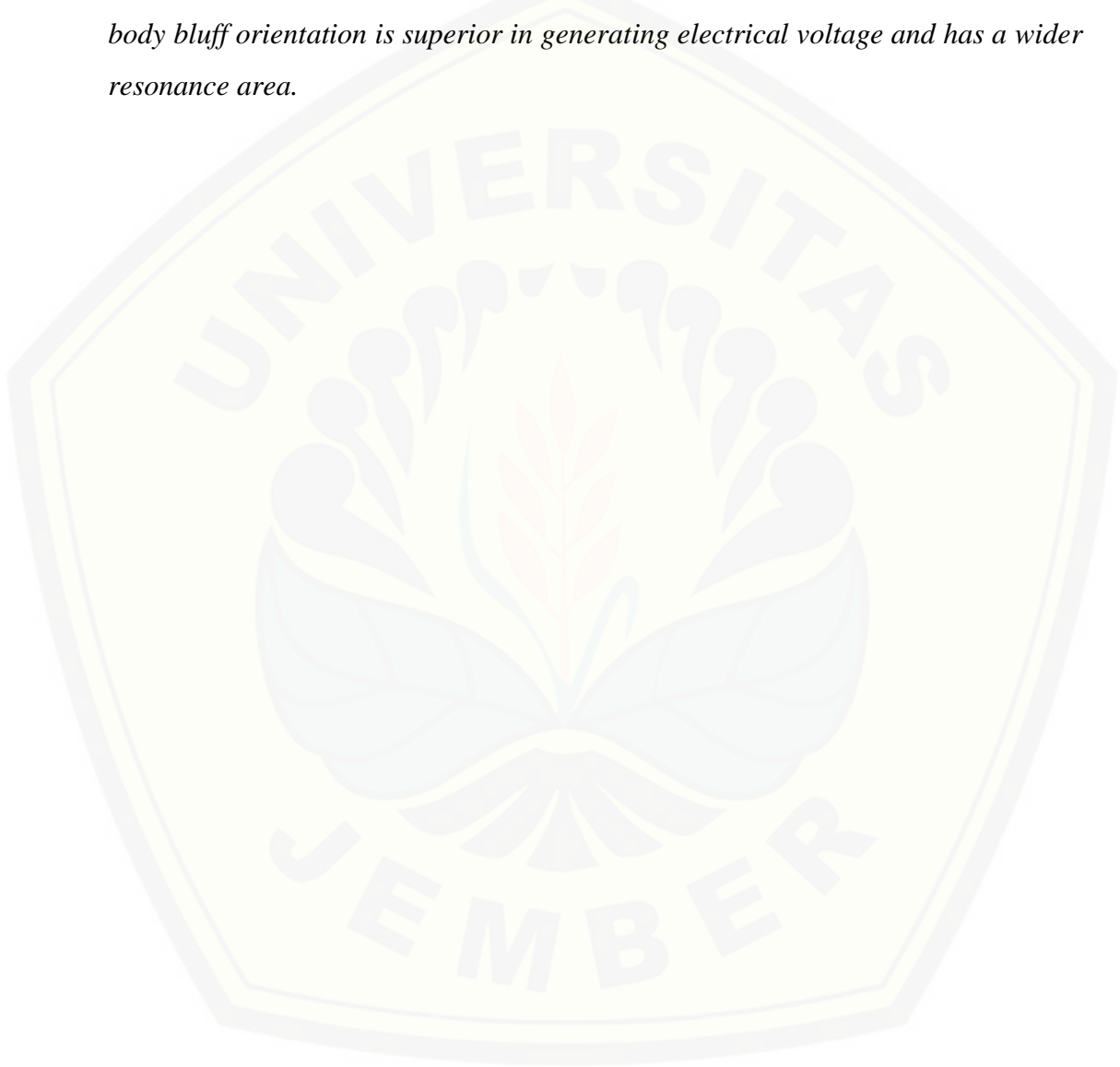
***The Effect of Cantilever Stiffness and Bluff Body Orientation on Wind Harvester Voltage on Vortex-Induced Vibration; Saiful Ma'arif, 141910101067; 2018: 62 pages; Mechanical Department, Faculty of Engineering, Jember University.***

*Energy is the ability to do work. Energy are classified into: motion energy, heat energy, light energy, electrical energy, electrochemical energy, nuclear energy and gravitational energy. World primary energy demands continue to increase by 45% from 13,070 million TOE in vulnerable times from 2011 to 2013. Indonesia's energy consumption has increased from 75 million TOE to 134 million TOE with an increase rate of 5.5% per year during 2010-2013. Fossil energy dependence resulting in Indonesia being vulnerable to experiencing an energy crisis. The development of new and renewable energy is a choice towards national energy independence.*

*Utilization of renewable energy must be increased. One method of utilizing renewable energy is the Energy Harvesting method which developed to supply power to portable electronic devices and low power Micro Electromechanical Systems. Piezoelectric Vibration Energy Harvesting/Harvester is an Energy Harvesting method which generally uses piezoelectric plated cantilever rods. Piezoelectric function converts the mechanical energy of vibration from the environment into electrical energy. High energy potential makes Piezoelectric Vibration Energy Harvesting/Harvester used to supply power to wireless sensing devices to replace batteries that have a lack of live service and tool size.*

*The research method used is an experimental method. The first test was testing the cantilever rod stiffness conducted at the Jember University Mechanical Engineering laboratory, the second test was wind tunnel testing conducted at the University of Jember Electric Car laboratory. The purpose of the study was to determine the effect of the stiffness and orientation of the bluff body on the electrical voltage and the resonant area producing electricity. The results of the study are expected to develop environmentally friendly energy.*

*The results showed that the highest stiffness values were obtained with variations in length of 60 mm and width of 40 mm, equals to 11,395 N/m. The most optimum electrical voltage of 0.207 V was obtained on the cantilever rod 80 mm wide by 40 mm. The optimum resonance area was obtained in the cantilever stem 60 mm long by 40 mm wide which can work in the range  $U = 1 - 5.2$  m/s. Vertical bluff orientation is superior in generating electrical voltage and has a wider resonance area.*



## PRAKATA

Alhamdulillah rabbil'aalamin, segala puja dan puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT yang Maha Penyayang. Atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul "Pengaruh Kekakuan (*Stiffness*) Kantilever dan Orientasi *Bluff Body* terhadap Tegangan Listrik pada *Vortex-Induced Vibration* Tenaga Bayu". 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. Dr. Gaguk Jatisukanto, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing Utama, dan Muh. Nurkoyim K., S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing Anggota yang telah meluangkan waktu, pikiran, dan perhatian pada skripsi ini;
2. Dr. Nasrul Ilminnafik, S.T., M.T., selaku Dosen Penguji I, dan Dr. Agus Triono, S.T., M.T., selaku Dosen Penguji II yang telah memberikan masukan dan saran bersifat konstruktif untuk penyusunan skripsi ini;
3. Bapak Hari Sutjahjono, S.T., M.T., dan ibu Rika Dwi Hidayatul Qoryah, S.T., M.T. yang telah memberikan bimbingan dan arahan;
4. Ibunda Siti Mu'ayanah dan ayahanda Dalhari yang telah memberikan dorongan dan doanya demi terselesaikannya skripsi ini;
5. Teman-teman *Member EPSON* dan Tim Mobil Listrik TITEN yang telah memberikan semangat serta bantuan;
6. Civitas akademika Jurusan Teknik Mesin 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, 6 September 2018

Penulis

**DAFTAR ISI**

	Halaman
<b>HALAMAN SAMPUL</b> .....	i
<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	ii
<b>HALAMAN PERSEMBAHAN</b> .....	iii
<b>HALAMAN MOTO</b> .....	iv
<b>HALAMAN PERNYATAAN</b> .....	v
<b>HALAMAN PEMBIMBING</b> .....	vi
<b>HALAMAN PENGESAHAN</b> .....	vii
<b>RINGKASAN</b> .....	viii
<b>SUMMARY</b> .....	x
<b>PRAKATA</b> .....	xii
<b>DAFTAR ISI</b> .....	xiii
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xvi
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xviii
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	xix
<b>BAB 1. PENDAHULUAN</b> .....	1
<b>1.1 Latar Belakang</b> .....	1
<b>1.2 Rumusan Masalah</b> .....	4
<b>1.3 Batasan Masalah</b> .....	4
<b>1.4 Tujuan Penelitian</b> .....	4
<b>1.5 Manfaat Penelitian</b> .....	4

<b>BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	5
<b>2.1 Vortex-induced Vibration (VIV)</b> .....	5
<b>2.1.1 Angka Reynold (Re)</b> .....	7
<b>2.1.2 Vortex shedding</b> .....	7
<b>2.1.3 Angka Strouhal (<math>S_t</math>)</b> .....	9
<b>2.1.4 Gaya Angkat (<i>Lift</i>) dan Gaya Hambat (<i>Drag</i>)</b> .....	10
<b>2.2 Getaran</b> .....	11
<b>2.3 Kekakuan (<i>Stiffness</i>)</b> .....	15
<b>2.4 Piezoelektrik</b> .....	16
<b>2.5 Wind Tunnel</b> .....	18
2.5.1 <i>Open Circuit/Open Return Wind Tunnel</i> .....	18
2.5.2 <i>Close Circuit/Close Return Wind Tunnel</i> .....	19
<b>2.6 Hipotesis</b> .....	20
<b>BAB 3. METODE PENELITIAN</b> .....	21
<b>3.1 Metode Penelitian</b> .....	21
<b>3.2 Alat dan Bahan Penelitian</b> .....	21
3.2.1 Alat .....	21
3.2.2 Bahan.....	21
<b>3.3 Prosedur Penelitian</b> .....	22
<b>3.4 Pelaksanaan Penelitian</b> .....	22
3.4.1 Variabel Penelitian .....	22
3.4.2 Pengambilan Data.....	24
<b>3.5 Diagram Alir Penelitian</b> .....	26

<b>BAB 4. PEMBAHASAN</b> .....	28
<b>4.1 Data Hasil Percobaan</b> .....	28
4.1.1 Kekakuan Batang Kantilever.....	28
4.1.2 Respons Getaran Bebas .....	29
<b>4.2 Pengujian <i>Wind Tunnel</i></b> .....	33
<b>4.3 Analisis Hasil Penelitian</b> .....	36
4.3.1 Pengaruh Dimensi Kantilever Terhadap Kekakuan .....	36
4.3.2 Pengaruh Kekakuan terhadap Tegangan dan Daerah Resonansi.....	38
4.3.3 Pengaruh Orientasi <i>Bluff Body</i> terhadap Tegangan dan Daerah Resonansi.....	39
<b>BAB 5. PENUTUP</b> .....	42
<b>5.1 Kesimpulan</b> .....	42
<b>5.2 Saran</b> .....	42
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	43
<b>LAMPIRAN</b> .....	46

**DAFTAR GAMBAR**

	Halaman
Gambar 2.1 Tipe kilang minyak <i>offshore</i> .....	5
Gambar 2.2 Klasifikasi <i>flow-induced vibrations</i> .....	6
Gambar 2.3 Skema pergerakan <i>vortex-induced vibrations</i> .....	6
Gambar 2.4 Hubungan angka Srouhal-Reynold untuk benda silindris.....	9
Gambar 2.5 Arah gaya yang mempengaruhi <i>bluff body</i> .....	11
Gambar 2.6 Contoh eksitasi deterministik dan random .....	12
Gambar 2.7 Ilustrasi siklus getaran.....	13
Gambar 2.8 Osilasi teredam.....	14
Gambar 2.9 Skema pembebanan batang kantilever .....	15
Gambar 2.10 Pengaruh dimensi batang kantilever terhadap frekuensi natural.....	16
Gambar 2.11 Kemampuan piezoelektrik.....	17
Gambar 2.12 <i>Open circuit/open return wind tunnel</i> .....	19
Gambar 2.13 <i>Close circuit/close return wind tunnel</i> .....	20
Gambar 3.1 Dimensi <i>bluff body</i> .....	23
Gambar 3.2 Variasi orientasi <i>bluff body</i> .....	23
Gambar 3.3 Pengambilan data kekakuan batang kantilever .....	24
Gambar 3.4 Respon getaran bebas batang kantilever .....	24
Gambar 3.5 Skema pengujian <i>wind tunnel</i> .....	25
Gambar 3.6 Diagram Alir Penelitian .....	26
Gambar 3.6 Diagram Alir Penelitian (lanjutan).....	27
Gambar 4.1 Skema pengujian kekakuan batang kantilever .....	28
Gambar 4.2 Tampilan respons getaran bebas pada kantilever panjang 60 mm, lebar 40 mm, orientasi <i>bluff body</i> vertikal.....	30



Gambar 4.3 Skema pembebanan terpusat batang kantilever .....	31
Gambar 4.4 SFD dan BMD kantilever beban terpusat .....	32
Gambar 4.5 Bentuk isometrik tempat uji persegi <i>wind tunnel</i> .....	33
Gambar 4.6 Perbandingan getaran <i>vortex shedding</i> dan getaran bebas .....	35
Gambar 4.7 Hubungan panjang dengan kekakuan batang kantilever .....	36
Gambar 4.8 Hubungan lebar dengan kekakuan batang kantilever.....	37
Gambar 4.9 Respons pengujian <i>bluff body</i> vertikal kantilever lebar 40 mm.....	38
Gambar 4.10 Respons pengujian <i>bluff body</i> horizontal kantilever lebar 40 mm..	39
Gambar 4.11 Arah gaya pada <i>bluff body</i> horizontal .....	40
Gambar 4.12 Perbandingan output tegangan variasi orientasi.....	41

**DAFTAR TABEL**

	Halaman
Tabel 2.1 <i>Vortex shedding regimes</i> .....	8
Tabel 2.2 Potensi daya energi yang dapat dihasilkan pada berbagai macam sumber .....	18
Tabel 3.1 Variasi panjang dan lebar batang kantilever .....	24
Tabel 4.1 Data kekakuan batang kantilever .....	29
Tabel 4.2 Data respons getaran bebas pada kantilever panjang 60 mm, lebar 40 mm, orientasi <i>bluff body</i> vertikal .....	30
Tabel 4.3 Data respons frekuensi <i>vortex shedding</i> pada kantilever panjang 60 mm, lebar 40 mm, orientasi <i>bluff body</i> vertikal .....	34

**DAFTAR LAMPIRAN**

	Halaman
Lampiran 6.1 Data spesifikasi Propscope Parallax USB Oscilloscope.....	46
Lampiran 6.2 Data spesifikasi Piezoelektrik LDT0-028K.....	47
Lampiran 6.3 Data pengaruh kekakuan terhadap frekuensi natural.....	48
Lampiran 6.4 Grafik Respons Getaran Bebas Pada Orientasi <i>Bluff Body</i> .....	49
Lampiran 6.5 Grafik Hasil Pengujian <i>Wind Tunnel Bluff Body</i> Vertikal.....	50
Lampiran 6.6 Grafik Hasil Pengujian <i>Wind Tunnel Bluff Body</i> Horizontal.....	53
Lampiran 6.7 Properti fisika dari udara pada tekanan atmosfer standar .....	56
Lampiran 6.8 Properti dasar polypropylene.....	57
Lampiran 6.9 Alat dan bahan penelitian .....	58
Lampiran 6.10 Proses pelaksanaan penelitian .....	60
Lampiran 6.11 Skema mekanisme batang kantilever .....	62

## BAB 1. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Energi adalah kemampuan untuk melakukan kerja. Energi diklasifikasikan menjadi: energi gerak, energi panas, energi cahaya, energi listrik, energi elektrokimia, energi nuklir dan energi gravitasi (Demirel, 2012). Kebutuhan energi primer dunia (energi fosil, energi terbarukan dan sisa (*waste*)) diperkirakan meningkat sebanyak 45% dari 13.070 juta *Tonnes of Oil Equivalent* (TOE) pada rentan waktu 2011 – 2013. Konsumsi batu bara dunia tahun 2011 mencapai 3.773 juta TOE, disusul penggunaan energi fosil dunia mencapai 10.668 juta TOE atau mencakup 82% dari total kebutuhan energi dan diperkirakan meningkat 14.898 juta TOE pada tahun 2035. Konsumsi energi Indonesia mengalami peningkatan dari 75 juta TOE menjadi 134 juta TOE dengan laju pertumbuhan 5,5% pertahun selama tahun 2010 – 2013 (Dewan Energi Nasional, 2014).

Kebutuhan energi nasional yang terus bertambah sebagian besar bersumber dari energi fosil (minyak bumi 48%, batu bara 30% dan gas 18%). Cadangan potensial minyak dan batu bara Indonesia tahun 2013 diperkirakan hanya 3,85 miliar barel dan 28,97 miliar ton (Dewan Energi Nasional, 2014). Indonesia mengalami produksi minyak terbesar pada tahun 1977 dan 1995 yaitu masing-masing sebesar 1,68 juta *barrel per day* (bpd) dan 1,62 juta bpd. Produksi minyak rata-rata menurun dengan natural *decline rate* sekitar 12% sejak tahun 1995. Penurunan produksi minyak terjadi pada tahun 2014, produksi minyak bumi hanya 789 ribu bpd atau menurun menjadi 96% dibandingkan tahun 2013 yang sebesar 824 ribu bpd (Kementerian ESDM, 2015). Ketergantungan energi fosil mengakibatkan Indonesia rentan mengalami krisis energi. Pengembangan energi baru dan terbarukan (*renewable energy*) merupakan pilihan menuju kemandirian energi nasional (Kementerian ESDM, 2016).

Sumber Energi Baru dan Terbarukan (EBT) adalah sumber energi ramah lingkungan yang tidak mencemari lingkungan dan tidak mempengaruhi perubahan iklim serta pemanasan global dikarenakan energi yang diperoleh berasal dari proses alam yang berkelanjutan seperti sinar matahari, bayu (angin), air, *biofuel* dan panas

bumi (*geothermal*) (Kementerian ESDM, 2016). Potensi EBT Indonesia mencapai 400 GW, tahun 2015 EBT dapat dimanfaatkan sebesar dua persen dari total potensi EBT (Pusat Data dan Teknologi Informasi ESDM, 2016). Pemerintah mencatat pembangkit listrik tenaga EBT tahun 2015 mampu memasok 9,4 GW listrik, dengan rincian tenaga bayu 0,4 GW, surya 0,3 GW, bioenergi 1,9 GW, mikrohidro 0,3 GW, air 5,1 GW dan panas bumi 1,4 GW. Pemanfaatan EBT direncanakan meningkat hingga 41,79 GW pada 2025 dengan bauran 23% EBT (Kementerian ESDM, 2016).

Pemanfaatan energi terbarukan harus ditingkatkan. Salah satu metode pemanfaatan energi terbarukan adalah dengan metode *Energy Harvesting* (EH) yang dikembangkan untuk menyuplai daya pada alat elektronik portabel dan *Micro Electromechanical Systems* (MEMS) berdaya rendah. *Piezoelectric Vibration Energy Harvesting/Harvester* (PVEH) merupakan metode EH yang umumnya menggunakan batang kantilever berlapis piezoelektrik. Piezoelektrik berfungsi mengubah energi mekanik getaran dari lingkungan menjadi energi listrik. Piezoelektrik memiliki potensi *output energy level*  $100 \text{ mW/cm}^3$  dibandingkan turbin angin yang hanya memiliki *output energy level*  $800 \text{ } \mu\text{W/cm}^2$  (Rafique, 2018). Potensi energi yang tinggi membuat PVEH digunakan untuk menyuplai daya pada *wireless sensing device* (sensor jarak jauh) untuk menggantikan baterai yang memiliki kekurangan dalam *service live* dan ukuran alat (Zhao dkk., 2017).

Akaydin dkk., (2012), meneliti tentang performa pembangkit listrik pada fenomena *Vortex-induced Vibration* (VIV) menggunakan batang kantilever dan *bluff body*. Metode penelitian yang digunakan adalah dengan membandingkan pemodelan matematis dan eksperimen menggunakan media *wind tunnel*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa hasil perhitungan matematis menunjukkan tren yang sama dengan hasil pengujian eksperimen dimana hasil output tertinggi 0,1 mW pada kecepatan angin 1,192 m/s.

Dai dkk., (2016), memanfaatkan fenomena VIV menjadi listrik dengan memvariasikan orientasi *bluff body* terhadap batang kantilever. Penelitian dilakukan menggunakan *wind tunnel* dimana masing-masing variasi orientasi diberikan resistor bermuatan berbeda pada kecepatan angin yang bervariasi. Hasil penelitian menunjukkan orientasi *bluff body* vertikal dengan posisi tegak lurus

terhadap batang kantilever (orientasi yang dilakukan Akaydin) merupakan orientasi yang paling baik dengan output mendekati  $180 \mu\text{W}$  pada kecepatan angin  $3,5 \text{ m/s}$  dengan resistor  $500 \text{ k}\Omega$ .

Correa dkk., (2014), mengembangkan suatu alat pembangkit listrik tenaga angin yang ringkas dimana memanfaatkan fenomena VIV dengan *bluff body* yang dihubungkan dengan empat *coil spring*. Metode yang dilakukan adalah proses desain alat serta pemilihan material yang digunakan pada *bluff body* dimana selanjutnya pembangkit listrik diuji pada *wind tunnel*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa mekanisme yang diuji bekerja optimal pada kecepatan angin  $3,3 - 4,6 \text{ m/s}$

El-Mageed dkk., (2014), memanfaatkan fenomena VIV pada aliran air dengan *laminated polymer/polyvinylidene difluoride (PVDF)*, dimana batang kantilever terbuat dari piezoelektrik yang dilapisi dengan polimer. Penelitian dilakukan dengan menguji alat pada *water tunnel* untuk melakukan validasi hasil dari simulasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa daya maksimum yang dihasilkan sebesar  $0,027 \mu\text{W}$ .

Zhao dkk., (2017), meneliti tentang metode desain untuk memperoleh struktur batang kantilever yang cocok pada frekuensi rendah. Metode penelitian menggunakan simulasi model batang kantilever dengan *software Ansys*. Hasil simulasi divalidasi dengan melakukan eksperimen batang kantilever berdasarkan dimensi yang optimal berdasarkan simulasi, sehingga apabila hasil simulasi mendekati hasil eksperimen dapat dikatakan bahwa metode desain yang digunakan adalah metode yang layak digunakan.

Berdasarkan penelitian-penelitian yang disebutkan di atas, dapat diperoleh data dan referensi pendukung untuk memanfaatkan angin menjadi listrik pada fenomena VIV. Penelitian ini dilakukan untuk memanfaatkan VIV yang umumnya dihindari karena mengakibatkan kerusakan pada struktur untuk dimanfaatkan menjadi listrik dengan bantuan bahan piezoelektrik, sehingga diharapkan dapat mengurangi penggunaan listrik pada peralatan berdaya rendah yang umumnya dibangkitkan dari energi fosil dan mengurangi penggunaan baterai yang memiliki efek terhadap lingkungan.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan kajian pustaka yang diperoleh di atas, dapat diambil perumusan masalah sebagai berikut: “Bagaimana pengaruh kekakuan (*stiffness*) batang kantilever dan orientasi *bluff body* terhadap tegangan listrik dan daerah resonansi?”.

## 1.3 Batasan Masalah

Ruang lingkup penelitian sebagai batasan masalah agar penelitian lebih fokus dan tidak keluar dari tujuan yang diinginkan adalah sebagai berikut:

1. Suhu udara yang mengalir dalam *test section* diasumsikan seragam.
2. Suhu ruangan diasumsikan tetap.
3. Pengukuran suhu dan kecepatan udara dilakukan sesaat.
4. Tidak membahas aliran fluida disekitar *bluff body*.

## 1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini berdasarkan rumusan masalah di atas adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui pengaruh variasi panjang dan lebar terhadap kekakuan batang kantilever.
2. Mengetahui pengaruh kekakuan batang kantilever terhadap tegangan listrik dan daerah resonansi penghasil listrik.
3. Mengetahui pengaruh variasi orientasi *bluff body* terhadap tegangan listrik dan daerah resonansi penghasil listrik.

## 1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang dapat diperoleh dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

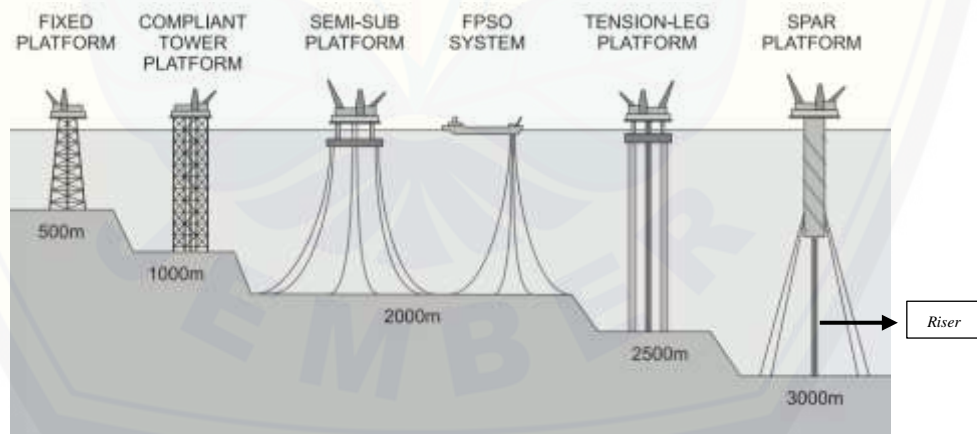
1. Mengembangkan energi terbarukan.
2. Memasyarakatkan teknologi *harvest energy*.
3. Menumbuh kembangkan energi ramah lingkungan.

## BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 *Vortex-induced Vibration (VIV)*

*Vortex-induced vibration* pada struktur merupakan fenomena yang menarik bagi banyak bidang teknik. VIV dapat menyebabkan getaran pada pipa *heat exchanger*, getaran pada struktur seperti jembatan dan cerobong, menyebabkan getaran dengan amplitudo besar pada struktur yang tertambat di lautan serta menyebabkan getaran pada pipa *riser* yang membawa minyak dari dasar laut ke permukaan (Williamson dan Govardhan, 2004).

Eksplorasi minyak lepas pantai mengalami perkembangan yang pesat. Teknologi baru memungkinkan proses pengeboran untuk memperoleh minyak di dasar laut dalam. Rekayasa struktur mengambang di atas permukaan air memungkinkan eksplorasi minyak di kedalaman lebih dari 1000 m di bawah permukaan laut. Anjungan lepas pantai berevolusi dari menara tetap yang dipasang di perairan dangkal hingga menjadi platform raksasa yang mampu beroperasi di kedalaman laut dalam (Assi, 2009).

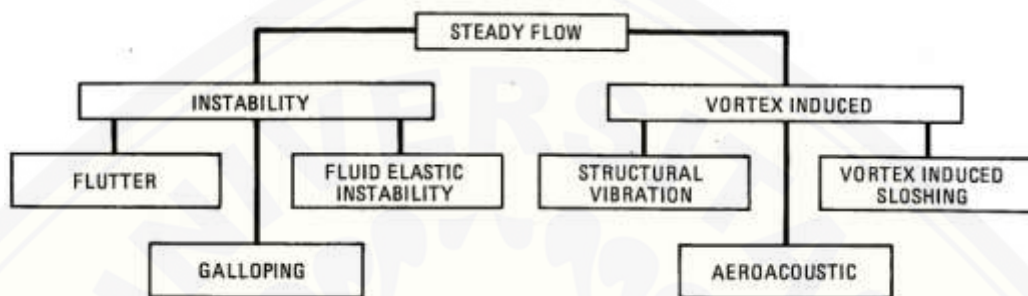


Gambar 2.1 Tipe kilang minyak *offshore* (Sumber: Assi, 2009)

Pengeboran dan produksi minyak lepas pantai memiliki permasalahan utama berupa getaran yang diakibatkan oleh arus laut yang diinduksikan pada *riser* (pipa yang menghubungkan sumur minyak dan platform) seperti pada Gambar 2.1. Air

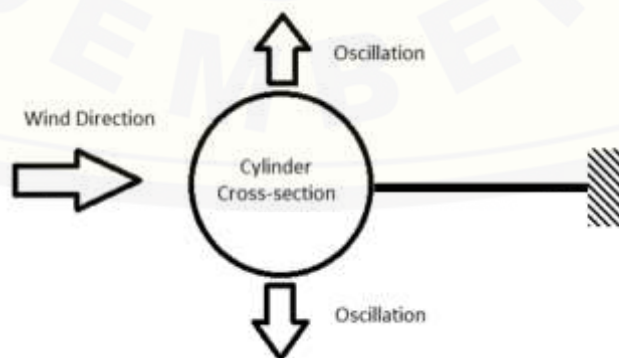


yang mengalir di sekitar *riser* mengakibatkan struktur bergetar. Getaran yang timbul sangat merugikan, karena dapat mengganggu proses pengeboran serta mengakibatkan kelelahan (*fatigue*) pada struktur ataupun pipa *riser*. Industri lepas pantai perlu melakukan riset untuk menemukan solusi dalam menekan getaran yang timbul akibat VIV (Assi, 2009).



Gambar 2.2 Klasifikasi *flow-induced vibrations* (Sumber: Blevin, 2001)

*Vortex-induced vibration* adalah salah satu jenis *Flow-induced Vibration* (FIV) dimana termasuk dalam beban siklik yang dihasilkan oleh pusaran di sekitar *bluff body* (Assi, 2009). Penjelasan lain tentang fenomena VIV adalah apabila *Bluff body* (dalam hal ini berbentuk silinder) fleksibel ditempatkan dalam suatu aliran fluida, maka pusaran akan terbentuk di belakang sisi silinder. Pusaran yang terbentuk menghasilkan gaya eksternal yang mengakibatkan silinder berosilasi melintang terhadap arah aliran (Jain, 2012).



Gambar 2.3 Skema pergerakan *vortex-induced vibrations* (Sumber: Correa dkk., 2014)

### 2.1.1 Angka Reynold (Re)

Angka Reynold dari suatu aliran menunjukkan rasio gaya inersia terhadap gaya viskos dalam aliran. Rasio digunakan untuk mengklasifikasikan aliran fluida sebagai aliran yang laminar, transisi, atau turbulen. Klasifikasi tersebut menunjukkan tingkat persimpangan *streamline* dan dispersi dalam aliran (Correa dkk., 2014). Cengel dan Cimbala, (2006) mengklasifikasi aliran fluida berdasarkan nilai angka Reynold yaitu pada rentan  $Re \leq 2300$  (laminar),  $2300 \leq Re \leq 10.000$  (transisi) dan  $Re \geq 10.000$  (turbulen). Angka Reynold dihitung dengan persamaan berikut (Blevin, 2001):

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

$$Re = \frac{\rho UD_h}{\mu} \quad (2.2)$$

Dengan:

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

$U$  = kecepatan aliran (m/s)

$D_h$  = diameter atau sisi *test section wind tunnel* (m)


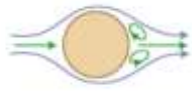




$\mu$  = viskositas dinamik fluida ( $\text{N.s/m}^2$ )

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

### 2.1.2 Vortex shedding

*Vortex shedding* terbentuk dibelakang *bluff body* pada aliran fluida. Pusaran tidak akan terbentuk atau terbentuk, namun tidak terjadi pemisahan pada angka Reynold yang sangat rendah ( $Re < 40$ ). *Vortex shedding* mulai terbentuk saat angka Reynold di atas 40, yang timbul akibat dorongan dari gangguan kecil dalam aliran atau di permukaan *bluff body* (Blevin, 2001). Tekanan negatif ke arah ujung *bluff body* memaksa fluida untuk melekat pada permukaannya, sementara di belakang *bluff body* perbedaan tekanan yang berubah-ubah menyebabkan pergeseran, dimana selanjutnya mengakibatkan terjadinya pemisahan dan timbulnya *vortex shedding*. Perpindahan bolak-balik pusaran ini disebut sebagai "*Karman Vortex Street*", yang dijelaskan oleh Von Karman pada tahun 1912 (Colette, 2014).

Tabel 2.1 *Vortex shedding regimes* (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	$150 < Re < 300$
	Laminar Boundary Layer 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	$3.5 \times 10^6 < Re$

Tabel 2.1 mengklasifikasikan pola *vortex shedding* yang terjadi pada rentang angka Reynold, dimana (Eid, 2004):

- $Re < 5$  : tidak terdapat pemisahan lapisan batas.
- $5 - 15 < Re < 40$  : lapisan batas terbagi untuk membentuk sepasang pusaran.
- $40 < Re < 150$  : setelah terjadi pemisahan, pusaran akan membentuk dua *vortex street* (jalur pusaran). Pusaran masih berbentuk laminar.
- $150 < Re < 300$  : pusaran yang terjadi mulai menjadi turbulen, dimana berubah turbulen sepenuhnya saat  $Re = 300$
- $300 < Re < 1.5 \times 10^5$  : merupakan daerah subkritikal, dimana *strohal number* bernilai konstan. Pusaran memiliki aliran turbulen namun lapisan batas masih laminar.
- $1.5 \times 10^5 < Re < 3.5 \times 10^6$  : merupakan daerah transisi pusaran dan lapisan batas mulai mengalami turbulensi.
- $Re > 3.5 \times 10^6$  : lapisan batas dan pusaran mengalami turbulensi.

### 2.1.3 Angka Strouhal ( $S_t$ )

Angka Strouhal adalah konstanta proporsional tanpa dimensi antara frekuensi *vortex shedding* ( $f_s$ ) dan kecepatan aliran bebas ( $U$ ) dibagi dengan diameter silinder ( $D$ ).  $U$  dan  $D$  harus memiliki unit yang konsisten (Blevin, 2001). Angka Strouhal digunakan untuk mengukur frekuensi *vortex shedding* terhadap kecepatan aliran fluida. Persamaan untuk angka Strouhal adalah sebagai berikut (Correa, 2014):

$$f_s = \frac{S_t U}{D} \quad (2.3)$$

$$S_t = \frac{f_s D}{U} \quad (2.4)$$

Dengan:

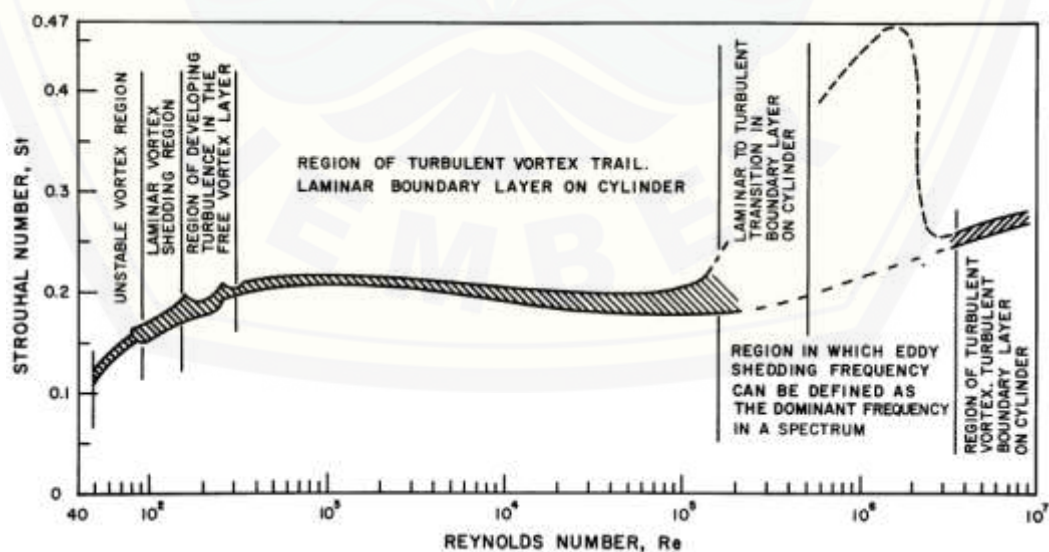
$f_s$  = frekuensi *vortex shedding* (Hz)

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

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

Angka Strouhal juga dapat diketahui dengan menggunakan pendekatan (Resvanis dkk., 2012):

$$S_t = -0.0065 \ln(Re) + 0.21 \quad (2.5)$$



Gambar 2.4 Hubungan angka Strouhal-Reynold untuk benda silindris

(Sumber: Lienhard, 1966)

#### 2.1.4 Gaya Angkat (*Lift*) dan Gaya Hambat (*Drag*)

Gaya yang mempengaruhi *bluff body* dibagi menjadi dua komponen. Komponen pertama adalah gaya hambat ( $F_D$ ), dimana arah gayanya searah dengan aliran fluida. Gaya hambat adalah satu-satunya gaya yang bekerja pada *bluff body* saat  $Re$  bawah 40, karena aliran yang terbentuk di belakang *bluff body* pada nilai  $Re < 40$  adalah simetris. Gaya angkat ( $F_L$ ) akan bekerja pada rentan  $Re > 40$ , dimana ketidakstabilan pusaran dan *vortex shedding* mulai terbentuk. Gaya angkat adalah gaya yang bekerja pada *bluff body* dimana arahnya tegak lurus terhadap arah aliran. Gaya hambat akan bernilai konstan sampai ketidakstabilan pusaran terjadi (Lienhard, 1966). Kecepatan aliran dan bentuk *bluff body* sangat berpengaruh terhadap gaya angkat dan gaya hambat (Correa dkk., 2014). Persamaan untuk gaya yang mempengaruhi *bluff body* silinder berdasarkan Gambar 2.5 adalah sebagai berikut (El-Mageed, 2001):

$$F_y = -F_D \sin \alpha - F_L \cos \alpha \quad (2.6)$$

Dimana gaya angkat dan gaya hambat diperoleh dari persamaan:

$$F_L = \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 A C_L \quad (2.7)$$

$$F_D = \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 A C_D \quad (2.8)$$

Dengan:

$F_y$  = gaya kearah sumbu y (N)

$F_D$  = gaya hambat (N)

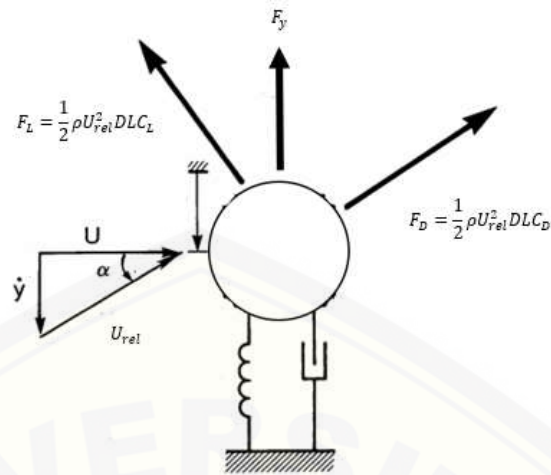
$F_L$  = gaya angkat (N)

$C_L$  = koefisien gaya angkat

$C_D$  = koefisien gaya hambat

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

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



Gambar 2.5 Arah gaya yang mempengaruhi *bluff body* (Sumber: Blevin, 2001)

Besarnya kecepatan angin relatif ( $U_{rel}$ ) dan luas area *bluff body* ( $A$ ) dapat diperoleh dari:

$$U_{rel} \cos \alpha = U \quad (2.9)$$

$$A = D \cdot L \quad (2.10)$$

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:

$$C_L = \frac{2F_L}{\rho U_{rel}^2 DL} \quad (2.11)$$

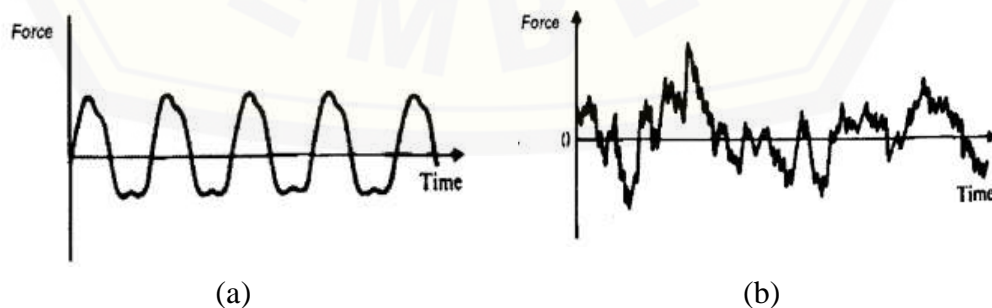
$$C_D = \frac{2F_D}{\rho U_{rel}^2 DL} \quad (2.12)$$

## 2.2 Getaran

Getaran menurut pengertian fisika adalah wujud dari proyeksi gerak melingkar dalam bidang datar yang menghasilkan gerakan bolak-balik atau osilasi pada garis diameter yang selalu melalui pusat gerak lingkaran sebelumnya. Garis bolak – balik memiliki dua kemungkinan, osilasi dalam garis horizontal yang disebut osilasi getaran longitudinal dan osilasi dalam garis horizontal yang disebut

osilasi getaran transversal. Karyasa (2011) mengklasifikasikan getaran menjadi beberapa jenis, antara lain:

- a. Getaran bebas, merupakan getaran yang terjadi pada sistem (mekanisme) tanpa adanya pengaruh gaya luar (eksitasi) yang mempengaruhi. Eksitasi hanya diberikan pada awal getaran yang membuat benda berosilasi. Contoh getaran bebas adalah gerakan pendulum.
- b. Getaran paksa, merupakan getaran yang terjadi pada sistem karena adanya rangsangan gaya luar. Contoh getaran paksa adalah fenomena VIV pada suatu struktur yang mengakibatkan struktur bergetar.
- c. Getaran tak teredam, adalah getaran yang tidak kehilangan energi selama berisolasi.
- d. Getaran teredam, adalah getaran yang memiliki tahanan, sehingga terjadi penurunan energi getaran selama osilasi.
- e. Getaran linier terjadi saat semua komponen sistem bergetar secara linier, dimana pegas, massa dan peredam berperilaku linier.
- f. Getaran non-linier, adalah getaran yang komponen sistem bergerak secara non-linier. Contoh getaran non-linier adalah getaran dampak
- g. Getaran deterministik adalah getaran yang memiliki harga eksitasi yang selalu diketahui.
- h. Getaran random (acak) adalah getaran yang memiliki harga eksitasi yang tidak dapat diperkirakan. Contoh getaran random adalah kekasaran jalan dan gempa bumi.

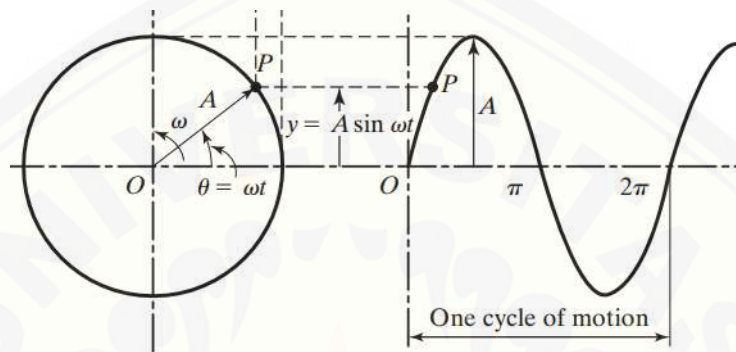


(a) Getaran Deterministik, (b) Getaran Random

Gambar 2.6 Contoh eksitasi deterministik dan random (Sumber: Karyasa, 2011)

Rao (2011) mendefinisikan beberapa istilah penting yang terdapat pada getaran, diantaranya:

- Siklus (*Cycle*) adalah perpindahan benda dari posisi awal (*equilibrium*) ke posisi puncak (*ekstreme*) salah satu arah, kemudian bergerak ke arah berlawanan dan kembali ke posisi awal.



Gambar 2.7 Ilustrasi siklus getaran (Sumber: Rao, 2011)

- Amplitudo ( $A$ ) adalah perpindahan terjauh dari benda yang bergetar seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.7.
- Periode ( $\tau$ ) adalah waktu yang diperlukan untuk melakukan satu siklus.

$$\tau = \frac{\tau_d}{n} \quad (2.13)$$

Dengan:

$n$  = jumlah siklus

$\tau_c$  = waktu (s)

- Frekuensi ( $f$ ) adalah jumlah siklus per satuan waktu. 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)

$$f = \frac{n}{\tau_d} \quad (2.14)$$



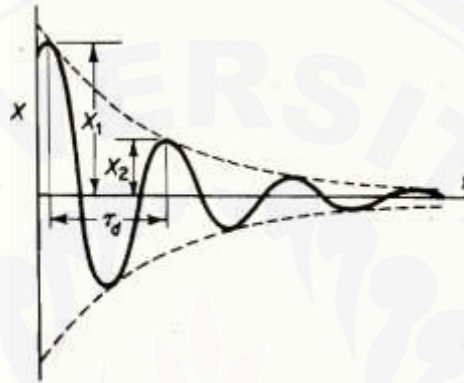
Dimana  $\tau_d$  pada saat pengukuran memiliki satuan milidetik (ms), maka:

$$f = \frac{n \cdot 1000}{\tau_d} \quad (2.15)$$

Dengan:

$n$  = jumlah siklus

$\tau_d$  = waktu (s)



Gambar 2.8 Osilasi teredam (Sumber: Thomson dan Dahleh, 2005)

e. Frekuensi natural ( $f_n$ )

Rao (2011) mendefinisikan frekuensi natural dengan “apabila suatu sistem, setelah menerima rangsangan dibiarkan bergetar tanpa diberi gaya dari luar, maka frekuensi yang terjadi disebut sebagai frekuensi natural dari sistem tersebut”.

Secara teoritis frekuensi natural dapat diperoleh dengan rumus (Thomson dan Dahleh, 2005)

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.16)$$

$$f_n = \frac{1}{\tau} \quad (2.17)$$

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.18)$$

Dengan:

$\omega_n$  = frekuensi natural (rad/s)

$f_n$  = frekuensi natural (Hz)

$k$  = kekakuan/konstanta pegas (N/m)

$m$  = massa *bluff body* (kg)

### 2.3 Kekakuan (*Stiffness*)

Kekakuan adalah kemampuan suatu sistem untuk menahan deformasi ketika mengalami beban atau kemampuan material untuk menahan deformasi. Karet lebih mudah merenggang dibandingkan dengan baja disebabkan kekakuan baja lebih besar dibandingkan karet (Leckie dan Bello, 2009). Kekakuan struktur dapat diketahui dengan hukum Hooke:



Gambar 2.9 Skema pembebanan batang kantilever (Sumber: Leckie dan Bello, 2009)

$$F = k\Delta_x \quad (2.19)$$

$$k = \frac{F}{\Delta_x} \quad (2.20)$$

Dengan:

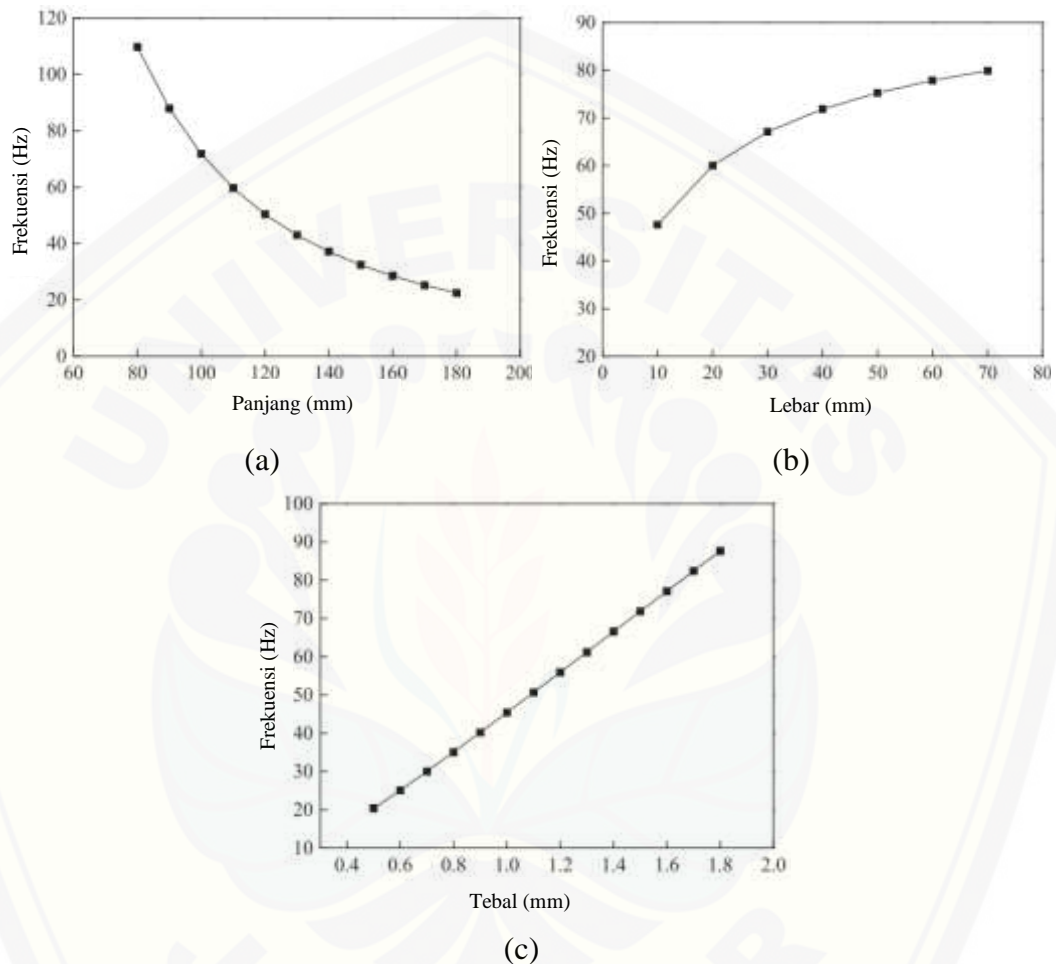
$F$  = gaya (N)

$k$  = kekakuan (N/m)

$\Delta_x$  = defleksi (m)

Nilai kekakuan dipengaruhi oleh banyak faktor, salah satunya dipengaruhi oleh dimensi dari sistem. Penelitian Zhao dkk., (2017) membuktikan bahwa dimensi batang kantilever yang memiliki bahan sama mempengaruhi frekuensi natural, dimana besarnya frekuensi natural memiliki hubungan terhadap kekakuan

dari struktur sebagaimana telah dijelaskan pada rumus 2.18. Hasil penelitian Zhao dkk. (2017) ditunjukkan pada Gambar 2.10 dimana semakin besar lebar dan ketebalan batang kantilever akan meningkatkan frekuensi natural, sedangkan panjang batang kantilever akan menurunkan besarnya frekuensi natural.



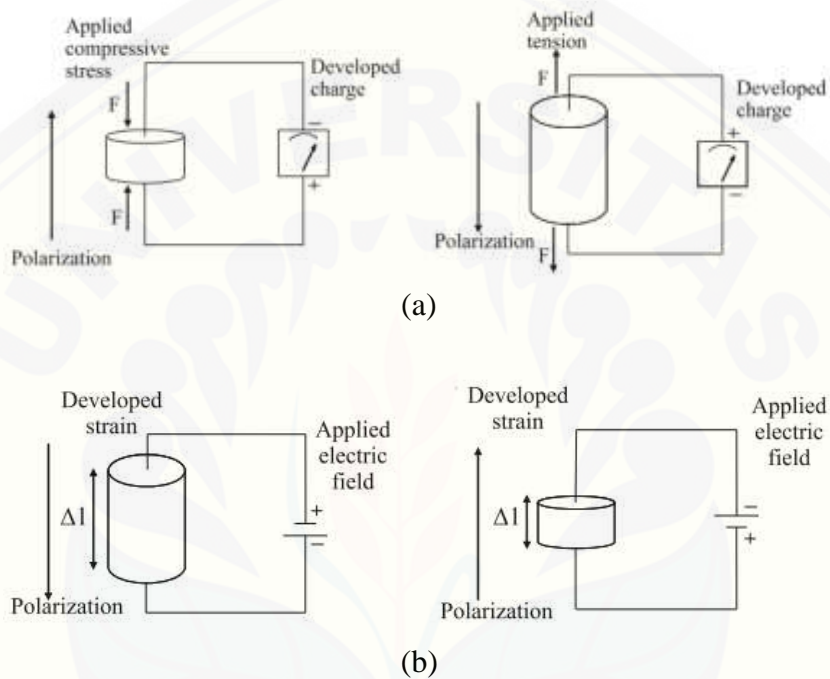
(a) Pengaruh panjang pada frekuensi natural; (b) Pengaruh lebar pada frekuensi natural; (c) Pengaruh tebal pada frekuensi natural

Gambar 2.10 Pengaruh dimensi batang kantilever terhadap frekuensi natural (Sumber: Zhao dkk., (2017))

## 2.4 Piezoelektrik

Piezoelektrik berasal dari bahasa Yunani yang terdiri dari kata “*piezo*” yang berarti tekanan, dan “*electric*” yang berarti listrik (Dineva dkk., 2014). Bahan piezoelektrik memiliki kemampuan untuk menghasilkan tegangan listrik ketika

terdeformasi (*direct effect*), dan piezoelektrik akan terdeformasi apabila diberikan tegangan listrik (*inverse effect*). *Direct effect* yang dimiliki piezoelektrik dapat dimanfaatkan dalam proses *energy harvesting*, contohnya adalah untuk memanfaatkan energi getaran. Piezoelektrik dapat menyerap energi dari struktur yang bergetar, kemudian mengubahnya menjadi energi listrik (Rafique, 2018).



(a) *Direct effect* piezoelektrik; (b) *Inverse effect* piezoelektrik

Gambar 2.11 Kemampuan piezoelektrik (Sumber: Dineva dkk., 2014)

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 terpengaruh gangguan elektromagnetik, tanpa polusi dan minim perbaikan (Zhao dkk., 2017). Tabel 2.2 menunjukkan potensi energi listrik yang dihasilkan piezoelektrik dibandingkan sumber penghasil listrik lainnya.

Tabel 2.2 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>

## 2.5 Wind Tunnel

*Wind tunnel* merupakan salah alat yang digunakan dalam penelitian aerodinamika dengan metode eksperimental (secara langsung). Fenomena yang terjadi selama tes *wind tunnel* dapat digunakan sebagai acuan respons suatu objek penelitian pada keadaan sebenarnya dilingkungan. *Wind tunnel* diklasifikasikan menjadi (Barlow dkk., 1999):

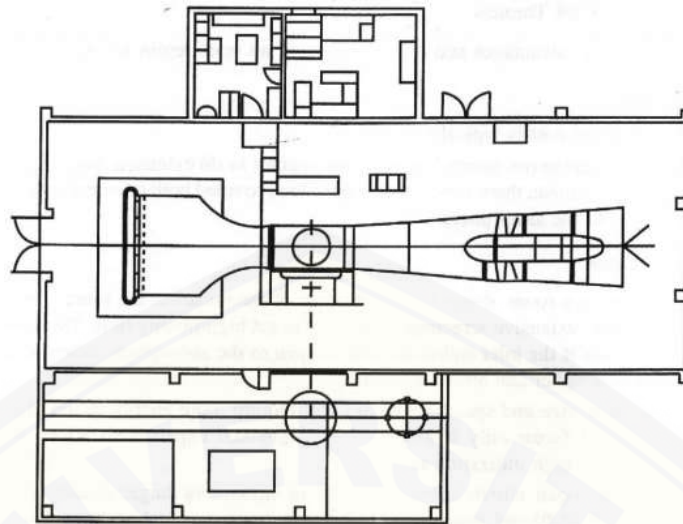
### 2.5.1 Open Circuit/Open Return Wind Tunnel

Memiliki ciri udara mengalir lurus dari sisi hisap sampai dengan sisi keluaran. Tipe ini memiliki keunggulan diantaranya:

- Biaya pembuatan yang rendah
- Apabila dalam penelitian menggunakan visualisasi dengan asap, tidak memerlukan pembersihan pada lubang isap dan keluaran, karena udara langsung keluar ke lingkungan.

Adapun kekurangan *wind tunnel* tipe ini adalah:

- Karena menggunakan udara langsung dari lingkungan, faktor cuaca sangat berpengaruh terhadap kualitas udara.
- Memerlukan energi yang lebih banyak untuk menjalankan alat pada kecepatan angin yang berbeda.
- Memiliki kebisingan yang tinggi pada *wind tunnel* yang memiliki *test section* > 70 ft<sup>2</sup> (6,5 m<sup>2</sup>) serta waktu operasi yang pendek.



Gambar 2.12 *Open circuit/open return wind tunnel* (Sumber: Barlow dkk., 1999)

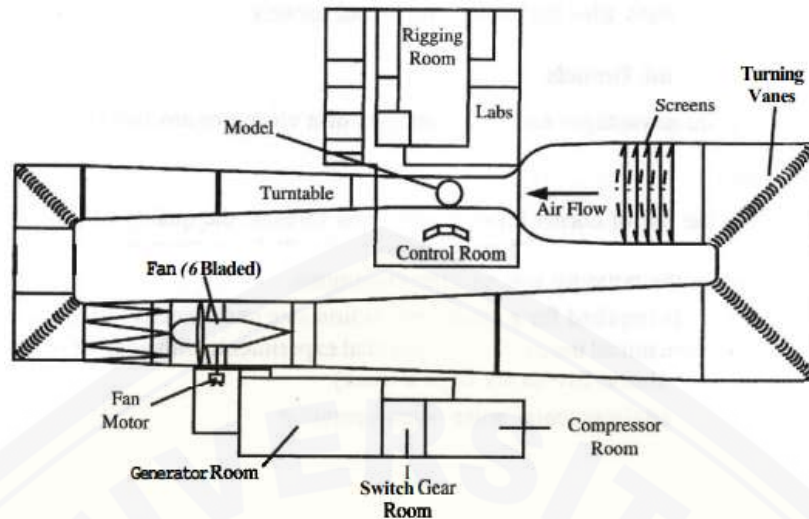
### 2.5.2 *Close Circuit/Close Return Wind Tunnel*

*Close circuit* memiliki aliran udara yang mengalir secara terus menerus (*continue*), dimana udara yang ada selama pengoperasian tidak keluar ke lingkungan. Tipe ini memiliki keunggulan diantaranya:

- a. Tidak terpengaruh cuaca dan kualitas aliran udara yang terkontrol dengan baik
- b. Penggunaan energi yang lebih rendah serta waktu operasi yang panjang, dimana dapat digunakan 5 – 6 hari dalam seminggu.
- c. Tidak bising

Kekurangan yang dimiliki tipe ini adalah:

- a. Memerlukan biaya yang lebih tinggi karena terdapat saluran dan kipas tambahan untuk mengembalikan aliran udara.
- b. Perlu adanya pembersihan pada *wind tunnel* apabila penelitian menggunakan visualisasi.
- c. Memerlukan pendingin apabila digunakan dalam waktu yang lama.



Gambar 2.13 *Close circuit/close return wind tunnel* (Sumber: Barlow dkk., 1999)

## 2.6 Hipotesis

Berdasarkan kajian pustaka di atas, dapat diambil hipotesis penelitian bahwa semakin rendah nilai kekakuan batang kantilever akan menurunkan daerah resonansi dan tegangan, karena nilai kekakuan rendah akan menurunkan frekuensi natural yang mengakibatkan *bluff body* berisolasi hanya pada kecepatan angin rendah. Variasi orientasi *bluff body* vertikal memiliki area resonansi dan tegangan yang lebih besar dibanding orientasi *bluff body* horizontal dikarenakan orientasi *bluff body* horizontal dipengaruhi oleh gaya gravitasi yang mengakibatkan ketidakseimbangan osilasi.

### BAB 3. METODE PENELITIAN

#### 3.1 Metode Penelitian

Penelitian dilakukan dengan metode eksperimen menggunakan *wind tunnel* untuk mengetahui pengaruh kekakuan batang kantilever dan orientasi *bluff body* terhadap tegangan listrik dan daerah resonansi penghasil listrik. Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Mobil Listrik untuk pengujian *wind tunnel* dan Laboratorium Perancangan Mekanik Universitas Jember untuk pengujian nilai kekakuan batang kantilever yang dimulai tanggal 11 Agustus 2018.

#### 3.2 Alat dan Bahan Penelitian

##### 3.2.1 Alat

- a. *Oscilloscope* (Propscope Parallax USB Oscilloscope)  
Digunakan untuk merekam respons tegangan listrik yang dihasilkan oleh piezoelektrik.
- b. Alat uji bending (*twist and bend testing machine* Ph)  
Digunakan untuk mengukur nilai kekakuan batang kantilever serta alat pengujian respons frekuensi natural.
- c. Timbangan Digital (UNIWEIGH 500g x 0.01g)  
Digunakan untuk mengetahui massa dari kantilever.
- d. Penggaris dan Jangka sorong (Wipro 0.02 mm)  
Digunakan untuk mengukur dimensi dan defleksi batang kantilever
- e. Anemometer (BENETECH GM816)  
Digunakan untuk mengukur kecepatan dan suhu aliran angin pada *wind tunnel*.
- f. *Wind Tunnel* (*test section* 30 x 30 cm)  
Digunakan untuk menguji respons penghasil listrik pada kecepatan angin yang berbeda.

##### 3.2.2 Bahan

- a. Styrofoam (*light foam*), digunakan untuk bahan membuat *bluff body*.
- b. Plastik *Polypropylene* (PP), digunakan sebagai batang kantilever.



- c. Piezoelektrik model MEAS LDT0-028K, digunakan untuk mengubah getaran menjadi listrik.

### 3.3 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian berikut digunakan untuk mengetahui pengaruh kekakuan batang kantilever terhadap *output* penghasil listrik, yaitu dimulai dari:

- a. Studi Literatur

Studi literatur dilakukan untuk memperoleh referensi pendukung yang sesuai dengan topik penelitian. Materi yang dipelajari meliputi: fenomena *Flow-Induced Vibrations*, getaran mekanik dan analisis struktur khususnya kekakuan batang kantilever.

- b. Eksperimen

Penelitian dilakukan dengan tahapan sebagai berikut: mengukur nilai kekakuan batang kantilever berdasarkan variasi panjang dan lebar, mengukur respons getaran bebas pada masing – masing variasi kekakuan kantilever serta pengujian *wind tunnel* untuk mengetahui pengaruh nilai kekakuan dan orientasi *bluff body* terhadap *output* tegangan dan daerah resonansi.

- c. Analisis Hasil Penelitian

Hasil data pengujian variasi kekakuan batang kantilever dan orientasi *bluff body* dianalisis untuk mengetahui pengaruh terhadap *output* tegangan dan daerah resonansi penghasil listrik.

- d. Kesimpulan

Kesimpulan diperoleh berdasarkan tujuan penelitian yang telah ditentukan sebelumnya.

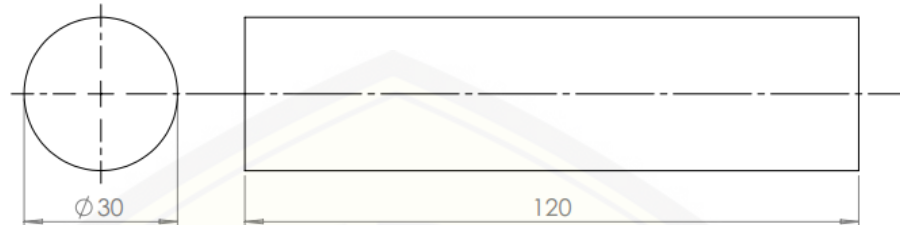
### 3.4 Pelaksanaan Penelitian

#### 3.4.1 Variabel Penelitian

Data yang digunakan dalam penelitian merupakan data yang diperoleh dari hasil penelitian, yang meliputi variabel kontrol, variabel terikat dan variabel bebas.

## a. Variabel Kontrol

- 1) Massa pemberat = 5,00 gram
- 2) Dimensi *bluff body* = diameter 30 mm dan panjang 120 mm

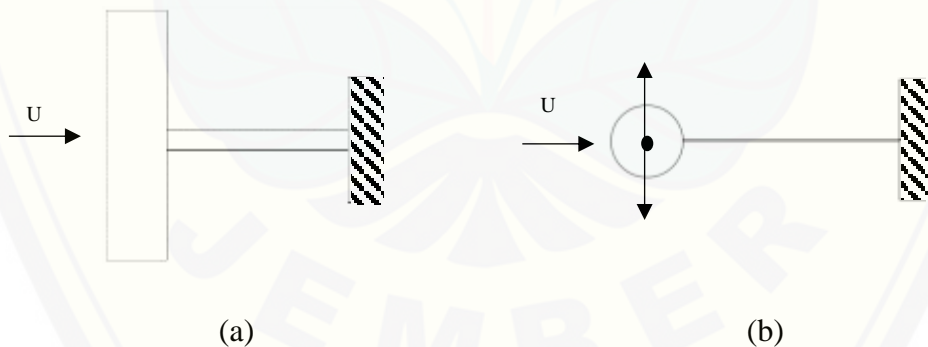
Gambar 3.1 Dimensi *bluff body*

## b. Variabel Terikat

- 1) Voltase (V)
- 2) Area resonansi

## c. Variabel Bebas

- 1) Variasi orientasi *bluff body*

(a) *Bluff body* vertikal; (b) *Bluff body* horizontalGambar 3.2 Variasi orientasi *bluff body*

- 2) Variasi panjang dan lebar batang kantilever

Variasi panjang dan lebar bertujuan untuk memvariasikan kekakuan dari batang kantilever

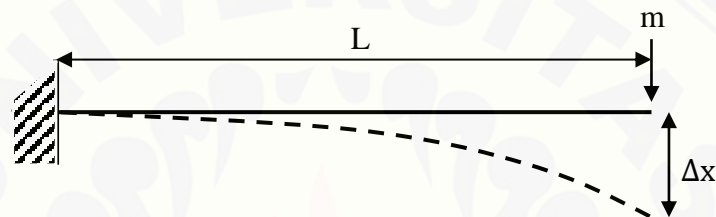
Tabel 3.1 Variasi panjang dan lebar batang kantilever

Lebar, $b$ (mm)	Panjang, $l$ (mm)
10	60
20	80
30	100
40	120

### 3.4.2 Pengambilan Data

#### a. Pengujian Kekakuan Batang Kantilever

Pengujian nilai kekakuan batang kantilever diperoleh dengan Hukum Hooke,



Gambar 3.3 Pengambilan data kekakuan batang kantilever

#### b. Pengukuran Respons Getaran Bebas

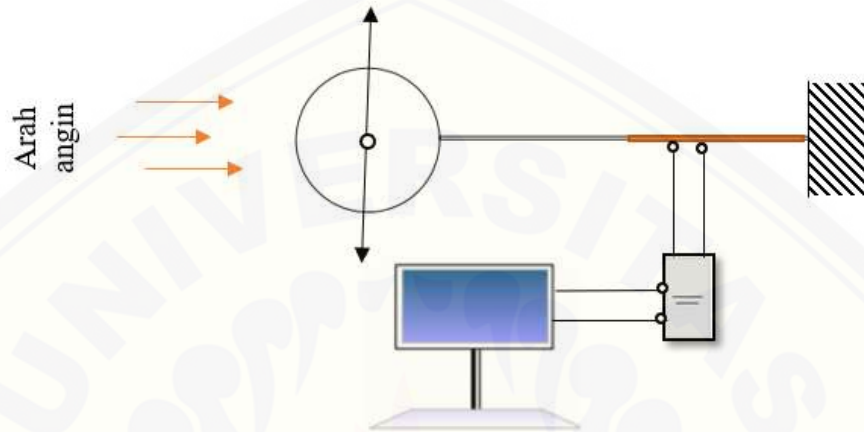
Pengukuran respons getaran bebas dilakukan untuk mengetahui nilai frekuensi natural pada variasi kekakuan batang kantilever dan orientasi *bluff body* secara aktual.



Gambar 3.4 Respon getaran bebas batang kantilever

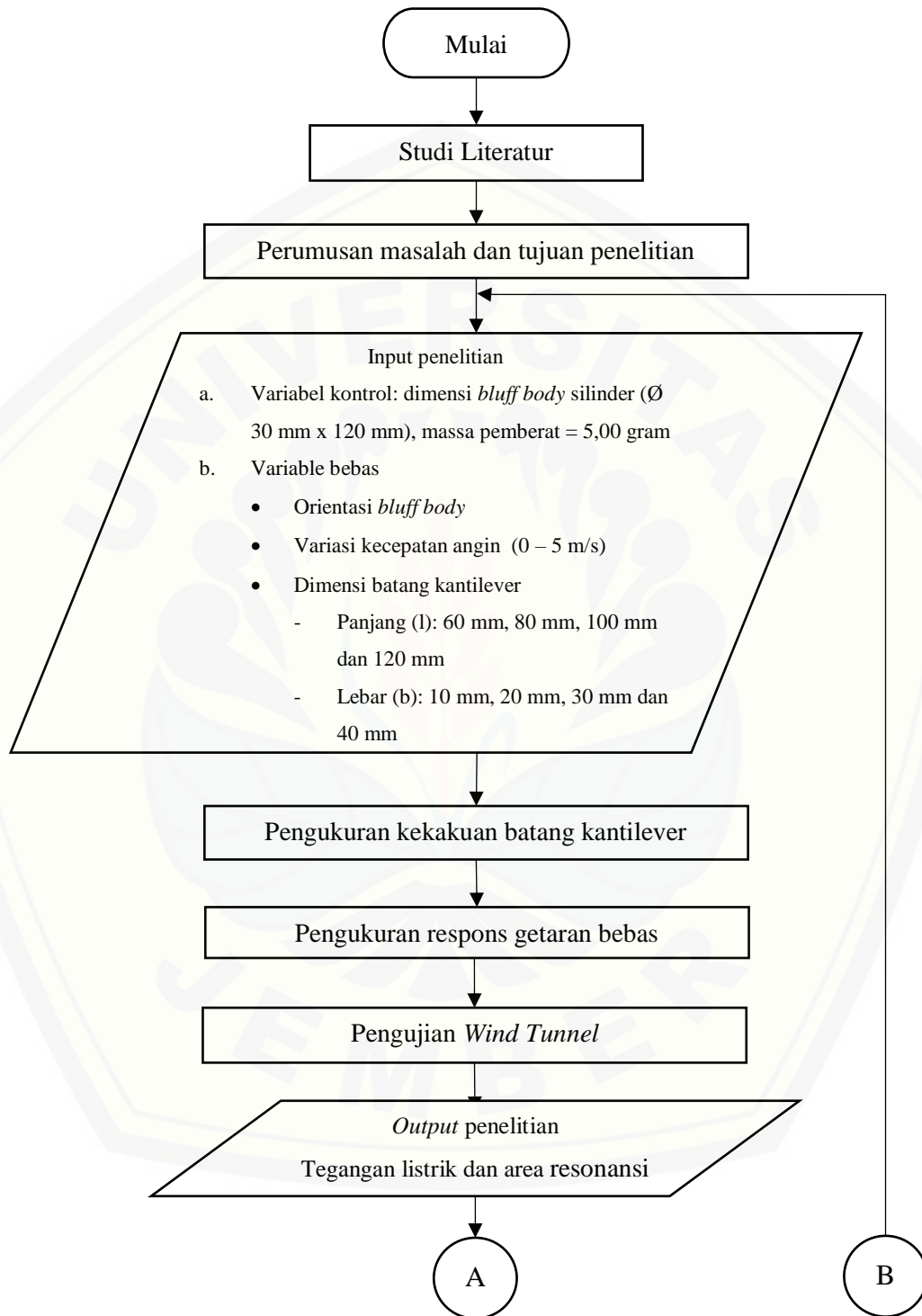
c. Pengujian *Wind Tunnel*

Pengujian *wind tunnel* dilakukan untuk mengetahui besarnya output tegangan dan area resonansi pada variasi kekakuan dan orientasi *bluff body*.

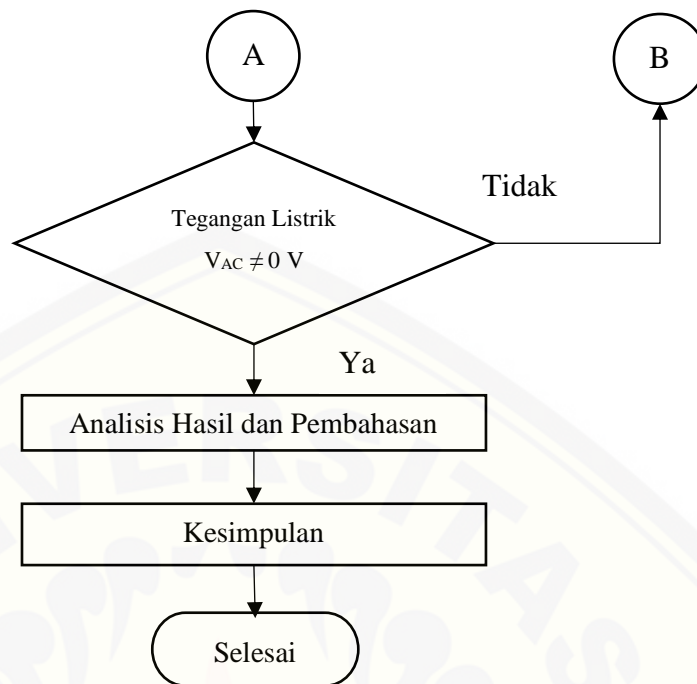


Gambar 3.5 Skema pengujian *wind tunnel*

### 3.5 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.6 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.6 Diagram Alir Penelitian (lanjutan)

## BAB 5. PENUTUP

### 5.1 Kesimpulan

Kesimpulan penelitian pengaruh kekakuan (*stiffness*) kantilever dan orientasi *bluff body* terhadap tegangan listrik pada *vortex-induced vibration* tenaga bayu adalah:

1. Dimensi batang kantilever berpengaruh terhadap nilai kekakuan batang kantilever. Pertambahan panjang 60 mm menjadi 120 mm akan mengurangi nilai kekakuan kantilever dari 1,045 N/m menjadi 11,395 N/m pada dimensi kantilever lebar 40 mm. Pertambahan lebar 10 mm menjadi 40 akan menambah nilai kekakuan kantilever sebesar 2,970 N/m menjadi 11,395 N/m pada dimensi kantilever panjang 60 mm. Nilai kekakuan tertinggi diperoleh dengan variasi panjang 60 mm dan lebar 40 mm yaitu 11,395 N/m.
2. Peningkatan kekakuan batang kantilever mengakibatkan peningkatan output tegangan listrik dan perluasan area resonansi. Tegangan listrik paling optimum sebesar 0,207 V diperoleh pada batang kantilever panjang 80 mm lebar 40 mm. Area resonansi optimum diperoleh pada batang kantilever panjang 60 mm lebar 40 mm yang dapat bekerja pada rentang  $U = 1 - 5,2$  m/s.
3. Orientasi *bluff body* vertikal lebih baik dalam menghasilkan tegangan listrik dan memiliki area resonansi yang lebih luas. *Bluff body* horizontal memiliki kekurangan akibat pengaruh gaya berat yang mengakibatkan pergerakan osilasi yang tidak setimbang.

### 5.2 Saran

Penelitian yang telah dilakukan memiliki beberapa faktor yang perlu untuk ditingkatkan seperti perhitungan daya yang dapat dihasilkan mekanisme, penggunaan motor yang dapat diatur dan ditahan kecepatannya agar angin yang dihasilkan memiliki kecepatan yang konstan serta visualisasi aliran fluida yang melewati *bluff body* agar dapat mengamati *vortex shedding* yang terbentuk.

**DAFTAR PUSTAKA**

- Akaydin, H. D., N. Elvin dan Y. Andreopoulos. 2012. The Performance of a Self-excited Fluidic Energy Harvester. *Smart Material and Structures*. 12 (025007): 1-13
- Assi, G. R. S. 2009. Mechanism for Flow-Induced Vibration of Interfering Bluff Bodies. *Tesis*. London: Degree of Doctor of Philosophy. University of London.
- Barlow, J. B., W. H. Rae, Jr., A. Pope. 1999. Low-Speed wind tunnel testing. 3<sup>rd</sup> Ed. Canada: A Wiley-Interscience Publication John Wiley & Sons, Inc.
- Blevin, D. R. 2001. *Flow-Induced Vibration*. 2<sup>nd</sup> ed. Malabar: Krieger Publishing Company.
- Cengel, Y. A. dan J. M. Cimbala. 2004. *Fluid Mechanics: Fundamental and Applications*. New York: The McGraw-Hill Companies, Inc.
- Colette, M. I. R. 2014. Prediction Method of Vortex Induced Vibration of a One Degree-of-Freedom Spring-Mass System. *Tesis*. Kingstone: Degree of Master Science in Ocean Engineering. University of Rhode Island.
- Correa, R., E. Cremer, W. Sweeney dan S. Thomson. 2014. Wind Harvesting via Vortex Induced Vibration. *Skripsi*. Worcester: Degree of Bachelor of Science. WPI
- Dai, H. L., A. Abdelkefi, Y. Yang dan L. Wang. 2016. Orientation of Bluff Body for Designing Efficient Energy Harvesters from Vortex-induced Vibrations. *Applied Physics Letters*. 108 (053902): 1 – 5.
- Demirel, Y. 2012. *Energy, Green Energy and Technology*. London: Springer-Verlag.
- Dewan Energi Nasional. 2014. *Outlook Energi Indonesia 2014*. Jakarta: Kementerian ESDM.
- Dineva, P., D. Gross, R. Muller, T. Rangelov. 2014. *Dynamic Fracture of Piezoelectric Materials, Solid Mechanics and Its Applications*. Chapter 2. Switzerland: Springer International Publishing Switzerland.
- Eid, M. H. 2004. Vortex Shedding from Single and Tandem Finned Cylinders. *Tesis*. Hamilton: Degree Master of Applied Science. McMaster University.



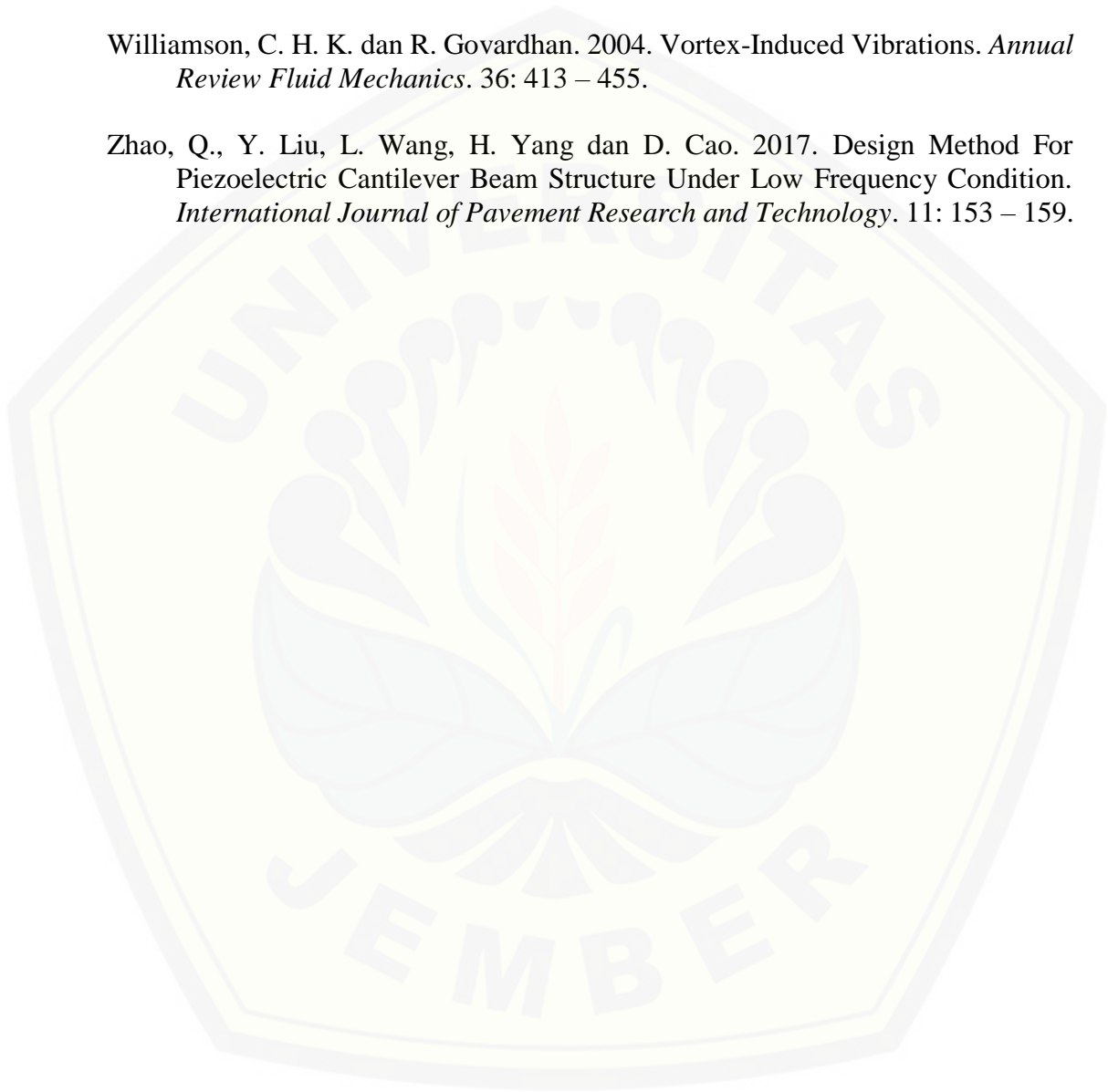
- El-Mageed, M. G. A, M. Arafa, M. Elaraby. 2014. Simulation and Experimental Investigation of an Energy Harvester Utilizing Flow-induced Vibration. *Proceedings of the ASME 2014 Internasional Design Engineering Technical Conference & Computers and Information in Engineering Conference*. 17-20 Agustus 2014. *DETC20014*: 34596
- Jain, B. A. 2012. Vortex-Induced Vibration of an Inclined Cylinder in Flow. *Tesis*. Mumbai: Degree of Master of Science. University of Massachusetts Amherst.
- Jatisukanto, G. 2007. *Statika Struktur*. Jember: Departemen Pendidikan Nasional Lembaga Pembinaan dan Pengembangan Pendidikan Universitas Jember.
- Karyasa, T. B. 2011. *Dasar – dasar Getaran Mekanik*. Yogyakarta: Penerbit ANDI.
- Kementerian ESDM. 2015. *Rencana Strategis Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral*. Jakarta: Kementerian ESDM.
- Kementerian ESDM. 2016. Program Strategis EBTKE dan Ketenagalistrikan. *Jurnal Energi*. 2: 9 – 29.
- Leckie, F. A. dan D. J. D. Bello. 2009. *Strength and Stiffness of Engineering Systems*. New York: Springer Science+Business Media, LLC.
- Lienhard, J. H. 1966. *Synopsis of Lift, Drag, and Vortex Frequency Data for Rigid Circular Cylinders*. Pullman: Technical Extension Service.
- Munson, B. R., D. F. Young, T. H. Okiishi dan W. W. Huebsch. 2009. *Fundamental of Fluid Mechanics*. 6th Ed. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Pusat Data dan Teknologi Informasi ESDM. 2016. *Manajemen Rantai Penyediaan dan Pemanfaatan Energi Nasional*. Jakarta: Pusat Data dan Teknologi Informasi Energi dan Sumber Daya Mineral.
- Rafique, S. 2018. *Piezoelectric Vibration Energy Harvesting Modeling & Experiments*. Switzerland: Springer International Publishing AG.
- Rao, S. S. 2011. *Mechanical Vibrations*. 5th Ed. Upper Saddle River: Pearson Education, Inc.
- Resvanis, T. L., V. Jhingran, J. K. Vandiver, S. Liapis. 2012. Reynold Number Effects on The Vortex-Induced Vibration of Flexible Marine Riser. *Proceeding of The ASME 2012 31<sup>st</sup> International Conference on Ocean, Offshore, and Arctic Engineering*. 31: 1 – 10.

TAP Plastics. 2018. Polypropylene Data Sheet. [https://www.tapplastics.com/uploads/pdf/Polypropylene\\_Data.pdf](https://www.tapplastics.com/uploads/pdf/Polypropylene_Data.pdf). [Diakses pada 22 Maret 2018]

Thomson, W. T., M. D. Dahleh. 2005. *Theory and Vibration with Applications*. 5th Ed. Beijing: Pearson Education Asia Limited and Tsinghua University Press.

Williamson, C. H. K. dan R. Govardhan. 2004. Vortex-Induced Vibrations. *Annual Review Fluid Mechanics*. 36: 413 – 455.

Zhao, Q., Y. Liu, L. Wang, H. Yang dan D. Cao. 2017. Design Method For Piezoelectric Cantilever Beam Structure Under Low Frequency Condition. *International Journal of Pavement Research and Technology*. 11: 153 – 159.



## LAMPIRAN

### Lampiran 6.1 Data spesifikasi Proscope Parallax USB Oscilloscope



#### **PropScope Specifications**

- 2 input channels
- 25 Msps maximum sample rate
- 20 Vpp maximum input range (-10 V to +10 V when DC-coupled)
- 10-bit input resolution over either the entire 20 Vpp range, or selectable 10, 2, and 1 Vpp ranges.
- 1x/10x selectable probes for 200 Vpp maximum input range (-100 V to +100 V when DC-coupled)

#### **PropScope DAC card specifications**

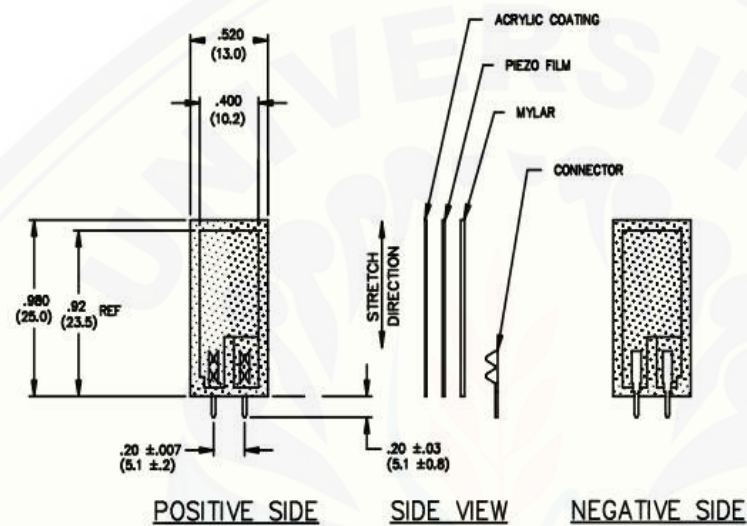
- 8-bit 25 Msps DAC, up to 25Msps with -1.5 to 1.5 and 0 to 5 volt ranges
- External trigger input configurable from -10 to 10 volts
- Four-bit logic analyzer, up to 25 Msps
- Four-bit NTSC/PAL output

Sumber: *Getting Started with the PropScope Parallax USB Oscilloscope v1.1*

## Lampiran 6.2 Data spesifikasi Piezoelektrik LDT0-028K



## 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 6.3 Data pengaruh kekakuan terhadap frekuensi natural

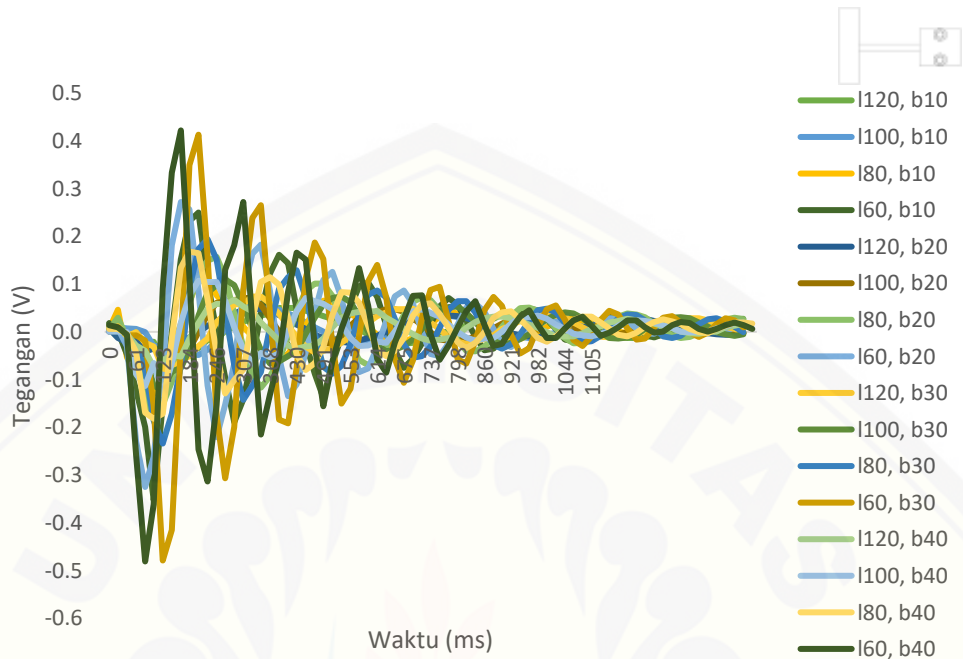
Tabel 6.1 Frekuensi natural frekuensi *bluff body* horizontal

Lebar (mm)	Panjang (mm)	$f_n$ (Hz)
10	60	4,878
	80	3,484
	100	2,717
	120	2,187
20	60	5,629
	80	4,190
	100	3,257
	120	2,573
30	60	6,969
	80	5,051
	100	3,958
	120	3,055
40	60	6,977
	80	5,435
	100	4,073
	120	3,122

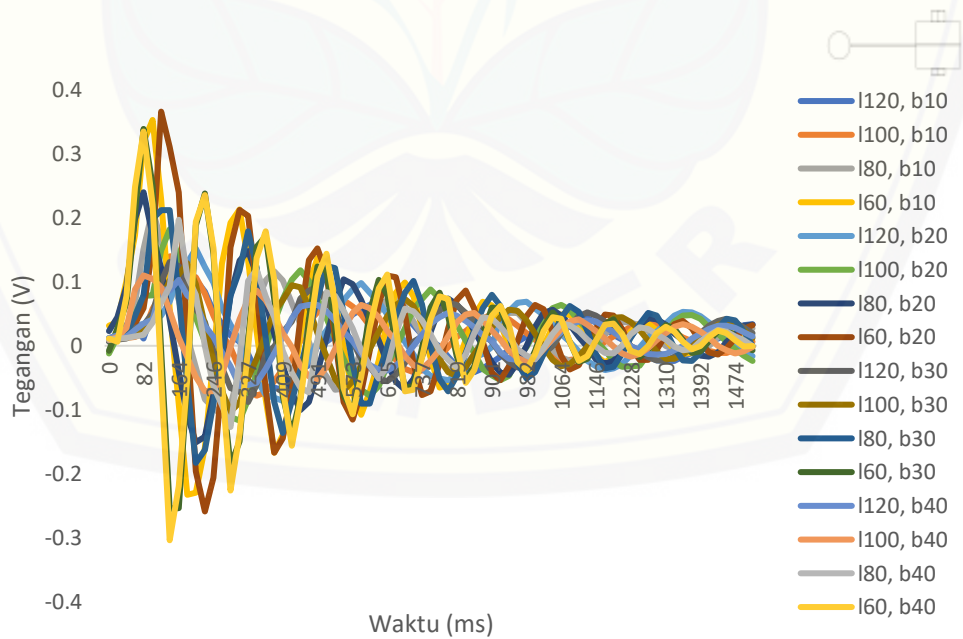
Tabel 6.2 Frekuensi natural frekuensi *bluff body* vertikal

Lebar (mm)	Panjang (mm)	$f_n$ (Hz)
10	60	5,236
	80	3,576
	100	2,486
	120	1,904
20	60	6,098
	80	4,310
	100	3,119
	120	2,364
30	60	6,993
	80	5,236
	100	3,861
	120	3,055
40	60	7,335
	80	5,639
	100	3,958
	120	3,333

Lampiran 6.4 Grafik Respons Getaran Bebas Pada Orientasi *Bluff Body*

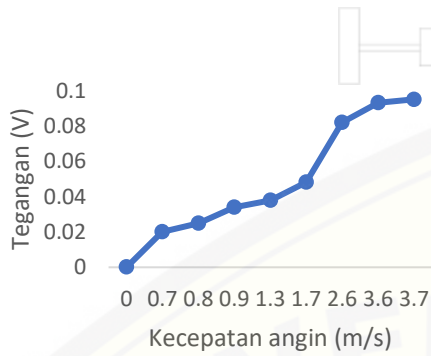


Grafik frekuensi natural *bluff body* vertikal

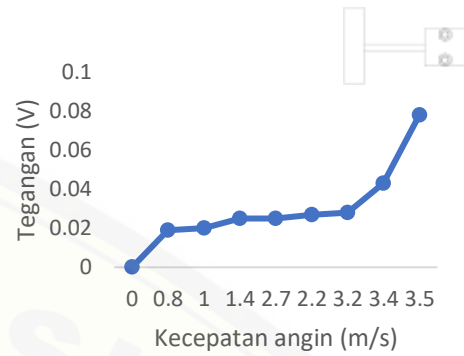


Grafik frekuensi natural *bluff body* horizontal

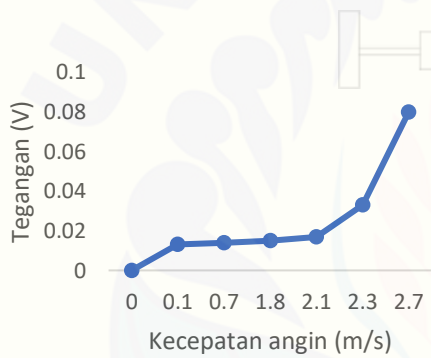
**Lampiran 6.5 Grafik Hasil Pengujian Wind Tunnel Bluff Body Vertikal**



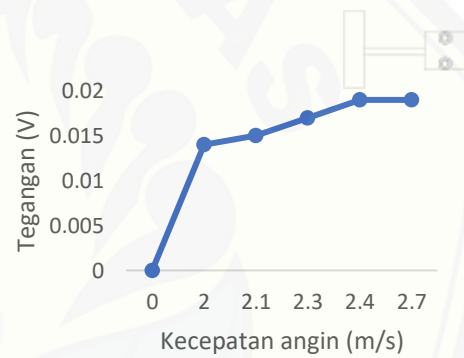
Grafik Panjang 60 mm, Lebar 10 mm



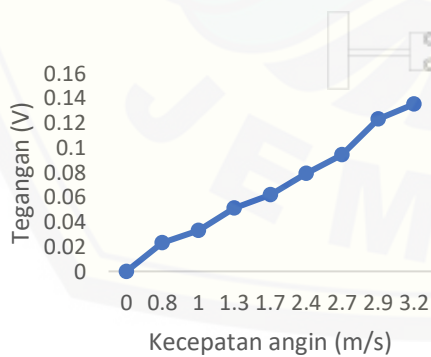
Grafik Panjang 80 mm, Lebar 10 mm



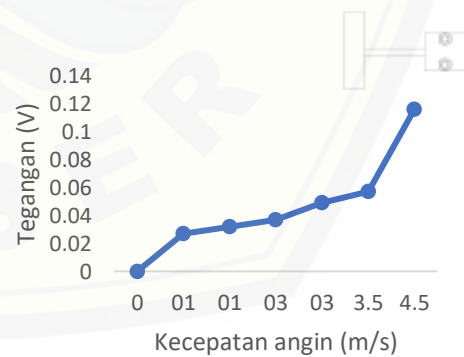
Grafik Panjang 100 mm, Lebar 10 mm



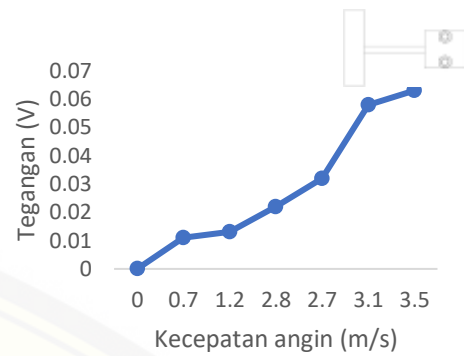
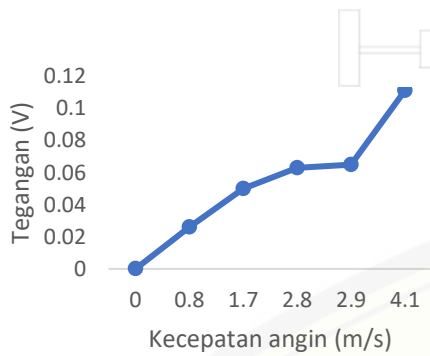
Grafik Panjang 120 mm, Lebar 10 mm



Grafik Panjang 60 mm, Lebar 20 mm

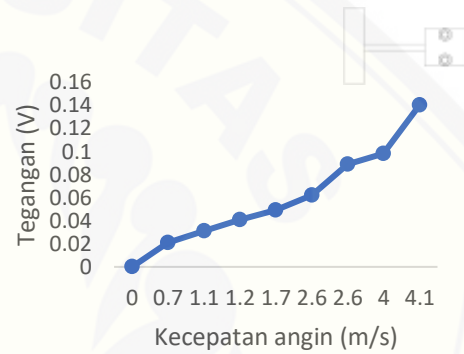
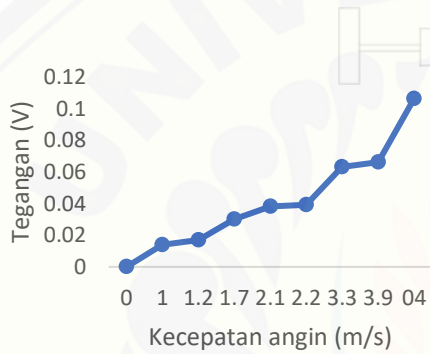


Grafik Panjang 80 mm, Lebar 20 mm



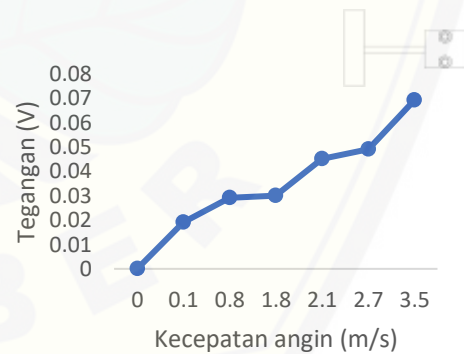
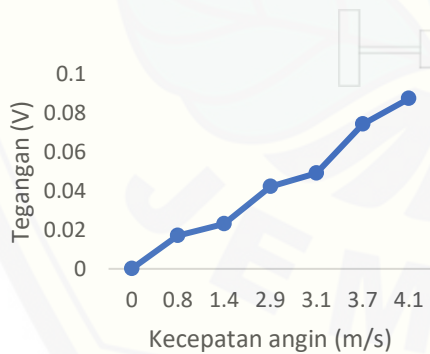
Grafik Panjang 100 mm, Lebar 20 mm

Grafik Panjang 120 mm, Lebar 20 mm



Grafik Panjang 60 mm, Lebar 30 mm

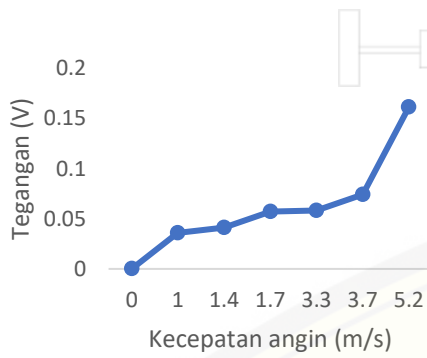
Grafik Panjang 80 mm, Lebar 20 mm



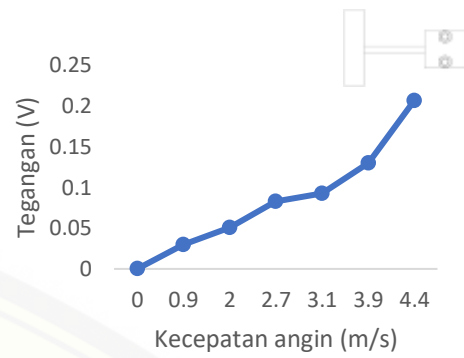
Grafik Panjang 100 mm, Lebar 30 mm

Grafik Panjang 120 mm, Lebar 30 mm

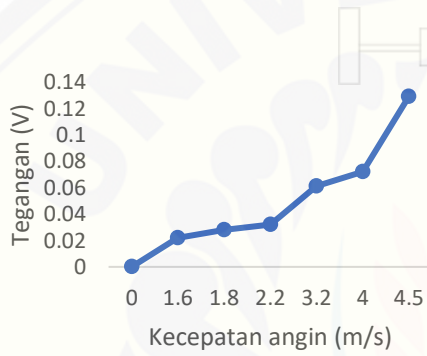




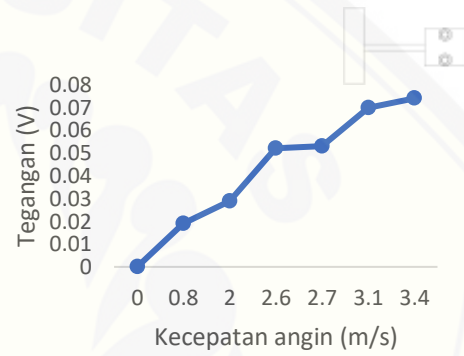
Grafik Panjang 60 mm, Lebar 40 mm



Grafik Panjang 80 mm, Lebar 40 mm

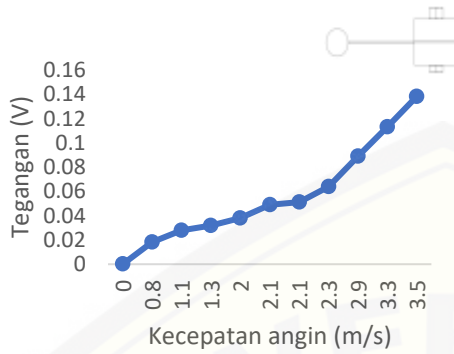


Grafik Panjang 100 mm, Lebar 40 mm

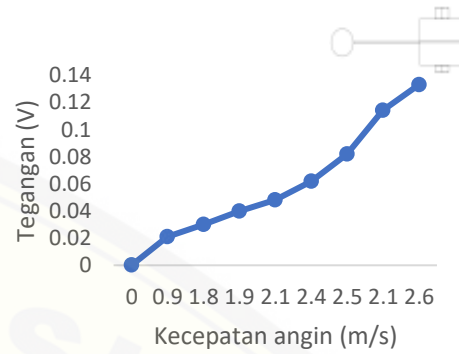


Grafik Panjang 120 mm, Lebar 40 mm

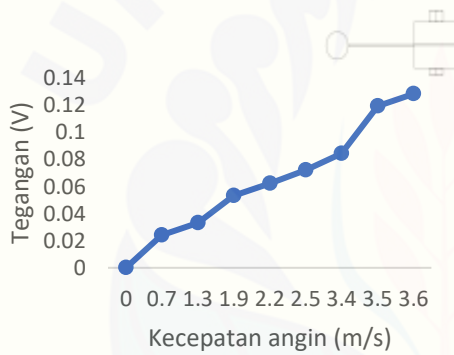
**Lampiran 6.6 Grafik Hasil Pengujian Wind Tunnel Bluff Body Horizontal**



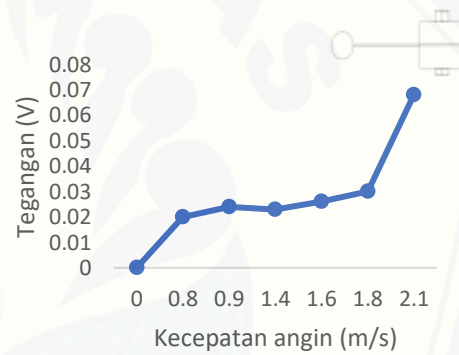
Grafik Panjang 60 mm, Lebar 10 mm



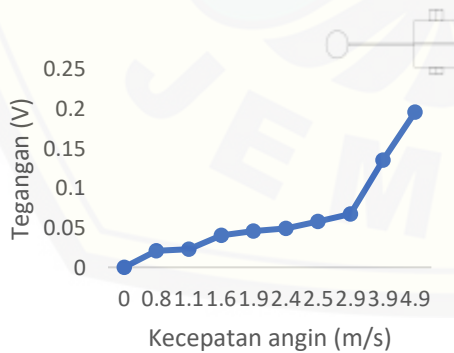
Grafik Panjang 80 mm, Lebar 10 mm



Grafik Panjang 100 mm, Lebar 10 mm



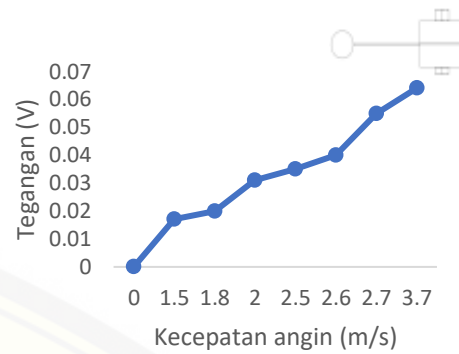
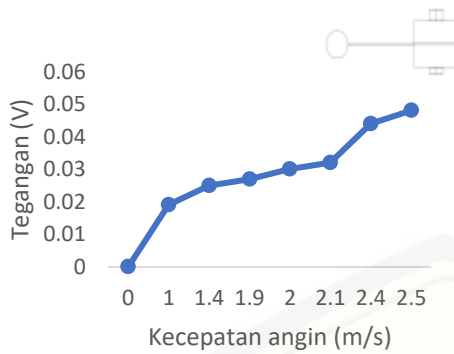
Grafik Panjang 120 mm, Lebar 10 mm



Grafik Panjang 60 mm, Lebar 20 mm

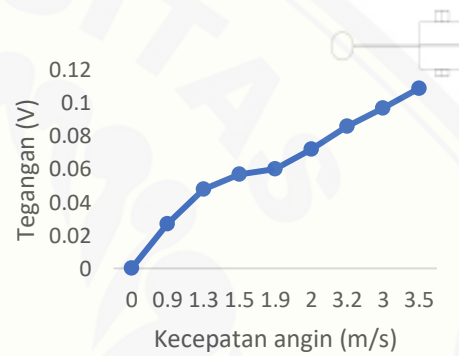
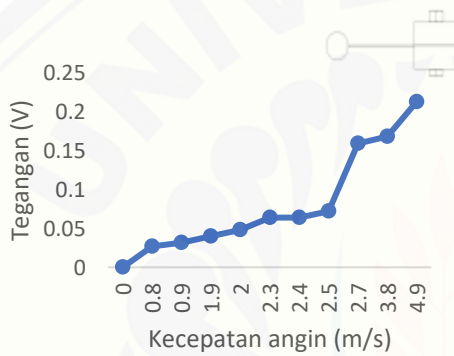


Grafik Panjang 80 mm, Lebar 20 mm



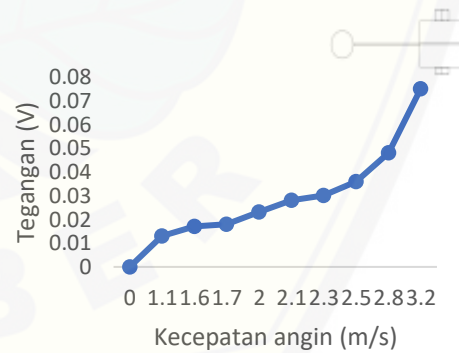
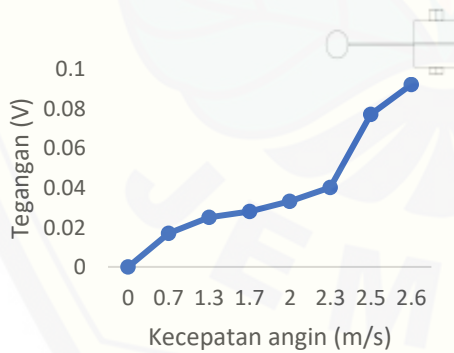
Grafik Panjang 100 mm, Lebar 20 mm

Grafik Panjang 120 mm, Lebar 20 mm



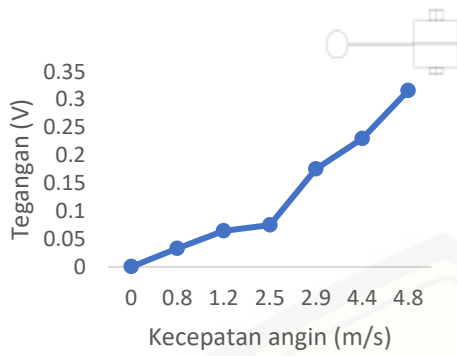
Grafik Panjang 60 mm, Lebar 30 mm

Grafik Panjang 80 mm, Lebar 20 mm

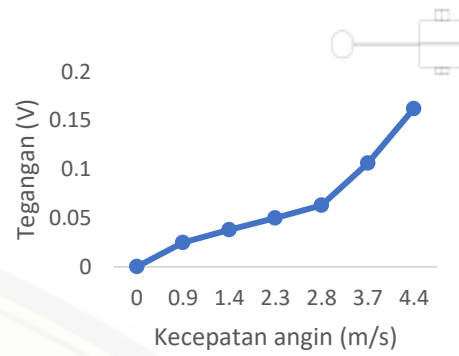


Grafik Panjang 100 mm, Lebar 30 mm

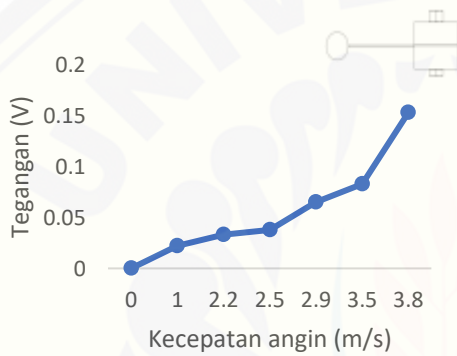
Grafik Panjang 120 mm, Lebar 30 mm



Grafik Panjang 60 mm, Lebar 40 mm



Grafik Panjang 80 mm, Lebar 40 mm



Grafik Panjang 100 mm, Lebar 40 mm



Grafik Panjang 120 mm, Lebar 40 mm

**Lampiran 6.7 Properti fisika dari udara pada tekanan atmosfer standar (satuan SI)<sup>a</sup>**

Temperatur (°C)	Densitas, $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Berat Jenis <sup>b</sup> , $\gamma$ (N/m <sup>3</sup> )	Viskositas Dinamik, $\mu$ (N . s/m <sup>2</sup> )	Viskositas Kinematik, $\nu$ (m <sup>2</sup> /s)	Rasio panas spesifik, $k$ (-)	Kecepatan suara, (m/s)
0	1,292	12,67	1,71 E – 5	1,32 E – 5	1,401	331,4
5	1,269	12,45	1,73 E – 5	1,36 E – 5	1,401	334,4
10	1,247	12,23	1,76 E – 5	1,41 E – 5	1,401	337,4
15	1,225	12,01	1,80 E – 6	1,47 E – 5	1,401	340,4
20	1,204	11,81	1,82 E – 5	1,51 E – 5	1,401	343,3
25	1,184	11,61	1,85 E – 5	1,56 E – 5	1,401	346,3
30	1,165	11,43	1,86 E – 5	1,60 E – 5	1,400	349,1

<sup>a</sup>Berdasarkan data R. D. Blevin, Applied Fluid Dynamics Handbook, Van Nostrand Reinhold Co., Inc., New York, 1984.

<sup>b</sup>Massa jenis diperoleh berdasarkan persamaan  $\gamma = \rho g$ , dimana pada tabel berikut  $g = 9,807 \text{ m/s}^2$

Sumber: Munson, B. R., D. F. Young, T. H. Okiishi dan W. W. Huebsch. 2009. *Fundamental of Fluid Mechanics*. 6th Ed. New York: John Wiley & Sons, Inc.

## Lampiran 6.8 Properti dasar polypropylene

ASTM or UL test	Property	Homopolymer	Co-Polymer	Flame Retardant
<b>PHYSICAL</b>				
D792	Density (lb/in <sup>3</sup> )	0.033	0.033	0.035
	(g/cm <sup>3</sup> )	0.905	0.897	0.988
D570	Water Absorption, 24 hrs (%)	<0.01	0.01	0.02
<b>MECHANICAL</b>				
D638	Tensile Strength (psi)	4,800	4,800	4,300
D638	Tensile Modulus (psi)	195,000	-	-
D638	Tensile Elongation at Yield (%)	12	23	28
D790	Flexural Strength (psi)	7,000	5,400	-
D790	Flexural Modulus (psi)	180,000	160,000	145,000
D695	Compressive Strength (psi)	7,000	6,000	-
D695	Compressive Modulus (psi)	-	-	-
D785	Hardness, Rockwell R	92	80	-
D256	IZOD Notched Impact (ft-lb/in)	1.9	7.5	0.65
<b>THERMAL</b>				
D696	Coefficient of Linear Thermal Expansion (x 10 <sup>-5</sup> in./in./°F)	6.2	6.6	-
	Heat Deflection Temp (°F / °C)			
D648	at 66 psi	210/99	173/78	106/41
	at 264 psi	125/52	110/43	57/14
D3418	Melting Temperature (°F / °C)	327/ 164	327/164	327/164
	Max Operating Temp (°F / °C)	180/82	170/77	180/82
	Thermal Conductivity			
C177	(BTU-in/ft <sup>2</sup> -hr-°F)	0.76-0.81	-	-
	(x 10 <sup>-4</sup> cal/cm-sec-°C)	2.6-28	-	-
UL94	Flammability Rating	HB	n.r.	V-O
<b>ELECTRICAL</b>				
D149	Dielectric Strength (V/mil) short time, 1/8"	500-660	475	500-650
D150	Dielectric Constant at 1 kHz	2.25	2.2-2.36	2.3
D150	Dissipation Factor at 1 kHz	0.0005-0.0018	0.0017	-
D257	Volume Resistivity (ohm-cm) at 50% RH	8.5 x 10 <sup>14</sup>	2 x 10 <sup>1b</sup>	10 <sup>1b</sup>
D495	Arc Resistance (sec)	160	100	-

NOTE: The information contained herein are typical values intended for reference and comparison purposes only. They should NOT be used as a basis for design specifications or quality control. Contact us for manufacturers' complete material property datasheets.  
All values at 73°F (23°C) unless otherwise noted.

Sumber: TAP Plastics. 2018. Polypropylene Data Sheet.

[https://www.tapplastics.com/uploads/pdf/Polypropylene\\_Data.pdf](https://www.tapplastics.com/uploads/pdf/Polypropylene_Data.pdf). [diakses pada 22 Maret 2018]

Lampiran 6.9 Alat dan bahan penelitian



(a)



(b)



(c)

(a) Styrofoam; (b) Piezoelektrik; (c) Plastik PP

Gambar bahan penelitian



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

(a) Blower; (b) Anemometer; (c) Timbangan Digital; (d) Terowongan Angin;  
(d) Jangka Sorong; (e) *twist and bending machine*

Gambar alat penelitian



Lampiran 6.10 Proses pelaksanaan penelitian



Gambar proses penimbangan



Gambar proses pemotongan styrofoam



Gambar instalasi pengujian *wind tunnel*



Gambar instalasi pengujian getaran bebas



Gambar instalasi *bluff body* vertikal



Gambar instalasi *bluff body* horizontal

