



**ANALISIS PENGARUH JARI-JARI SUDUT *BLUFF BODY*
TERHADAP GETARAN KANTILEVER PADA SISTEM
*VORTEX INDUCED VIBRATION***

SKRIPSI

Oleh

Achmad Murdiono

NIM. 151910101005

PROGRAM STUDI STRATA 1

JURUSAN TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS JEMBER

2019



**ANALISIS PENGARUH JARI-JARI SUDUT *BLUFF BODY*
TERHADAP GETARAN KANTILEVER PADA SISTEM
*VORTEX INDUCED VIBRATION***

SKRIPSI

Guna melengkapi skripsi dan untuk memenuhi syarat menyelesaikan Program Studi Strata 1 Teknik Mesin dan mendapatkan gelar sarjana.

Oleh

Achmad Murdiono

NIM. 151910101005

**PROGRAM STUDI STRATA 1
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS JEMBER
2019**

PERSEMBAHAN

Dengan sepenuh hati saya persembahkan skripsi ini kepada :

1. Allah SWT yang selalu mengasihi dan menyayangi dalam keadaan apapun.
2. Kedua orang tua tercinta, Ibu Anis Rahayu dan Bapak H. Lulut, serta adikku tersayang Dimas Adi Nugroho, Avina Azka Mazaya yang menjadi dorongan moral, spiritual, materil, serta kasih sayang, pengorbanan, kesabaran dan doa yang selalu menyertai dalam perjalanan menyelesaikan gelar S1.
3. Semua Guru dan Dosen yang telah membimbing dan memberikan semua ilmunya. Terimakasih atas ilmu dan pengalaman yang sangat berharga selama ini.
4. Bapak Mochamad Edoward Ramadhan S.T., M.T selaku pembimbing utama dan Bapak Dr. Robertoes Koekoeh Koentjoro W. S.T., M.Eng selaku dosen pembimbing anggota yang telah sabar membimbing dan mengoreksi kesalahan kesalahan dalam menyelesaikan skripsi.
5. Almamater Teknik Mesin Universitas Jember tercinta.

MOTTO

“Segera kerjakan, pastikan kerjakan dengan benar, dan kerjakan hingga tuntas”
(Shigenobu Nagamori)

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

“Jika jiwamu lemah masalah akan menjadi penghalang,
Jika jiwamu seimbang masalah akan menjadi tantangan,
Jika jiwamu kuat masalah akan menjadi peluang”
(Rival)

“Hidup adalah seberapa sungguh sungguh kamu bercerita”
(Lentera Bumi Nusantara)

“Hidup adalah seni menggambar tanpa penghapus.”
(John W. Gardner)

“Analisis adalah titik awal kritis untuk pemikiran strategis”
(Kenichi Ohmae)

“Orang yang kuat bukanlah orang yang pandai berkelahi, tetapi orang
yang mampu menguasai dirinya ketika marah”

PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Achmad Murdiono

NIM : 151910101005

Menyatakan dengan sungguh sungguh bahwa Skripsi yang berjudul “Analisis Pengaruh Jari-Jari Sudut *Bluff Body* Terhadap Getaran Kantilever Pada Sistem *Vortex Induced Vibration*” adalah 100% hasil karya sendiri, kecuali kutipan yang sudah disebutkan sumbernya, belum pernah diajukan di institusi manapun, dan bukan hasil jiplakan. Saya bertanggung jawab penuh atas keabsahan dan kebenaran skripsi yang saya tulis.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenar benarnya, tanpa adanya tekanan dan paksaan dari pihak manapun serta bersedia menerima sanksi akademik jika dikemudian hari ternyata pernyataan ini terbukti tidak benar.

Jember, 27 Juni 2019
Yang Menyatakan,

Achmad Murdiono
NIM. 151910101005

SKRIPSI

ANALISIS PENGARUH JARI-JARI SUDUT *BLUFF BODY* TERHADAP GETARAN KANTILEVER PADA SISTEM *VORTEX INDUCED VIBRATION*

Oleh

Achmad Murdiono

NIM. 151910101005

Pembimbing

Dosen Pembimbing Utama : Mochamad Edoward Ramadhan S.T., M.T
Dosen Pembimbing Anggota : Dr. Robertoes Koekoeh Koentjoro W. S.T.,
M.Eng

PENGESAHAN

Skripsi berjudul “Analisis Pengaruh Jari-Jari Sudut *Bluff Body* Terhadap
Getaran Kantilever Pada Sistem *Vortex Induced Vibration*” karya Achmad

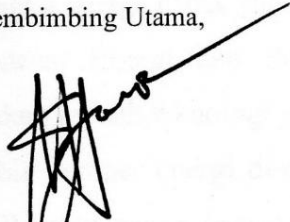
Murdiono telah diuji dan disahkan pada :

Hari, tanggal : Selasa, 27 Juni 2019

Tempat : Fakultas Teknik Universitas Jember.

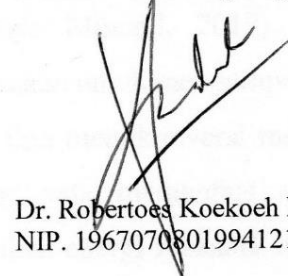
Tim Pembimbing:

Dosen Pembimbing Utama,



Mochamad Edward Ramadhan S.T., M.T.
NIP. 198704302014041001

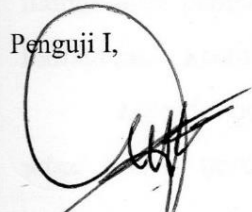
Dosen Pembimbing Anggota,



Dr. Robertoes Koekoeh Koentjoro W. S.T., M.Eng.
NIP. 1967070801994121001

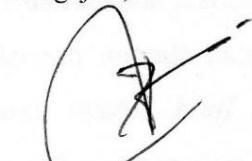
Tim Penguji:

Penguji I,



Santoso Mulyadi S.T., M.T.
NIP. 197002281997021001

Penguji II,



Dr. Nasrul Ilminnafik S.T., M.T.
NIP. 197111141999031002

Mengesahkan

Dekan Fakultas Teknik Universitas Jember,



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

RINGKASAN

Analisis Pengaruh Jari-Jari Sudut *Bluff Body* Terhadap Getaran Kantilever Pada Sistem *Vortex Induced Vibration*; Achmad Murdiono, 151910101005; 2019: 101 halaman; Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember.

Energi listrik diperoleh dari perubahan bentuk energi lain, seperti : energi mekanik, energi panas, energi nuklir. Konsumsi energi listrik nasional jauh lebih besar dibandingkan ketersediaan energi listrik yang ada. Jumlah konsumsi Energi listrik tahun 2016 sebesar 216.004,32 GWh, meningkat 6,48% dari tahun 2015. Pembangkit tenaga listrik yang mendominasi saat ini adalah PLTU sebesar 51,69% (Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2017). *Harvesting energy* merupakan sebuah teknologi yang digunakan untuk mengumpulkan energi dari satu atau lebih sumber energi disekitarnya dan mengkonversi menjadi bentuk energi lain. VIV merupakan *harvesting energy* yang memanfaatkan fenomena *Vortex-Induced Vibration* untuk mengkonversikan energi mekanik menjadi energi listrik dengan memanfaatkan gerakan osilasi *bluff body*. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh jari-jari sudut *bluff body* terhadap getaran mekanik yang di induksikan, kestabilan osilasi *bluff body* dan tingkat resonansi getaran.

Metode penelitian dilakukan dengan metode eksperimen menggunakan *wind tunnel* untuk mengetahui pengaruh bentuk *bluff body* terhadap getaran mekanik yang diinduksikan oleh *vortex* sebagai penghasil tegangan listrik untuk mendeteksi getaran yang dihasilkan. penelitian dengan menggunakan *wind tunnel* dilakukan di *workshop* mobil listrik Universitas Jember, dan untuk pengujian kekakuan kantilever dilakukan di laboratorium Perancangan Mekanik Universitas Jember. Penelitian ini memvariasikan jari-jari sudut *bluff body* dan juga kecepatan angin dimulai dari 0,5 m/s sampai 3 m/s.

Hasil penelitian menunjukkan jari-jari sudut *bluff body* sangat berpengaruh terhadap getaran mekanik yang di induksikan oleh *vortex* di belakang *bluff body*. Semakin kecil jari-jari sudut *bluff body* semakin besar amplitudo getaran yang dihasilkan. amplitudo tertinggi diperoleh dengan variasi jari-jari sudut *bluff body*

5mm. Untuk kestabilan osilasi tidak dipengaruhi oleh jari-jari sudut *bluff body*. Dari grafik hasil penelitian, *bluff body* berosilasi pada area osilasi yang tetap dan tidak tumbuh ataupun berkurang tanpa batas sehingga bisa dikatakan osilasi *bluff body* stabil.

SUMMARY

Analysis of the Effect Corner Radius Bluff Body on Cantilever Vibration in Vortex Induced Vibration System; Achmad Murdiono, 151910101005; 2019: 101 pages; Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering, University of Jember.

Electrical energy is obtained from changes in other forms of energy, such as: mechanical energy, heat energy, nuclear energy. National electricity consumption is far greater than the available electricity. The amount of electricity consumption in 2016 amounted to 216,004.32 GWh, an increase of 6.48% from 2015. The power plant that currently dominates is the PLTU of 51.69% (Ministry of Energy and Mineral Resources, 2017). Harvesting energy is a technology used to collect energy from one or more energy sources around it and convert it into other forms of energy. VIV is harvesting energy that utilizes the phenomenon of Vortex-Induced Vibration to convert mechanical energy into electrical energy by utilizing the oscillation motion of the bluff body. This study aims to determine the effect of the bluff body corner radius on induced mechanical vibration, the oscillation of body stability and vibration resonance level.

The research method was carried out by the experimental method using wind tunnels to determine the effect of the shape of the bluff body on mechanical vibrations induced by the vortex to produce electrical voltage to detect the vibrations produced. research using wind tunnels was carried out in the electric car workshop at the University of Jember, and testing of cantilever stiffness was carried out in the University of Jember's Mechanical Design laboratory. This study varied the bluff body corner radius and also the wind speed starting from 0.5 m/s to 3 m/s.

The results showed that the bluff body corner radius greatly affected mechanical vibrations induced by the vortex behind the bluff body. The smaller the bluff body corner radius the greater the amplitude of the vibration produced. the highest amplitude is obtained in the variation of the bluff body corner radius 5 mm.

For stability oscillations are not affected by the corner radius of the bluff body. From the research results graph, the oscillating bluff body in the oscillation area is fixed and does not grow or decrease indefinitely so it can be said that the bluff body oscillation is stable.

PRAKATA

Alhamdulillahirabbil'alamin, 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 “Analisis Pengaruh Jari-Jari Sudut *Bluff Body* Terhadap Getaran Kantilever Pada Sistem *Vortex Induced Vibration*”. 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. Mochamad Edoward Ramadhan S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing Utama, dan Dr. Robertoes Koekoeh Koentjoro W. S.T., M.Eng., selaku Dosen Pembimbing Anggota yang telah meluangkan waktu, pikiran, dan perhatian pada skripsi ini;
2. Santoso Mulyadi S.T., M.T., selaku Dosen Penguji I, dan Dr. Nasrul Ilminnafik, S.T., M.T., selaku Dosen Penguji II yang telah memberikan masukan dan saran bersifat konstruktif untuk penyusunan skripsi ini;
3. Ibunda Anis Rahayu dan Ayahanda Lulut yang telah memberikan dorongan dan doanya demi terselesaikannya skripsi ini;
4. Teman-teman Tim Mobil Listrik TITEN yang telah memberikan semangat serta bantuan, Kharis, Fadhea dan Ayik yang selalu menjadi teman bertukar pikiran dan bercanda saat-saat semester akhir menyelesaikan skripsi;
5. Ernanda Cholila, yang selalu memberikan semangat dalam hal apapun dari semester 1 sampai saat ini, dan juga salah satu alasan untuk cepat lulus;
6. Civitas akademika Jurusan Teknik Mesin 2015 Universitas Jember. Penulis juga menerima segala kritik dan saran dari semua pihak demi kesempurnaan skripsi ini. Akhirnya penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dan berharap, semoga skripsi ini dapat bermanfaat;

Jember, 27 Juni 2019

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN SAMPUL	i
HALAMAN JUDUL	ii
HALAMAN PERSEMBAHAN	iii
HALAMAN MOTO	iv
HALAMAN PERNYATAAN	v
HALAMAN PEMBIMBING	vi
HALAMAN PENGESAHAN	vii
RINGKASAN	viii
SUMMARY	x
PRAKATA	xii
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xvi
DAFTAR TABEL	xviii
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Batasan Masalah	4
1.4 Tujuan	4
1.5 Manfaat	5
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Vortex-induced Vibration	6
2.1.1 <i>Vortex Shedding</i>	10
2.1.2 Reynold Number (Re).....	13
2.1.3 Angka Strouhal (St)	14
2.2 Macam Regime Dalam Mekanika Fluida	15
2.3 Kekakuan	15
2.4 Getaran	17

2.5 Stabilitas Sistem	20
2.6 Piezoelektrik	20
2.8 Wind Tunnel.....	22
2.8.1 <i>Open Circuit/Open Return Wind Tunnel</i>	22
2.8.2 <i>Close Circuit/Close Return Wind Tunnel</i>	23
2.8.3 Skema <i>open circuit wind tunnel</i> skala kecil.....	24
2.9 Hipotesis.....	25
BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN	26
3.1 Metode Penelitian.....	26
3.2 Waktu dan Tempat.....	26
3.3 Alat dan Bahan.....	26
3.3.1 Alat.....	26
3.3.2 Bahan	26
3.4 Prosedur Penelitian.....	27
3.5 Pelaksanaan Penelitian	28
3.5.1 Variabel Penelitian.....	28
3.5.2 Pengambilan Data	30
3.6 Diagram Alir Penelitian	33
BAB 4. PEMBAHASAN	35
4.1 Data Hasil Percobaan	35
4.1.1 Data pengujian kekakuan batang kantilever	35
4.1.2 Data pengujian respons getaran bebas	36
4.1.3 Data pengukuran <i>bluff body</i>	38
4.2 Data Pengujian <i>bluff body</i> di wind tunnel.....	38
4.3 Analisis Hasil Penelitian	46
4.3.1 Pengaruh Jari-Jari Sudut <i>Bluff Body</i> Terhadap Tegangan Output.....	46
4.3.2 Pengaruh Jari-Jari Sudut <i>Bluff Body</i> Kestabilan Osilas	48
4.3.3 Pengaruh Jari-Jari Sudut <i>Bluff Body</i> Terhadap Frekuensi Getaran dan Tingkat Resonansi.....	50
BAB 5. PENUTUP.....	53

5.1 Kesimpulan.....53

5.1 Saran54

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
2.1 Skema osilasi akibat <i>vortex vibration</i>	6
2.2 Visualisasi interaksi fluida dengan balok piezoelektrik pada $Re = 14.800$. Mengalir dari kiri ke kanan. balok piezoelektrik mengarah ke bawah dan bergerak ke atas ...	7
2.3 Visualisasi interaksi fluida dengan balok piezoelektrik pada $Re = 14.800$. Mengalir dari kiri ke kanan. Sinar piezoelektrik membelok ke atas dan bergerak ke bawah ..	7
2.4 Hubungan lebar kantilever dengan kekakuan batang kantilever.....	8
2.5 Tegangan <i>output</i> kantilever lebar 40mm.....	9
2.6 <i>Vortex Induced Vibration</i> pada penampang <i>bluff body</i> persegi, segitiga, dan setengah lingkaran	9
2.7 Tegangan keluaran pada penampang <i>bluff body</i> persegi, segitiga dan setengah lingkaran	10
2.8 Kontur streamline pada angka reynold 5.....	12
2.9 Kontur streamline pada angka reynold 45.....	12
2.10 Hubungan antara angka Reynold dan kecepatan aliran	14
2.11 Grafik pengaruh dimensi batang kantilever terhadap frekuensi natural ...	16
2.12 Skema pembebanan pada batang kantilever	16
2.13 Contoh eksitasi getaran deterministik dan random	18
2.14 Ilustrasi siklus pergerakan getaran.....	18
2.15 Gelombang sistem stabil dan tidak stabil.....	20
2.16 Skema kemampuan piezoelektrik	21
2.17 <i>Open circuit/open return wind tunnel</i>	23
2.18 <i>Close circuit/close return wind tunnel</i>	24
2.19 Skema <i>wind tunnel</i>	24
3.1 Posisi piezoelektrik pada katilever	28
3.2 <i>Bluff body</i> jari-jari sudut 5 mm	29
3.3 <i>Bluff body</i> jari-jari sudut 8 mm	29
3.4 <i>Bluff body</i> jari-jari sudut 11 mm	29
3.5 <i>Bluff body</i> jari-jari sudut 14 mm	30

3.6 <i>Bluff body</i> jari-jari sudut 17 mm	30
3.7 <i>Bluff body</i> jari-jari sudut 20 mm	30
3.8 Pengambilan data kekakuan pada batang kantilever.....	30
3.9 Respons getaran bebas pada batang kantilever	31
3.10 Skema pengujian pada <i>wind tunnel</i>	31
3.11 Diagram alir penelitian.....	33
4.1 pengujian kekakuan kantilever.....	35
4.2 Grafik respons getaran bebas kantilever polypropylene yang terekam di <i>oscilloscope</i>	36
4.3 Bentuk isometrik <i>test section wind tunnel</i> persegi.....	39
4.4 Grafik kecepatan angin pengujian terhadap angka reynold.	40
4.5 Grafik gelombang tegangan pada <i>bluff body</i> jari-jari sudut 5mm kecepatan angin 1m/s.....	44
4.6 Perbandingan <i>vortex shadding bluff body</i> jari-jari sudut 5mm pada kecepatan angin 1m/s dengan getaran bebas.....	45
4.7 Tegangan maksimum pada variasi jari-jari sudut <i>bluff body</i>	47
4.8 Tegangan rata rata pada variasi jari-jari sudut <i>bluff body</i>	47
4.9 Grafik tegangan <i>output bluff body</i> kecepatan 3 m/s.....	49
4.10 Kondisi 0 <i>oscilloscope</i> saat <i>bluff body</i> diam.	50
4.11 Frekuensi <i>bluff body</i> di setiap kecepatan angin pengujian.	50
4.12 Ilustrasi rentang osilasi <i>bluff body</i>	51
4.13 Tingkat Resonansi.....	51

DAFTAR TABEL

	Halaman
2.1 <i>Vortex shedding regimes</i>	11
2.2 Potensi daya energi yang dapat dihasilkan pada berbagai macam sumber .	21
3.1 Tabel hasil data kecepatan, tegangan puncak, dan frekuensi	32
3.2 Tabel data pengujian dengan propscope	33
4.1 Data respon getaran bebas pada kantilever polypropylene panjang 80 mm lebar 40 mm dan tebal 0,5 mm.....	36
4.2 Hasil pengukuran spesimen	38
4.3 Perhitungan bilangan reynold di setiap kecepatan angin pada pengujian...	39
4.4 Data respons frekuensi <i>vortex shedding</i> pada <i>bluff body</i> jari-jari sudut 5mm kecepatan angin 1m/s	40

BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi listrik diperoleh dari perubahan bentuk energi lain, seperti : energi mekanik, energi panas, energi nuklir. Konsumsi energi listrik nasional jauh lebih besar dibandingkan ketersediaan energi listrik yang ada. Jumlah konsumsi Energi listrik tahun 2016 sebesar 216.004,32 GWh, meningkat 6,48% dari tahun 2015. Pembangkit tenaga listrik yang mendominasi saat ini adalah PLTU sebesar 51,69% (Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2017).

Letak geografis Indonesia berada pada garis katulistiwa yang merupakan daerah lintasan pergerakan angin akibat dari perbedaan tekanan udara pada kedua belahan bumi yang dikenal sebagai angin muson. Indonesia merupakan negara kepulauan yang 70% nya adalah perairan, memiliki banyak pesisir dan gunung ataupun bukit. Indonesia memiliki potensi energi angin yang melimpah, wilayah perairan Indonesia mempunyai kecepatan angin yang cukup besar khususnya wilayah selatan khatulistiwa dengan kecepatan minimum 6 m/s dan kecepatan maksimum 12 m/s (Dida dkk., 2016).

Energi angin merupakan salah satu dari beberapa Energi dari Alam yang dapat dikonversikan menjadi energi listrik. Produksi energi listrik tenaga angin telah menyusul batubara di tahun 2017 dengan kapasitas 170 GW, hal ini merupakan sebagai bentuk kapasitas pembangkit listrik terbesar kedua di bawah Gas yaitu 190 GW di Eropa (Wind Europe, 2017). Produksi energi listrik dari tenaga angin di Indonesia 5.124,06 GW Jauh di bawah energi fosil yang mampu memproduksi 29.880,23 GW (Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2017).

Harvesting energy merupakan sebuah teknologi yang digunakan untuk mengumpulkan energi dari satu atau lebih sumber energi disekitarnya dan mengkonversi menjadi bentuk energi lain. Berkembangnya teknologi nirkabel dan MEMS, *harvesting energy* dapat menjadi alternatif dari baterai konvensional. Alat elektronik portabel dengan daya rendah dan sensor nirkabel menggunakan baterai konvensional sebagai sumber tenaganya, tetapi masa pakai baterai terbatas dan

sangat pendek. Pengisian baterai tidak efisien dan terkadang tidak mungkin. Beberapa penelitian tentang *harvesting energy* telah dilakukan sebagai sumber daya perangkat portabel atau sistem jaringan sensor nirkabel (Kim dkk., 2011).

Getaran merupakan salah satu energi yang dapat dimanfaatkan sebagai *energy harvesting* dengan media piezoelektrik. Piezoelektrik adalah muatan listrik yang terakumulasi dalam bahan padat tertentu, seperti kristal dan keramik akibat dari *mechanical pressure* (tekanan). Getaran yang diperoleh dari pengaruh adanya *vortex* angin yang menumbuk suatu objek dapat dimanfaatkan untuk dikonversi menjadi energi listrik.

Penelitian yang memanfaatkan fenomena *Vortex-Induced Vibration* (VIV) sebagai energi terbarukan untuk menghasilkan listrik yang diberi nama *The Vortex-Induced Vibration Aquatic Clean Energy* (VIVACE). VIVACE terdiri dari *bluff body* dengan bentuk silinder yang dipasang pada pegas linier dan ditempatkan tegak lurus terhadap arah arus yang stabil. VIVACE dapat mengekstrak energi dari arus laut atau arus sungai dengan rasio konversi daya yang tinggi menjadi sumber daya yang lebih mudah diakses dan ekonomis. Hasil penelitian VIVACE menunjukkan bahwa VIV terjadi pada rentang angka Reynold yang luas, bahkan dari kecepatan arus yang lambat 0,25 m/s (Bernitsas dkk., 2006).

Sirohi dan Mahadik (2011) telah meneliti *harvesting energy* untuk sensor berdaya rendah, Perangkat ini didasarkan pada aerodinamis deretan bar dengan penampang segitiga yang melekat pada balok kantilever. Piezoelektrik lembaran terikat pada balok mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Pengujian prototipe ukuran sekitar 160 mm x 250 mm dengan berbagai kondisi operasi di terowongan angin menghasilkan daya maksimum 53 mW diukur pada kecepatan angin 11,6 mph.

Getaran yang diinduksi oleh aliran yang mengenai sebuah penampang (*bluff body*) persegi, segitiga, setengah lingkaran dan terhubung dengan balok kantilever dengan bentuk persegi ringan dirancang agar bisa mengalami osilasi (bergoyang) ketika terkena angin. Daya listrik diekstrak dari getaran kantilever melalui generator elektromagnetik yang terdiri dari magnet permanen yang melekat balok kantilever yang berosilasi melewati kumparan tembaga stasioner. Pada variasi *bluff*

body ditemukan power paling besar adalah *bluff body* dengan bentuk D silinder. (Ali dkk., 2013).

Vortex-Induced Vibration (VIV) menggunakan *bluff body* dan batang kantilever dirancang untuk mengetahui performa pembangkitan listrik yang didapat. Metode yang digunakan adalah dengan membandingkan hasil dari pemodelan matematis dan eksperimen di *wind tunnel*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dari hasil perhitungan matematis menunjukkan hasil yang sama dengan hasil eksperimen di *wind tunnel* dengan daya keluaran tertinggi 0,1 mW pada kecepatan angin 1,192 m/s (Akaydin dkk., 2012).

Gamayel (2017) meneliti pengaruh bentuk *bluff body* persegi, segi-6, segi-8, dan lingkaran terhadap tegangan listrik yang dihasilkan oleh kantilever yang dipasangkan dengan piezoelektrik. Dari hasil penelitian tegangan rata-rata terbesar diperoleh dengan variasi *bluff body* segi-6 0,037 mV. Hasil penelitian menyimpulkan bahwa peningkatan kecepatan udara saat melewati *bluff body* segi-6 mampu meningkatkan getaran kantilever piezoelektrik sehingga tegangan listrik yang dihasilkan menjadi tinggi.

Dey dan Das (2017) melakukan studi numerik tentang pengaruh jari jari sudut dan bilangan reynold terhadap aliran fluida pada silinder persegi. Jari-jari sudut yang divariasikan yaitu 0,5, 0,51, 0,54, 0,59, 0,64, 0,71 dan pada angka reynold rendah, $Re = 5$ dan $Re = 45$. Pada penelitian diamati lapisan batas, gaya hambat dan kontur aliran pada variasi penelitian. Hasil penelitian menunjukkan bahwa aliran fluida laminar mengalir dengan baik pada silinder persegi lingkaran dibandingkan dengan bujur sangkar. ketebalan lapisan batas berbanding lurus dengan jari-jari sudut dan berbanding terbalik dengan Re .

Ma'arif (2018) meneliti pengaruh kekakuan kantilever terhadap tegangan listrik yang dihasilkan pada *Vortex-induced Vibration* tenaga bayu. Penelitian dilakukan dengan metode eksperimental menggunakan *wind tunnel* dan pengukur tegangan menggunakan piezoelektrik tipe *bending*. Hasil penelitian menunjukkan nilai Tegangan listrik paling optimum sebesar 0,207 V diperoleh dalam eksperimen pada variasi batang kantilever panjang 80 mm lebar 40 mm.

Model aerodinamis lain yang disempurnakan akan memberikan efek pada getaran yang berbeda dengan adanya lengkungan (jari-jari sudut). Oleh karena itu dilakukan penelitian mengenai pengaruh jari-jari sudut *bluff body* terhadap getaran yang diinduksikan sehingga mampu meningkatkan frekuensi getaran. Penelitian dilakukan dalam *wind tunnel* yang di mana geometri yang diuji akan dipasangkan pada sebuah kantilever dan dipasang sensor getaran piezoelektrik untuk mengetahui getaran yang diinduksikan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, maka dapat diambil rumusan masalah sebagai berikut : “Bagaimana desain geometri *bluff body* untuk fluida kerja angin sebagai penghasil getaran untuk membangkitkan tegangan listrik pada sistem *Vortex-induced vibration* ?”

1.3 Batasan Masalah

Berdasarkan rumusan masalah, maka diberikan batasan masalah dalam penelitian sebagai berikut :

1. Aliran fluida diasumsikan keadaan stasioner.
2. Suhu udara dalam *test section* diasumsikan seragam.
3. Suhu ruangan pengujian diasumsikan tetap.
4. Tidak membahas fluida di sekitar *bluff body*.

1.4 Tujuan Penelitian

Berikut adalah tujuan penelitian ini dilakukan berdasarkan rumusan masalah di atas :

1. Untuk mengetahui pengaruh jari-jari sudut *bluff body* terhadap getaran kantilever yang diinduksikan.
2. Untuk mengetahui pengaruh jari-jari sudut *bluff body* terhadap kestabilan osilasi *bluff body*.
3. Untuk mengetahui pengaruh jari-jari sudut *bluff body* terhadap tingkat resonansi getaran.

1.5 Manfaat Penelitian

Berikut adalah manfaat yang dapat diperoleh dari penelitian ini :

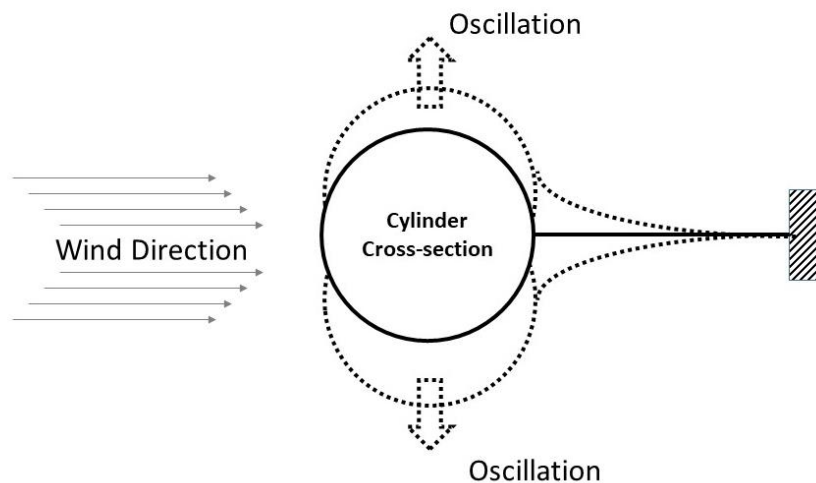
1. Turut serta dalam riset *renewable energy*.
2. Meningkatkan potensi energi ramah lingkungan.
3. Memasyarakatkan teknologi energi terbarukan.
4. Mengetahui faktor yang dapat mempengaruhi *Vortex-Induced Vibration* (VIV).

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Vortex-induced Vibration*

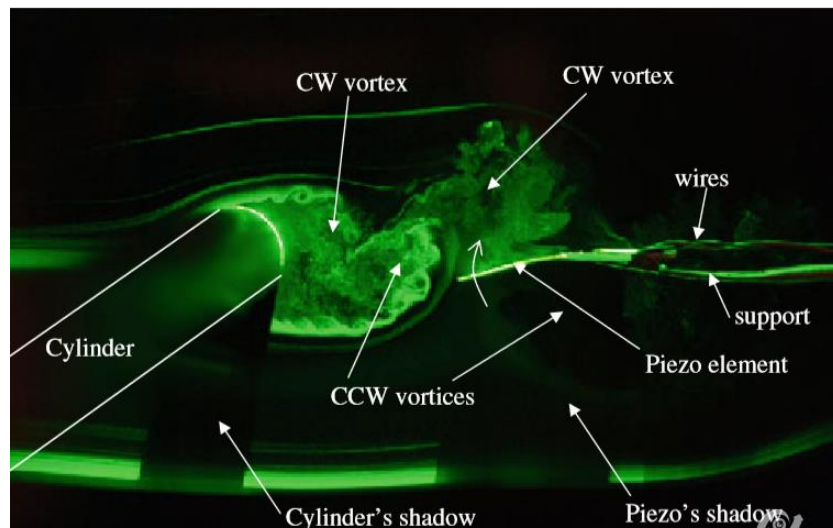
Vortex Induced Vibratioin (VIV) adalah fenomena yang mungkin terjadi saat *bluff body* berinteraksi dengan aliran. Fenomena ini biasanya terjadi pada *heat exchanger*, jembatan, tiang transmisi listrik dll. VIV dapat menyebabkan getaran transversal yang sangat besar sehingga terjadi kegagalan *fatigue* (Kumar dkk., 2008).

Vortex Induced Vibration merupakan salah satu jenis *Flow-induced Vibration* (FIV) yang termasuk dalam beban siklik yang dihasilkan oleh turbolensi di sekitar *bluff body* (Assi, 2009). Dalam mekanika fluida, struktur yang berada dalam aliran fluida diklasifikasikan sebagai *bluff body* jika menghasilkan separasi aliran dengan permukaan. Dalam aplikasinya, struktur silinder mengalami interaksi dengan aliran yang dapat merangsang bodi menjadi getaran yang diinduksi oleh aliran (FIV) (Assi, 2009). Turbolensi yang terbentuk menghasilkan gaya eksternal yang menyebabkan silinder berisolasi melintang terhadap arah fluida yang dijelaskan seperti Gambar 2.1.

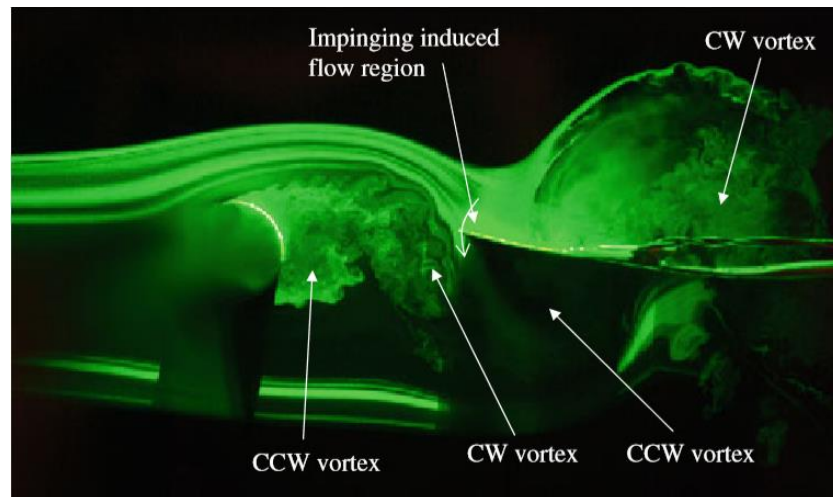


Gambar 2.1 Skema osilasi akibat *vortex vibration* (Sumber: Correa dkk., 2014)

Getaran-getaran akibat VIV cukup besar dan bisa menyebabkan kerusakan struktural dan malapetaka. terjadinya getaran ini pada struktur bangunan dapat menyebabkan kekhawatiran, mengkhawatirkan kenyamanan dan keamanan publik (Kumar dkk., 2008).



Gambar 2.2 Visualisasi interaksi fluida dengan balok piezoelektrik pada $Re = 14.800$. Mengalir dari kiri ke kanan. balok piezoelektrik mengarah ke bawah dan bergerak ke atas (Sumber: Akaydin dkk., 2010)



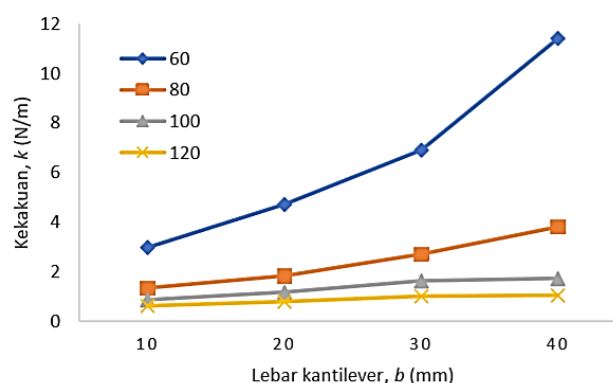
Gambar 2.3 Visualisasi interaksi fluida dengan balok piezoelektrik pada $Re = 14.800$. Mengalir dari kiri ke kanan. Sinar piezoelektrik membelok ke atas dan bergerak ke bawah (Sumber: Akaydin dkk., 2010)

Gambar 2.2 dan Gambar 2.3 menjelaskan bagaimana terjadinya getaran pada kantilever. Tekanan pada balok dipengaruhi oleh dua pola aliran berbeda yang

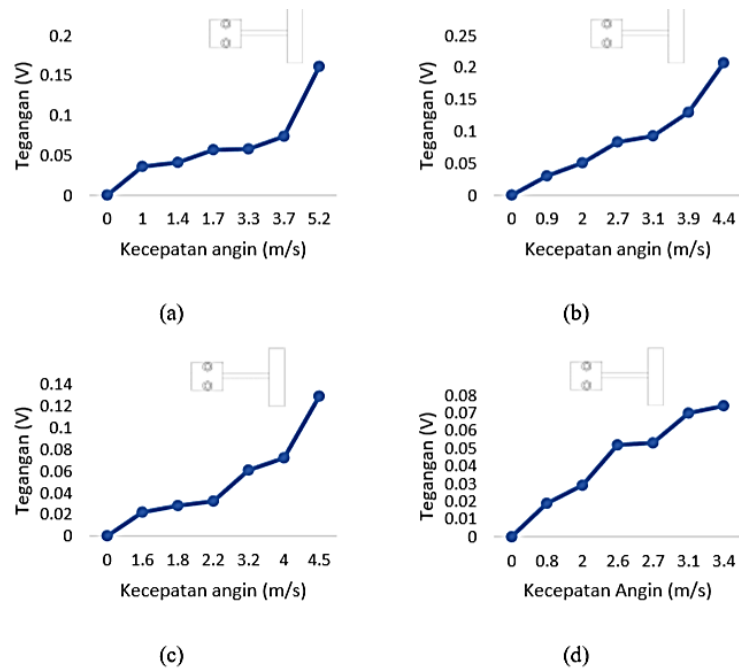
berhubungan dengan aliran induksi di depan dan di belakang vortisitas dan daerah inti *vorteks* tekanan rendah. *Vortex* di belakang *bluff body* menimpa balok dan daerah stagnasinya menciptakan tekanan berlebih yang menyebabkan balok menekuk ke sisi yang berlawanan dimana inti dari *vortex* lain melakukan pengisapan pada saat yang sama. Karena dua mekanisme gaya tekanan yang bekerja pada balok selalu dalam fase, balok didefleksikan di bawah gaya bolak-balik yang terus menerus.

Percobaan *vortex induced vibration* yang dilakukan dalam terowongan angin kecepatan rendah dengan kecepatan aliran variabel bebas yang memungkinkan pemaksaan frekuensi balok piezoelektrik. Percobaan menunjukkan bahwa sangat penting untuk menyetel frekuensi aliran dengan frekuensi alami dari kantilever yang terpasang piezoelektrik untuk memaksimalkan tegangan keluaran piezoelektrik. Ketidakcocokan kecil antara dua frekuensi menyebabkan penurunan substansial dalam daya *output* terutama ketika frekuensi *shedding* lebih kecil dari frekuensi natural sistem ($f_s < f_n$) (Sumber: Akaydin dkk., 2010).

Gambar 2.4 menyajikan data kekakuan material polypropylene dengan variasi panjang 60 mm, 80 mm, 100 mm dan 120 mm dengan variasi lebar 10 mm, 20 mm, 30 mm dan 40 mm. Nilai kekakuan tertinggi diperoleh pada batang kantilever dengan dimensi panjang 60 mm dan lebar 40 mm sebesar 11,395 N/m.

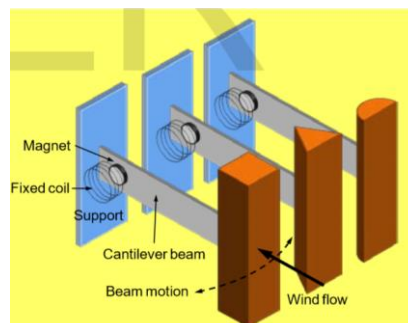


Gambar 2.4 Hubungan lebar kantilever dengan kekakuan batang kantilever (sumber : ma'arif, 2018)



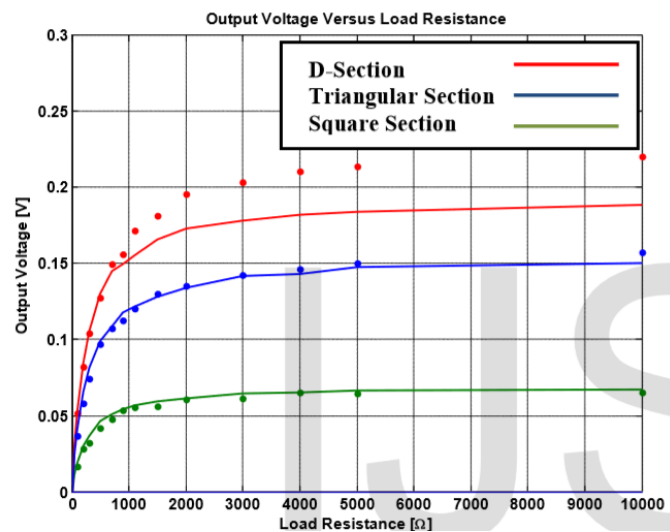
Gambar 2.5 Tegangan *output* kantilever lebar 40 mm (sumber : ma'arif 2018)

Gambar 2.5 menunjukkan bahwa variasi kekakuan berpengaruh terhadap *output* tegangan. Semakin tinggi nilai kekakuan, semakin tinggi tegangan yang dihasilkan. Tegangan maksimal diperoleh 0,207 V pada variasi panjang 80 mm dan lebar 40 mm, begitu juga dengan resonansi. Resonansi mengalami peningkatan area akibat bertambahnya kekakuan yaitu mampu bekerja pada kecepatan = 1 m/s – 5,2 m/s pada batang kantilever panjang 60 mm dan lebar 40 mm.



Gambar 2.6 *Vortex Induced Vibration* pada penampang *bluff body* persegi, segitiga, setengah lingkaran (Sumber: Ali dkk., 2013)

Gambar 2.6 merupakan ilustrasi pada eksperimen VIV pada penampang *bluff body* persegi, segitiga, dan setengah lingkaran pada fluida kerja angin. *Fixed coil* dan magnet digunakan untuk membangkitkan tegangan saat *bluff body* beresilasi. Tegangan puncak terbesar di kecepatan angin 3,25 m/s diperoleh pada penampang *bluff body* setengah lingkaran sebagaimana dijelaskan pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Tegangan keluaran pada penampang *bluff body* persegi, segitiga dan setengah lingkaran terhadap beban (Sumber: Ali dkk., 2013)

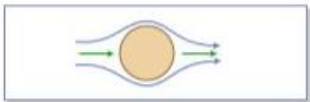
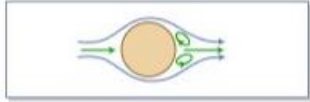
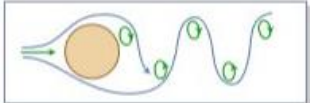


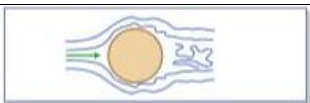
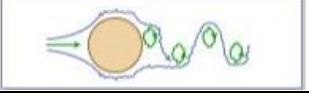
2.1.1 Vortex Shedding

Ketika *bluff body* terkena oleh fluida pada bilangan reynold yang tinggi, alirannya akan terpisah jauh dari bagian *body* sehingga menyebabkan pusaran *vortex* periodik dari kedua sisi *body*. Menjauhnya aliran dari *body* ditandai dengan periodisitas yang menyebabkan tekanan tekanan berfluktuasi pada permukaan *body* karena *body* mengalami getaran, jika *body* dipasang secara fleksibel (Kumar dkk., 2008).

Vortex Shedding mulai terbentuk di angka reynold di atas 40, timbul akibat dorongan dari gangguan kecil dalam aliran atau di permukaan *bluff body*. Tekanan negatif ke arah ujung *bluff body* memaksa fluida melekat pada permukaan *bluff body*, sementara di bagian belakang *bluff body* perbedaan tekanan yang berubah ubah menyebabkan pergeseran. Hal ini mengakibatkan terjadinya pemisahan dan

timbulnya *vortex shedding* sebagaimana dijabarkan pada Tabel 2.1. Perpindahan bolak balik pusaran di belakang *bluff body* disebut sebagai “*Karman Vortex Street*”, dijelaskan oleh Von Karman tahun 1912 (Colette, 2014).

Tabel 2.1 *Vortex shedding regimes* (Sumber: Lienhard, 1966)

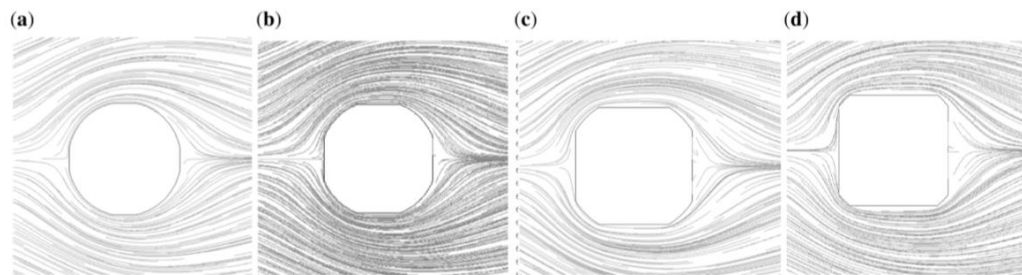
	Bentuk aliran tak terpisahkan (<i>streamline</i>)	$Re > 5$
	Sepasang <i>vortex</i> di area wake	$5-15 < Re < 40$
	2 Bentuk <i>vortex street</i> laminar	$40 < Re < 150$
	Rentang transisi vortex turbolent	$150 < Re < 300$
	Vortex street turbolent penuh	$300 < Re < 1,5 \times 10^5$
	Lapisan batas laminar mengalami transisi turbolent dan wake lebih sempit dan tidak teratur	$1,5 \times 10^5 < Re < 3,5 \times 10^6$
	<i>Vortex street</i> kembali turbolent	$3,5 \times 10^6 < Re$

Tabel 2.1 mengklasifikasikan pola *vortex shedding* pada setiap rentang angka Reynold $5 > Re > 3,5 \times 10^6$ (Eid, 2004) :

- $Re < 5$: Tidak terjadi pemisahan lapisan batas.
- $5 - 15 < Re < 40$: Lapisan batas terbagi dua sehingga membentuk sepasang pusaran.
- $40 < Re < 150$: setelah terjadi pemisahan, pusaran akan membentuk dua buah *vortex street* (jalur pusaran). Pusaran yang terbentuk masih berbentuk laminar.
- $150 < Re < 300$: Pusaran yang terbentuk mulai menjadi turbolen. Pusaran berubah turbolen sepenuhnya saat $Re = 300$
- $300 < Re < 1,5 \times 10^5$: Pusaran memiliki aliran turbolen namun lapisan batas masih dalam aliran laminar. Merupakan daerah subkritikal, dengan nilai angka strouhal konstan.

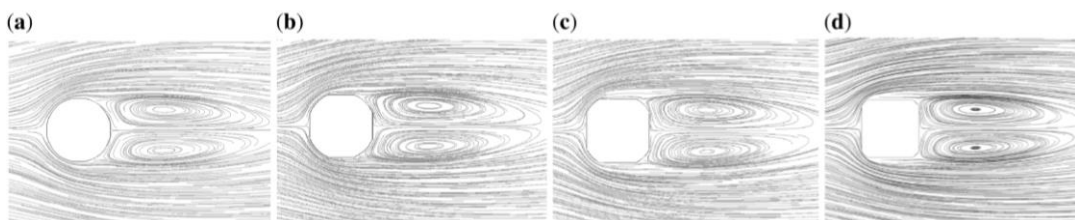
- f. $1,5 \times 10^5 < Re < 3,5 \times 10^6$: Merupakan kondisi transisi pusaran, di kondisi ini lapisan batas mulai mengalami turbolensi.
- g. $Re > 3,5 \times 10^6$: Kondisi saat lapisan batas dan pusaran berada pada aliran turbulen.

Gambar 2.8 dan Gambar 2.9 menggambarkan visualisasi kontur aliran untuk $Re = 5$ dan 45 pada jari-jari sudut yang berbeda ($r = 0,51, 0,54, 0,59$ dan $0,64$). Divisualisasikan dengan jelas bahwa pada $Re = 5$, tidak ada penembangan *wake*, sedangkan pada $Re = 45$ wake sepenuhnya dikembangkan di belakang silinder untuk setiap jari-jari sudut. Dari Gambar 2.8 dan Gambar 2.9 terlihat bahwa pada Re yang lebih tinggi ada formasi *vortex* baru yang terbentuk.



(a) $r = 0,51$; (b) $r = 0,54$; (c) $r = 0,59$; (d) $r = 0,64$

Gambar 2.8 Kontur streamline pada angka reynold 5 (sumber: Dey dan Das, 2017)



(a) $r = 0,51$; (b) $r = 0,54$; (c) $r = 0,59$; (d) $r = 0,64$

Gambar 2.9 Kontur streamline pada angka reynold 45 (sumber: Dey dan Das, 2017)

Ketebalan lapisan batas berbanding lurus dengan ' r ' dan berbanding terbalik dengan ' Re '. Karakteristik ini disebabkan oleh gradien tekanan yang kuat dan tegangan geser dinding yang lemah yang dikembangkan di sekitar silinder. Juga, ketika jari-jari sudut berkurang, silinder menjadi lebih aerodinamis karena pengurangan tekanan dan gaya viskos yang bekerja pada silinder. Koefisien *drag* berbanding terbalik dengan Re dan berbanding lurus dengan jari-jari sudut. Pada jari-jari sudut kecil, nilainya minimum, yang menyiratkan bahwa ketika bentuk

silinder persegi secara bertahap dikonversi menjadi lingkaran, akan menjadi lebih aerodinamis (Dey dan Das, 2017).

2.1.2 Reynold Number (Re)

Aliran fluida diklasifikasikan berdasarkan nilai angka Reynold yaitu pada rentang $Re \leq 2300$ (laminer), $2300 \leq Re \leq 10.000$ (transisi) dan $Re \geq 10.000$ (turbulen) (Ma'arif, 2018). Angka Reynold suatu aliran menunjukkan rasio gaya inersia terhadap gaya viskos dalam sebuah aliran. Re digunakan untuk mengklasifikasikan aliran fluida menjadi aliran laminar, transisi, atau turbulen. Klasifikasi tersebut menunjukkan tingkat persimpangan streamline dan dispersi dalam aliran fluida. Angka Reynold dihitung dengan persamaan berikut (Correa dkk., 2014) :

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad 2.1$$

Dimana :

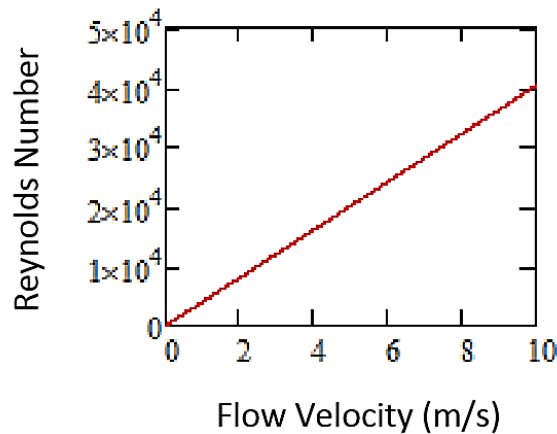
ρ = massa jenis (kg/m^3)

v = kecepatan aliran (m/s)

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

μ = viskositas dinamik fluida (N.s/m^2)

Pada saat bilangan Reynold lebih dari 1000, fluida ketika mengalir pada silinder akan membentuk lapisan batas. Lapisan batas merupakan lapisan fluida di sekitar permukaan objek karena efek viskositas fluida. Pembentukan lapisan batas di sekitar silinder akan menciptakan getaran yang diinduksikan oleh *vortex*, karena lapisan batas memberikan efek gradien tekanan yang merugikan tepat di hilir silinder. Gradien tekanan ini memungkinkan terbentuknya *vortex shedding* pada silinder dan membuat silinder berosilasi. Gambar 2.10 merupakan grafik plot angka Reynold dengan kecepatan aliran. Hubungan antara angka Reynold dan kecepatan aliran membentuk grafik linier (Correa dkk., 2014).



Gambar 2.10 Hubungan antara angka Reynold dan kecepatan aliran
(Sumber: Correa dkk., 2014)

2.1.3 Angka Strouhal (S_t)

Angka Strouhal merupakan nilai yang digunakan untuk mengukur frekuensi *vortex shedding* terhadap kecepatan aliran fluida. Angka Strouhal merupakan konstanta proporsional tanpa dimensi antara frekuensi *vortex shedding* (f_s) dan kecepatan aliran (v) dibagi dengan lebar silinder (D). v dan D harus memiliki unit yang konsisten (Blevin, 2001). Berikut adalah persamaan untuk angka Strouhal (Correa dkk., 2014) :

$$f_s = \frac{S_t v}{D} \quad 2.2$$

$$S_t = \frac{f_s D}{v} \quad 2.3$$

Dimana :

f_s = frekuensi *vortex shedding* (Hz)

D = lebar *bluff body* (m)

v = kecepatan aliran fluida (m/s)

Angka Reynold juga dapat digunakan untuk menghitung angka Strouhal menggunakan pendekatan sebagai berikut (Correa dkk., 2014) :

$$S_t = -0,0065 \ln(Re) + 0,21 \quad 2.4$$

Dimana :

S_t = angka Strouhal

Re = angka Reynold

2.2 Macam Regime Dalam Mekanika Fluida

Macam jenis aliran fluida dibedakan oleh sifat fluida yang membuat situasi karakteristik fluida. Faktor pengontrol dinyatakan dalam bentuk besaran seperti; kecepatan benda, densitas fluida, viskositas, dan lain lain.

Secara umum fluida diklasifikasikan sebagai berikut:

a. Fluida Ideal

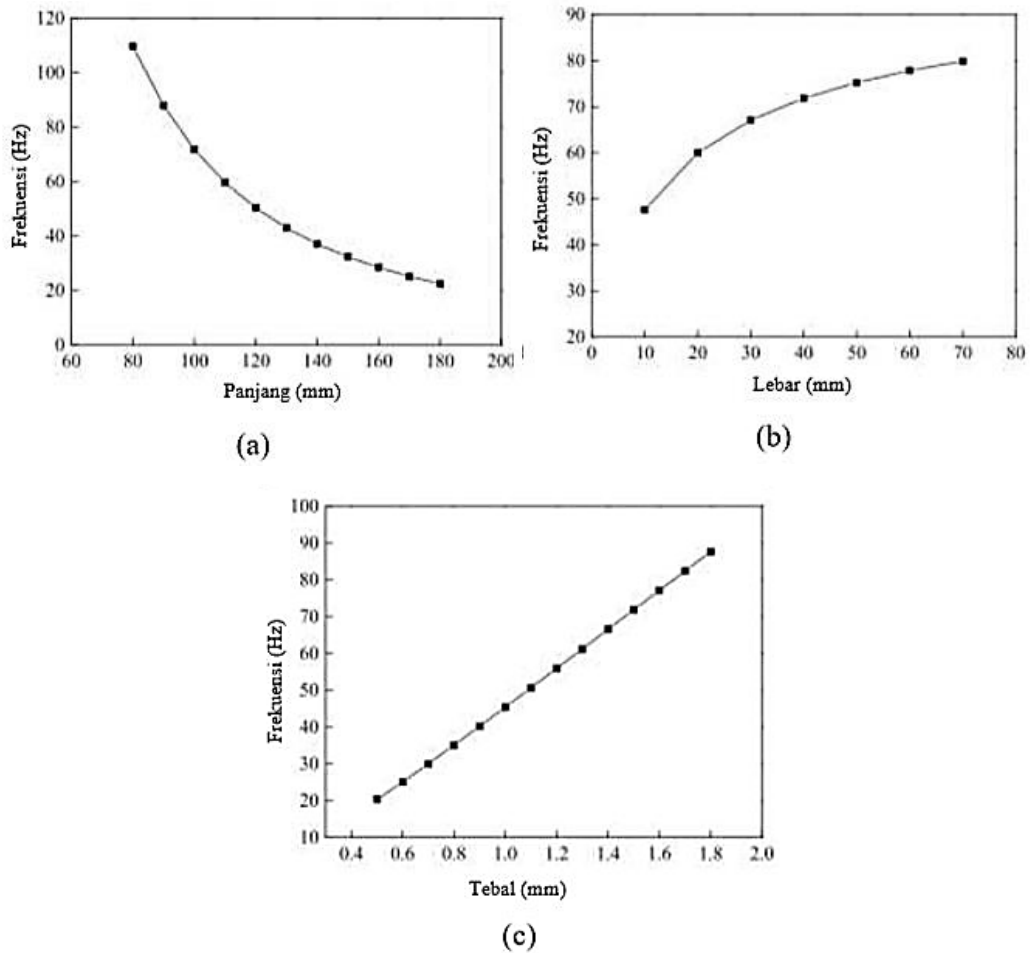
Fluida ideal merupakan cabang dari fluida dinamik, disebut sebagai *classical hydrodynamics*. Fluida ini dianggap tidak memiliki nilai viskositas (viskositas nol) dan *incompressible* (densitasnya konstan). Sehingga membuat gaya tangensial antara lapisan benda yang berdekatan tidak ada. Meskipun teori fluida tidak berhasil menjelaskan fenomena dari fluida yang sesungguhnya, tetapi teori ini bisa memberikan hasil yang cukup baik dalam perhitungan gaya angkat, *induced drag*, dan *wave motion*.

b. *Viscous incompressible*

Viscous incompressible fluids yaitu densitas fluida dianggap konstan, aplikasi pada kegunaan yang luas seperti pada aliran pada suatu cairan (khususnya air) dan aliran udara bertekanan rendah. Hal tersebut merupakan penjelasan dari gaya viskositas, aliran pusar dan pemisahan aliran (Orianto dan Pratikto, 1989).

2.3 Kekakuan

Kekakuan merupakan kemampuan suatu sistem untuk menahan deformasi saat mengalami pembebanan atau kemampuan material untuk menahan deformasi selama pembebanan. Karet lebih mudah merenggang dibandingkan dengan baja, hal ini disebabkan kekakuan material baja lebih besar dibandingkan dengan karet (Leckie dan Bello, 2009). Nilai kekakuan dipengaruhi oleh beberapa faktor, salah satunya yaitu dimensi dari sistem. Dimensi batang kantilever yang memiliki material sama mempengaruhi frekuensi natural, besarnya frekuensi natural memiliki hubungan terhadap nilai kekakuan dari struktur sebagaimana yang telah dijelaskan pada persamaan 2.6. Gambar 2.11 menunjukkan semakin besar lebar dan ketebalan batang kantilever akan meningkatkan frekuensi natural, sedangkan dimensi panjang akan menurunkan besarnya frekuensi natural (Zhao dkk., 2017)



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

Gambar 2.11 Grafik pengaruh dimensi batang kantilever terhadap frekuensi natural (Sumber: Zhao dkk., 2017)

Nilai kekakuan struktur ataupun material dapat diketahui dengan menggunakan hukum Hooke:



Gambar 2.12 Skema pembebanan pada batang kantilever (sumber: Leckie dan Bello, 2009)

$$F = k\Delta_x$$

$$k = \frac{F}{\Delta_x} \quad 2.6$$

Dimana :

F = gaya (N)

k = kekakuan (N/m)

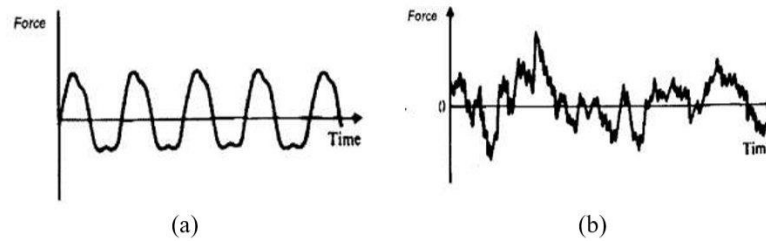
Δ_x = defleksi (m)

2.4 Getaran

Getaran menurut pengertian ilmu fisika merupakan proyeksi gerak melingkar dalam bidang datar yang menghasilkan gerakan bolak-balik atau osilasi pada garis diameter yang selalu melalui pusat lingkaran sebelumnya. Ada dua kemungkinan Garis bolak – balik, osilasi pada garis horizontal disebut osilasi getaran longitudinal dan osilasi pada garis horizontal disebut osilasi getaran transversal. berikut beberapa jenis klasifikasi getaran, antara lain (Karyasa, 2011) :

- 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 nonlinier. 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.

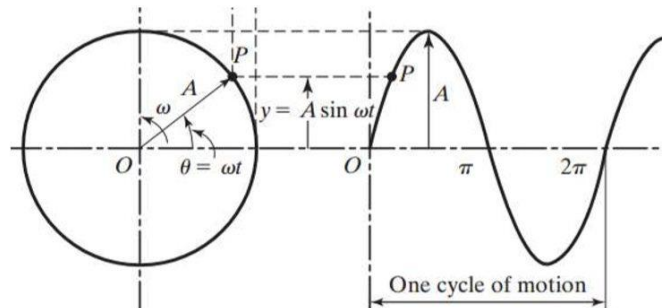


(a) Getaran Deterministik; (b) Getaran Random

Gambar 2.13 Contoh eksitasi getaran deterministik dan random (sumber: Karyasa, 2011)

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

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



Gambar 2.14 Ilustrasi siklus pergerakan getaran (Sumber: Rao, 2011)

- b. Amplitudo (A) adalah perpindahan terjauh dari benda yang bergetar seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.14.
- c. Periode (T) adalah waktu yang diperlukan untuk melakukan satu siklus.

$$T = \frac{t}{n} \quad 2.7$$

Dimana:

n = jumlah siklus

t = waktu (s)

- d. 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)

$$f = \frac{n}{t} \quad 2.8$$

Dimana τ_d pada saat pengukuran memiliki satuan milidetik (ms), maka:

$$f = \frac{n \cdot 1000}{t} \quad 2.9$$

Dimana:

n = jumlah siklus

t = waktu (s)

- 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)

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad 2.10$$

$$f_n = \frac{1}{T} \quad 2.11$$

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad 2.12$$

Dimana:

ω_n = frekuensi natural (rad/s)

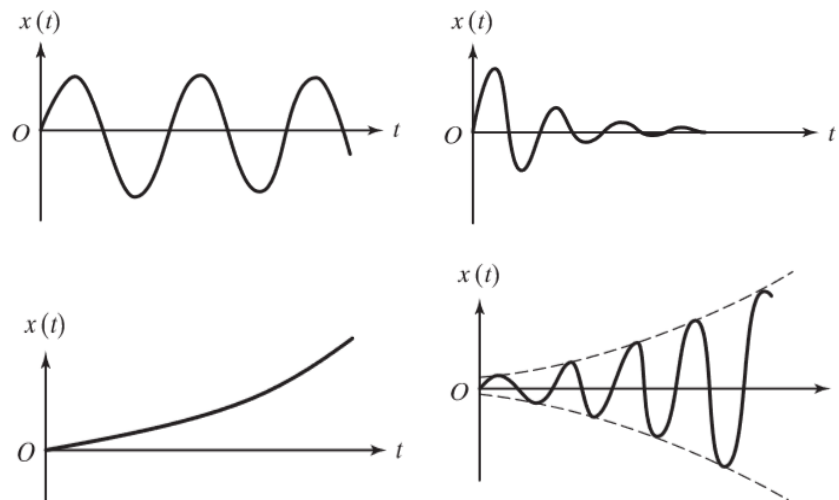
f_n = frekuensi natural (Hz)

k = kekakuan/konstanta pegas (N/m)

m = massa *bluff body* (kg)

2.5 Stabilitas Sistem

Stabilitas adalah salah satu karakteristik paling penting untuk sistem bergetar apa pun. Kestabilan merupakan definisi untuk sistem linear dan waktu-invarian (yaitu sistem yang parameternya m , c , dan tidak berubah terhadap waktu). Suatu sistem didefinisikan sebagai stabil dalam literatur kontrol jika respons bebasnya nol ketika waktu mendekati tak terhingga. Suatu sistem dianggap tidak stabil jika respons getarannya tumbuh tanpa batas (mendekati tak terhingga) ketika waktu mendekati tak terhingga. Akhirnya, jika sistemnya adalah respons getaran bebas, maka tidak akan meluruh atau tumbuh, tetapi tetap konstan.

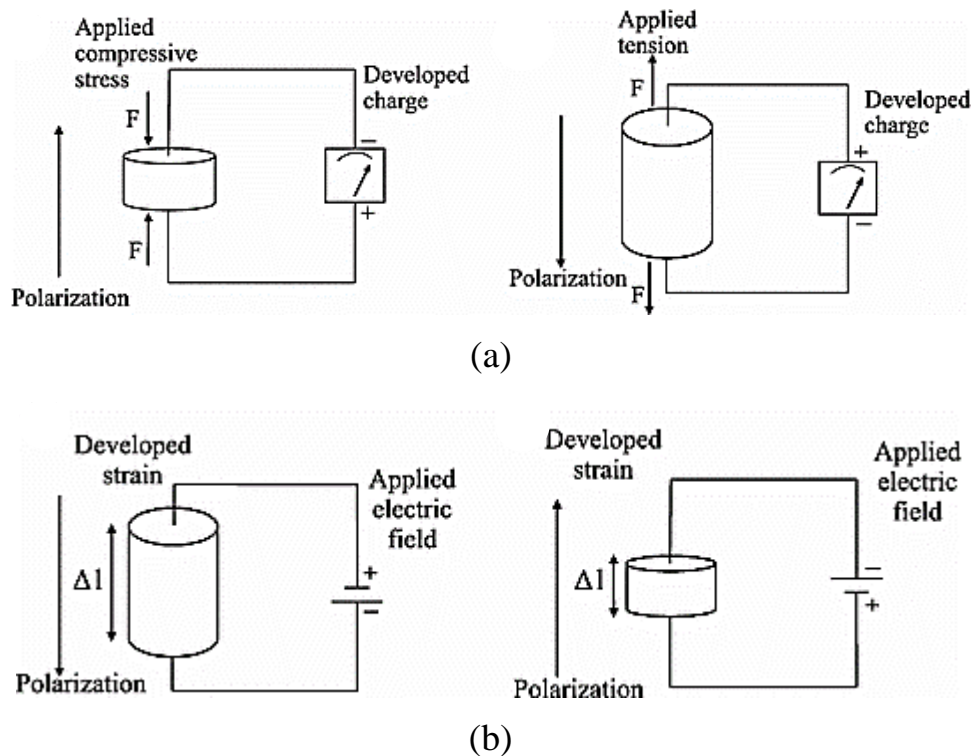


(a) Sistem stabil; (b) sistem stabil asimtotik; (c) sistem tidak stabil; (d) sistem tidak stabil

Gambar 2.15 Gelombang sistem stabil dan tidak stabil (sumber: Rao, 2011)

2.6 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* sebagaimana yang dijelaskan pada Gambar 2.16, 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 2.16 Skema 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	Energi Level
Getaran	Piezoelektrik	100 mW/cm ³
	Elektromagnetik	0,5 – 8 Mw/cm ³
	Elektrostatik	8 nW – 42,9 μW/cm ³
Cahaya	Fotovoltaik (luar ruangan)	100mW/cm ²
	Fotovoltaik (dalam ruangan)	100 μW/cm ²
Radiasi lingkungan	Frekuensi radio	≤ 1 mW/cm ²
Angin	Turbin	200 – 800 μW/cm ²

Panas	<i>Thermoelectric, thermionic, Thermo-tunnelling</i>	60 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
-------	--	------------------------------

2.7 *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):

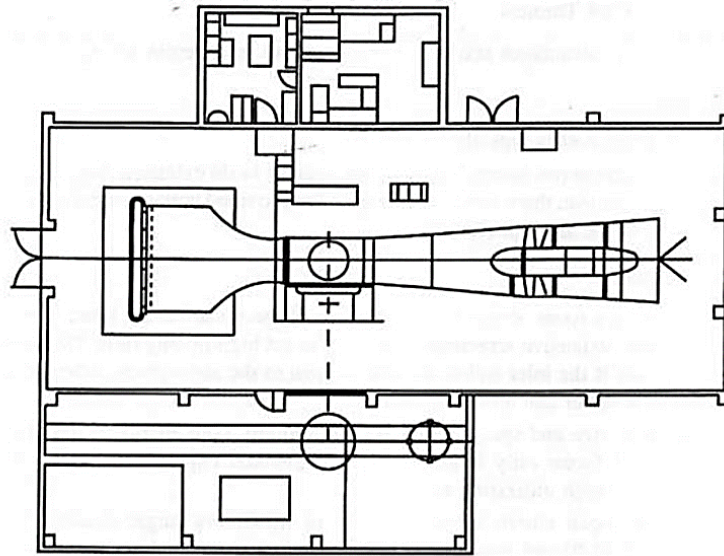
2.7.1 *Open Circuit/Open Return Wind Tunnel*

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

- a. Biaya pembuatan yang rendah
- b. 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:

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



Gambar 2.17 *Open circuit/open return wind tunnel* (Sumber: Barlow dkk., 1999)

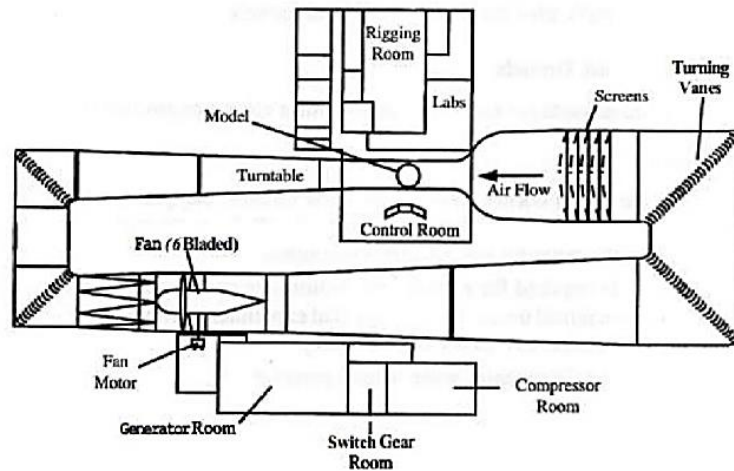
2.7.2 *Close Circuit/Close Return Wind Tunnel*

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

- 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:

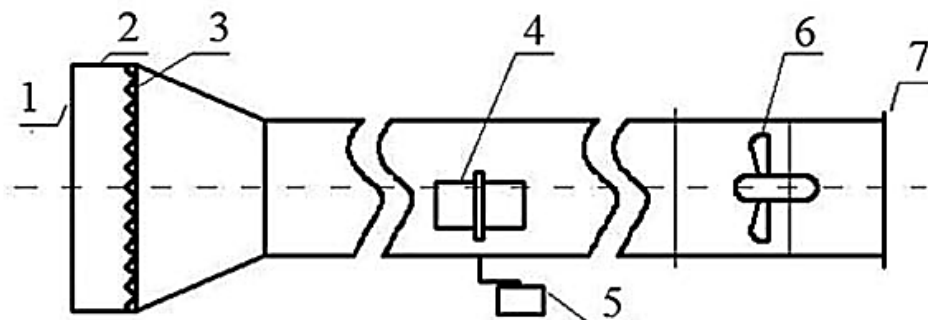
- a. Memerlukan biaya yang lebih tinggi karena terdapat saluran dan kipas tambahan untuk mengembalikan aliran udara.
- b. Perlu adanya pembersihan pada *wind tunnel* apabila penelitian menggunakan visualisasi.
- c. Memerlukan pendingin apabila digunakan dalam waktu yang lama.



Gambar 2.18 *Close circuit/close return wind tunnel* (Sumber: Barlow dkk., 1999)

2.7.3 Skema *Open circuit wind tunnel* skala kecil

Sun dkk. (2019) meneliti Turbin angin vertikal dengan menggunakan media *wind tunnel*. Ukuran penampang bagian uji terowongan angin adalah 1,8m panjang \times 1,8m lebar \times 1,2m tinggi dan kecepatan angin rata-rata yang dapat dicapai berkisar antara 0,5 hingga 22 m / detik. Gambar 2.19 adalah diagram skematik dari *wind tunnel* yang digunakan untuk pengukuran. Dalam percobaannya, spesifikasi *wind tunnel* dapat memberikan aliran yang seragam untuk bagian *test section* pada rentang kecepatan aliran yang berbeda. Karena penggunaan layar dan sarang lebah sebagai perangkat pengkondisian aliran, intensitas turbulensi di bagian *test section* kosong kurang dari 0,5%.



Gambar 2.19 Skema *wind tunnel* (Sumber: Sun dkk., 2017)

1. Layar pengkondisian aliran dan *honeycomb*
2. Kolektor dengan lancar mempercepat aliran udara
3. Pelurus menghilangkan turbulensi dari udara yang masuk

4. Model turbin ditempatkan di bagian uji terowongan angin
5. Sistem elektronik dirancang untuk menguji kinerja model turbin yang diusulkan
6. Kipas menarik udara melalui terowongan
7. Layar dan *honeycomb*

2.8 Hipotesis

Berdasarkan kajian pustaka di atas, hipotesis yang dapat diambil adalah pada *Vortex Induced Vibration* dengan variasi jari-jari sudut *bluff body* tidak berpengaruh terhadap kestabilan osilasi karena bentuk *bluff body* simetri. *Bluff body* dengan jari-jari sudut besar akan memberikan *starting* osilasi pada kecepatan angin yang lebih tinggi. Bentuk *bluff body* yang mampu menghasilkan getaran besar adalah *bluff body* yang memiliki jari-jari sudut kecil. *Bluff body* yang memiliki jari-jari sudut kecil akan membentuk *vortex* yang lebih besar dari pada *bluff body* dengan jari-jari sudut besar, sehingga *bluff body* akan mampu berosilasi pada kecepatan angin yang rendah.

BAB 3. METODE PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Penelitian dilakukan dengan metode eksperimen menggunakan *wind tunnel* untuk mengetahui pengaruh bentuk *bluff body* terhadap getaran mekanik yang diinduksikan oleh *vortex* sebagai penghasil tegangan listrik.

3.2 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Lab Desain Fakultas Teknik dan workshop tim riset mobil listrik di Lembaga Pengabdian Masyarakat (LPM) Universitas Jember. Waktu penelitian dilakukan dalam kurun waktu enam bulan yaitu dimulai dari bulan Desember 2018 sampai dengan bulan Juni 2019.

3.3 Alat dan Bahan Penelitian

3.3.1 Alat

- a. *Oscilloscope (Proscope Parallax USB Oscilloscope)*
Digunakan untuk mengetahui respon tegangan listrik yang dibangkitkan oleh piezoelektrik.
- b. Alat uji bending (*twist and bend testing machine*)
Digunakan untuk mengukur kekakuan batang kantilever dan untuk mengetahui respon frekuensi natural.
- c. Neraca digital 200g x 0,01g
Digunakan untuk mengetahui massa *bluff body* dan kantilever.
- d. Penggaris dan jangka sorong (Wipro 0,02 mm)
Digunakan untuk mengukur defleksi batang kantilever dan dimensi *bluff body* dan batang kantilever.
- e. Anemometer (BENETECH)
Digunakan untuk mengukur kecepatan angin dan temperatur aliran angin di *wind tunnel*.

- f. *Wind tunnel* (test section 30 cm x 30 cm)
Digunakan untuk menguji respon *bluff body* pada kecepatan angin yang bervariasi.

3.3.2 Bahan

- a. Styrofoam *hard*, digunakan sebagai material untuk membuat *bluff body*.
- b. Skotlet, digunakan untuk melapisi *bluff body* agar permukaan lebih rata.
- c. Plastik *polypropylene* (PP), digunakan sebagai batang kantilever.
- d. Piezoelektrik model MEAS LDT0-028K, digunakan sebagai sensor getaran dan sekaligus mengubah getaran menjadi listrik.

3.4 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian berikut digunakan untuk mengetahui pengaruh bentuk *bluff body* terhadap tegangan listrik yang dihasilkan, yaitu dimulai dari :

- a. Studi Literatur
Studi literatur dilakukan untuk memperoleh referensi yang mendukung topik penelitian. Materi yang dipelajari meliputi : getaran mekanik, mekanika fluida, fenomena *Vortex-induced Vibration*, dan analisis struktur khususnya batang kantilever.
- b. Eksperimen
Eksperimen dilakukan dengan tahapan sebagai berikut : mengukur nilai kekakuan batang kantilever, mengukur respon getaran bebas pada batang kantilever, mengukur dimensi *bluff body*, dan melakukan pengujian dengan *wind tunnel* untuk mengetahui respon *bluff body* sebagai penghasil getaran mekanik.
- c. Analisis Hasil Penelitian
Hasil data pengujian variasi bentuk *bluff body* dianalisis untuk mengetahui pengaruh bentuk *bluff body* terhadap frekuensi getaran yang diinduksikan.
- d. Kesimpulan
Kesimpulan diperoleh dari rangkuman hasil penelitian sesuai dengan tujuan penelitian yang telah ditentukan.

3.5 Pelaksanaan Penelitian

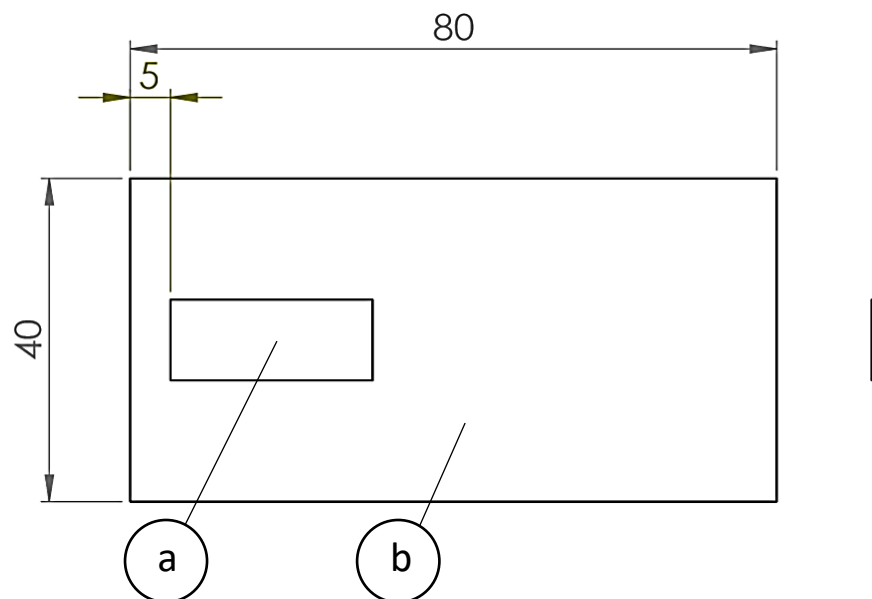
3.5.1 Variabel Penelitian

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

a. Variabel Kontrol

- 1) Massa pemberat = 10 gram
- 2) Dimensi batang kantilever = 80 mm x 40 mm x 0,5 mm
- 3) Posisi piezoelektrik

Piezoelektrik diletakkan di dasar batang kantilever (dekat dengan tumpuan), diharapkan piezoelektrik menerima defleksi maksimal pada saat batang kantilever berosilasi.



Keterangan :

- a. Piezoelektrik
- b. Kantilever

Gambar 3.1 Posisi piezoelektrik pada katilever 10 mm dari tumpuan

b. Variabel Terikat

- 1) Voltase (V)

Hasil tegangan paling besar adalah hasil yang ingin didapat dari pengaruh variabel bebas.

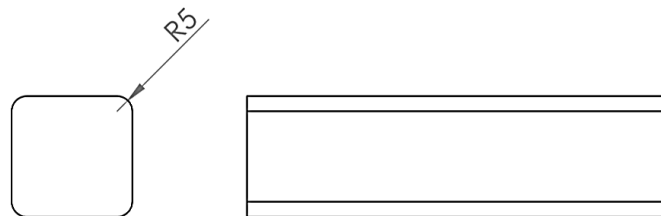
2) Frekuensi

Membuktikan bahwa pengaruh *vortex shedding* akan membuat sistem bergetar dengan frekuensi tertentu.

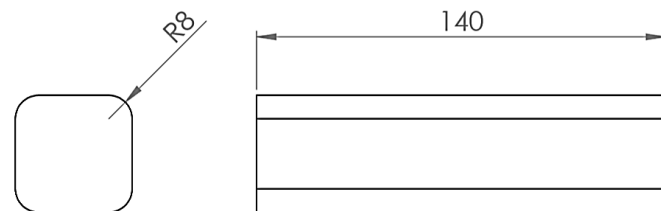
3) Tingkat Resonansi

Mengetahui resonansi terbesar dengan mencari selisih paling kecil antara frekuensi *shedding* dengan frekuensi natural.

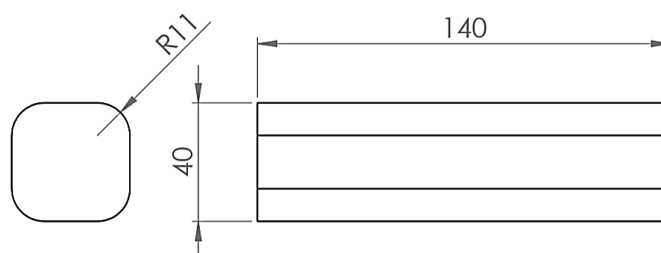
c. Variabel Bebas

1) Variasi bentuk *bluff body*

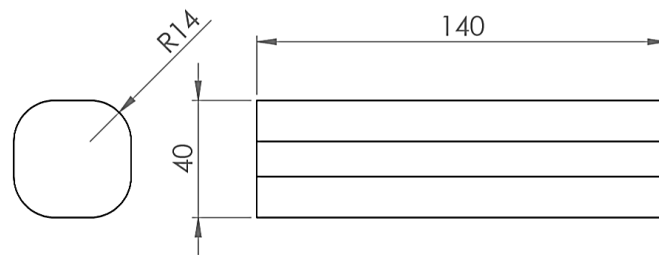
Gambar 3.2 *Bluff body* jari-jari sudut 5 mm



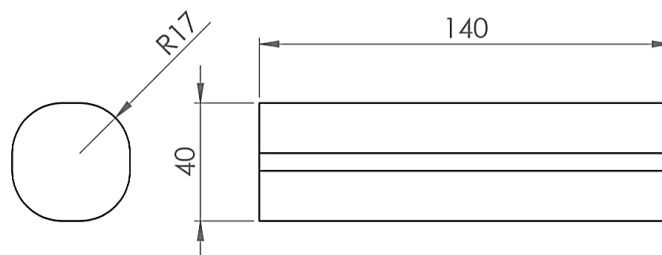
Gambar 3.3 *Bluff body* jari-jari sudut 8 mm



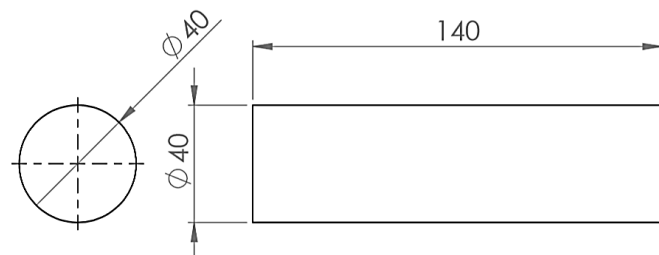
Gambar 3.4 *Bluff body* jari-jari sudut 11 mm



Gambar 3.5 *Bluff body* jari-jari sudut 14 mm



Gambar 3.6 *Bluff body* jari-jari sudut 17 mm



Gambar 3.7 *Bluff body* jari-jari sudut 20 mm

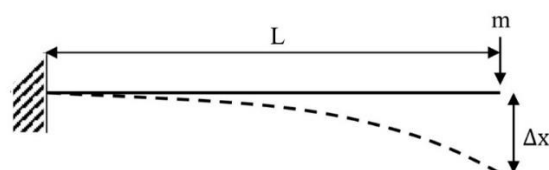
2) Variasi kecepatan angin

Variasi kecepatan angin adalah 0,5m/s, 1m/s, 1,5m/s, 2m/s, 2,5m/s, 3m/s.

3.5.2 Pengambilan Data

a. Pengujian Kekakuan Batang Kantilever

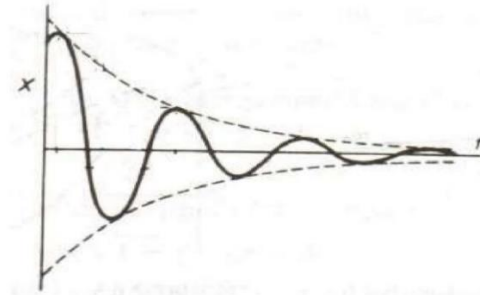
Pengujian nilai kekakuan batang kantilever didapatkan dengan menggunakan hukum hooke,



Gambar 3.8 Pengambilan data kekakuan pada batang kantilever

b. Pengukuran Respons Getaran Bebas

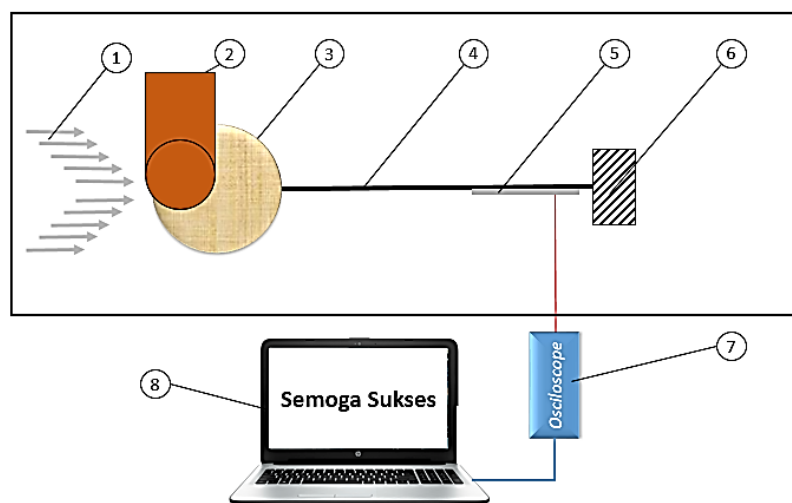
Pengukuran respons getaran bebas dilakukan untuk mendapatkan nilai frekuensi natural pada batang kantilever secara aktual.



Gambar 3.9 Respons getaran bebas pada batang kantilever

c. Pengujian Dengan *Wind Tunnel*

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



Keterangan :

1. Arah angin
2. Anemometer
3. *Bluff body*
4. Kantilever
5. Piezoelektrik
6. Tumpuan jepit
7. Laptop
8. *Oscilloscope*

Gambar 3.10 Skema pengujian pada *wind tunnel*

d. Pengolahan Data

Hasil pengujian dalam *wind tunnel* diolah dengan Ms. Exel untuk mempermudah melakukan perhitungan dan membuat grafik. Hasil data akan dimasukkan dalam tabel yang dicontohkan pada Tabel 3.1 dan 3.2. Percobaan akan dilakukan pengulangan sebanyak 5x pengulangan.

Tabel 3.1 Tabel hasil data kecepatan, tegangan puncak, dan frekuensi

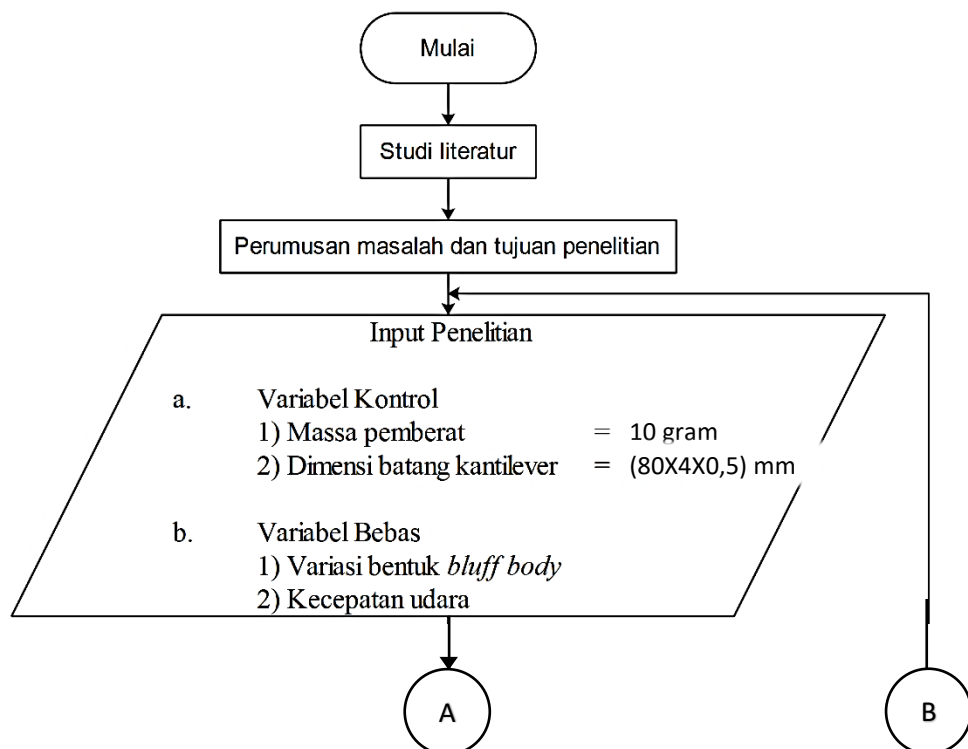
<i>Bluff Body</i>	Percobaan ke-n		
	Kecepatan	Tegangan	Frekuensi
Jari-jari sudut 5 mm			
Jari-jari sudut 8 mm			
Jari-jari sudut 11 mm			
Jari-jari sudut 14 mm			
Jari-jari sudut 17 mm			
Jari-jari sudut 20 mm			

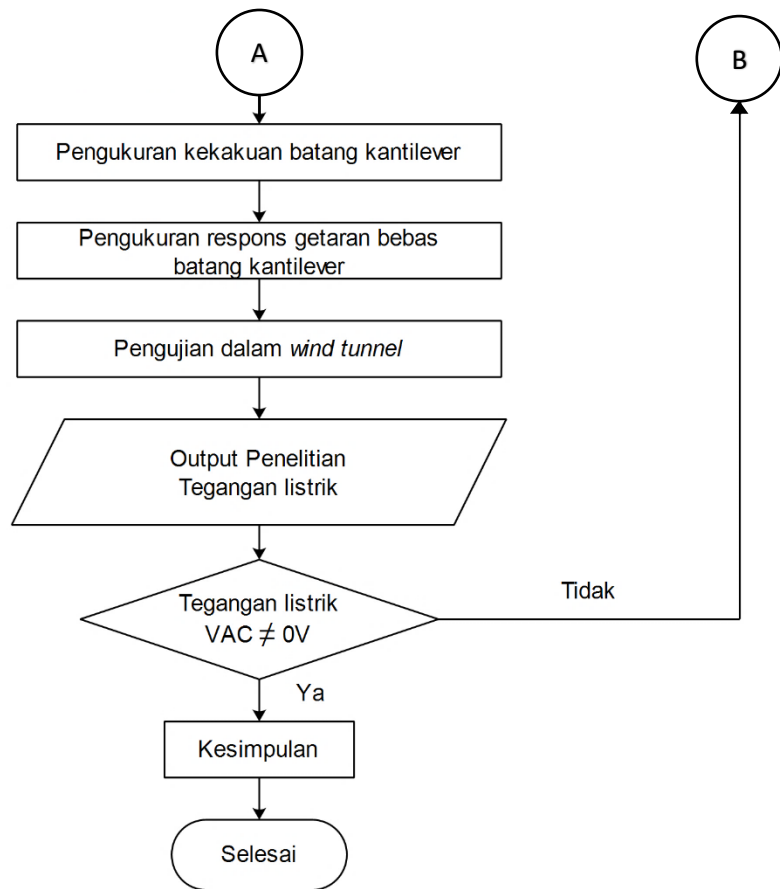
Tabel 3.2 Tabel data pengujian dengan propscope

Waktu	Tegangan

3.6 Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini diawali dengan mengumpulkan studi literatur sehingga dapat diambil sebagai perumusan masalah dan tujuan penelitian. Variabel-variabel penelitian dimasukkan untuk mendapatkan hasil penelitian sesuai keinginan. Selanjutnya dilakukan pengukuran kekakuan dan juga respon getaran bebas kantilever yang terhubung dengan *bluff body* yang berfungsi untuk mengetahui tingkat resonansi dari hasil pengujian dengan membandingkan frekuensi natural sistem dengan frekuensi getaran. Pengujian di dalam *wind tunnel* dilakukan dengan mengamati osilasi *bluff body* dan *output* tegangan dari *oscilloscope*. jika tegangan *outout* di *oscilloscope* $\neq 0$ berarti telah terjadi osilasi pada *bluff body* maka penelitian dilanjutkan dengan menarik kesimpulan dari hasil penelitian beberapa variabel. Alur penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.11.





Gambar 3.11 Diagram alir penelitian.

BAB 5. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan penelitian pengaruh jari-jari sudut *bluff body* terhadap getaran kantilever pada sistem *vortex induced vibration* adalah :

1. Jari-jari sudut *bluff body* sangat berpengaruh terhadap getaran kantilever yang diinduksikan oleh *vortex* di belakang *bluff body*. Semakin kecil jari-jari sudut *bluff body* semakin besar amplitudo getaran yang dihasilkan. Amplitudo tertinggi diperoleh pada variasi jari-jari sudut *bluff body* 5mm dan berurutan di bawahnya adalah jari-jari sudut 8 mm, 11 mm, 14 mm, 17 mm, dan 20 mm. Semakin besar jari-jari sudut *bluff body* akan membuat bentuk *bluff body* semakin aerodinamis, sehingga *vortex* di belakang *bluff body* akan semakin kecil dan membuat amplitudo getaran yang diinduksikan oleh *vortex* juga akan semakin kecil. Tegangan listrik diperoleh dari *piezo vibration sensor* yang mendefinisikan getaran yang diinduksikan oleh *vortex* di belakang *bluff body*. Semakin besar *peak* gelombang tegangan maka semakin besar pula amplitudo getaran.
2. Hasil penelitian didapat bahwa untuk kestabilan osilasi tidak dipengaruhi oleh jari-jari sudut *bluff body*. Dari grafik hasil penelitian, *bluff body* berosilasi pada area osilasi yang tetap dan tidak tumbuh ataupun berkurang tanpa batas.
3. Jari-jari sudut *bluff body* berpengaruh terhadap resonansi, *bluff body* dengan jari-jari sudut 5 mm dan 8 mm mulai beresonansi di kecepatan angin 0,5 m/s. Semakin kecil jari-jari sudut *bluff body* maka semakin tinggi puncak osilasi *bluff body*. Saat puncak osilasi *bluff body* tinggi, waktu yang dibutuhkan *bluff body* untuk kembali ke posisi awal semakin lama sehingga frekuensi osilasi akan semakin kecil. Tingkat resonansi berbanding lurus dengan frekuensi osilasi, resonansi terbesar di kecepatan angin 3 m/s diperoleh pada variasi jari-jari sudut *bluff body* 17 mm namun tegangan maksimum yang dihasilkan kecil, yaitu 0,00260 V.

5.2 Saran

Pada penelitian yang telah dilakukan memiliki beberapa faktor yang perlu ditingkatkan seperti input kecepatan angin yang lebih tinggi serta diperlukan simulasi *transient flow* dengan *software* untuk melihat visualisasi aliran fluida dengan cara yang lebih mudah. Untuk penelitian berikutnya juga bisa mengembangkan sesuai desain VIVACE dan untuk perencanaan linier generator menggunakan *software* MagNet. *Bluff body* penampang persegi 40 mm x 40 mm dengan jari-jari sudut lebih dari 11 mm memiliki kinerja yang kurang baik dalam menginduksikan getaran. Disarankan untuk mendapatkan *starting* osilasi *bluff body* pada kecepatan angin rendah dan getaran yang besar dapat menggunakan *bluff body* dengan jari-jari 0 mm - 8 mm.

DAFTAR PUSTAKA

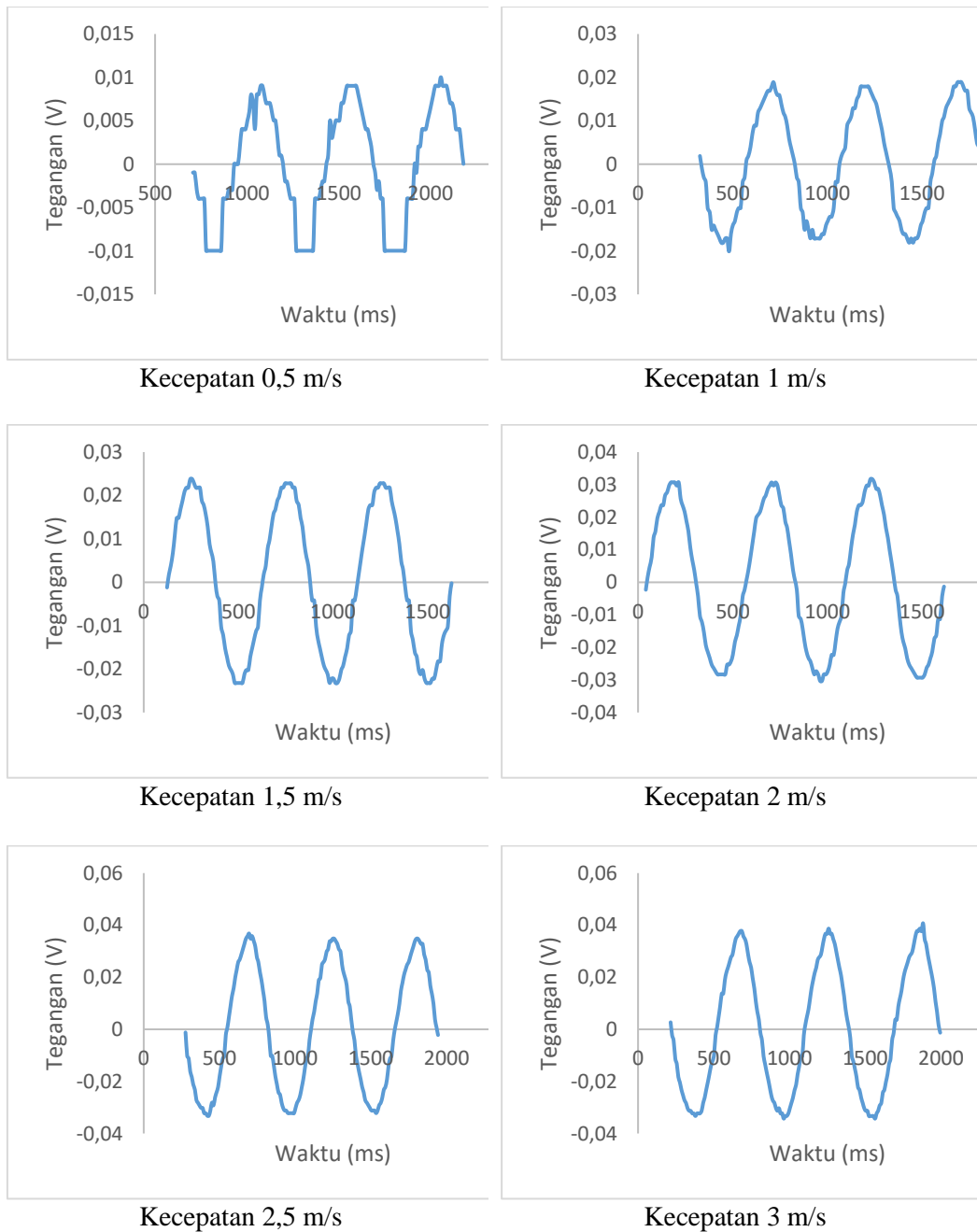
- Akaydin, H. D., N. Elvin dan Y. Andreopoulos. 2012. The Performance of a Selfexcited Fluidic Energy Harvester. *Smart Material and Structures*. 21: 1-13.
- Akaydin, H. D., N. Elvin dan Y. Andreopoulos. 2010. Wake of a cylinder: a paradigm for energy harvesting with piezoelectric materials. *Springer-Verlag*. 49: 291-304.
- Ali, M., M. Arafa, dan M. Elraby. 2013. Energy Harvesting From Wind-induced Vibrations. *International Journal of Scientific & Engineering Research*. 4: 422-432.
- Assi, G. R. S. 2009. Mechanism for Flow-Induced Vibration of Interfering Bluff Bodies. *Tesis*. London: Degree of Doctor of Phylosophy. University of London.
- Blevin, D. R. 2001. *Flow-Induced Vibration*. 2nd ed. Malabar: Krieger Publishing Company.
- Barlow, J. B., W. H. Rae, Jr., A. Pope. 1999. *Low-Speed wind tunnel testing*. 3rd Ed. Canada: A Wiley-Interscience Publication John Wiley & Sons, Inc.
- Bernitsas, M. M., K. Raghavan, Y. Ben-Simon, dan 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: 1-15.
- 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. Sweency dan S. Thomson. 2014. Wind Harvesting via Vortex Induced Vibration. *Skripsi*. Worcester: Degree of Bachelor of Science.
- Cengel, Y. A. dan J. M. Cimbala. 2006. *Fluid Mechanics: Fundamental and Applications*. New York: The McGraw-Hill Companies, Inc.
- Dida, H. P., S. Suparman, dan D. Widhiyanuriyawan. 2016. Pemetaan potensi energi angin di perairan Indonesia berdasarkan data satelit QuikScat dan WindSat. *Jurnal Rekayasa Mesin*. 7(2): 95-101.
- Dey, P., dan A. K. R. Das. 2017. A numerical study on effect of corner radius and Reynolds number on fluid flow over a square cylinder. *Indian Academy of Sciences*. 42(7): 1155-1165

- Dineva, P., D. Gross, R. Muller, T. Rangelov. 2014. Dynamic fracture of piezoelectric materials, solid mechanics and its applications. Chapter 2. *Springer International Publishing Switzerland*. 7-32.
- Eid, M. H. 2004. Vortex Shedding from Single and Tandem Finned Cylinders. *Tesis*. Hamilton: Degree Master of Applied Science. McMaster University.
- Gamayel, A. 2017. Panen energi menggunakan piezoelektrik sistem kantilever dengan penambahan bluff body. *Jurnal Teknik Mesin (JTM)*. 6(4): 273-276
- Karyasa, T. B. 2011. *Dasar – dasar Getaran Mekanik*. Yogyakarta: Penerbit ANDI.
- Kementrian Energi dan Sumber Daya Mineral. 2017. *Statistik Ketenagalistrikan 2016*. Edisi No. 30 Tahun Anggaran 2017. Jakarta: Direktorat Jendral Ketenagalistrikan.
- Kim, H. S., J. H. Kim, dan J. Kim. 2011. A review of piezoelectric energy harvesting based on vibration. *International Journal Of Precision Engineering And Manufacturing*. 12(6): 1129-1141.
- Kumar, R. A., C. H. Sohn, dan B. H. L. Gowda. 2008. Passive Control of Vortex-Induced Vibrations. *Resent Patents on. Mechanical Engineering*. Kyungpook National University.
- Lienhard, J. H. 1966. *Synopsis of Lift, Drag, and Vortex Frequency Data for Rigid Circular Cylinders*. Pullman: Technical Extension Service.
- Lentera Angin Nusantara. 2014. *Pengenalan Teknologi Pemanfaatan Energi Angin*. Tasikmalaya: Penerbit Lentera Angin Nusantara.
- Leckie, F. A., dan D. J. D. Bello. 2009. *Strength and Stiffness of Engineering Systems*. New York: Springer Science+Business Media, LLC.
- Ma'arif, S. 2018. Pengaruh Kekakuan (Stiffness) Kantilever dan Orientasi Bluff Body Terhadap Tegangan Listrik Pada Vortex-Induced Vibration Tenaga Bayu. *Skripsi*. Jember: Fakultas Teknik Universitas Jember.
- Orianto, M. dan W. A. Pratikto. 1989. *Mekanika Fluida I*. Edisi Pertama. Yogyakarta: Penerbit BPFE-YOGYAKARTA.
- Rafique, S. 2018. Piezoelectric Vibration Energy Harvesting Modeling & Experiments. Switzerland: *Springer International Publishing AG*
- Rao, S. S. 2011. *Mechanical Vibrations*. 5nd Ed. Upper Saddle River: Pearson Education, Inc.

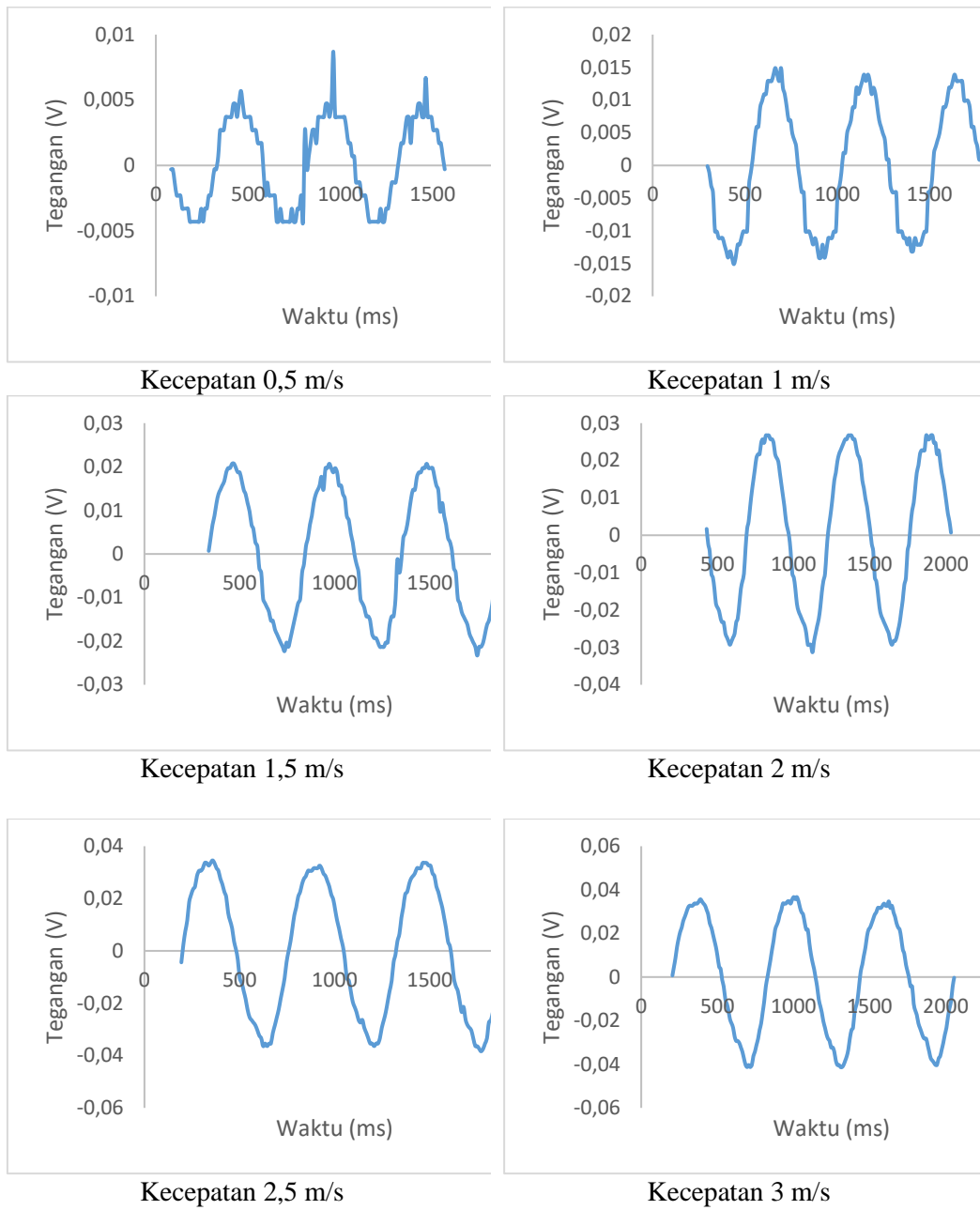
- Sirohi, J., dan R. Mahadik. 2011. Piezoelectric wind energy harvester for low-power sensors. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 22(18): 2215–2228.
- Sugita, I. W., dan M. A. A. Dzaky. 2017. Analisis geometri peluru terhadap nilai drag coefficient pada kecepatan 304,8 m/s. *Jurnal Konversi Energi dan Manufaktur UNJ*. 2: 99-107
- Sun, X., Z. Cao, Y. Zhuang, D. Huang, dan Y. Chao. 2017. Numerical modeling and optimization of a power augmented S-type vertical axis wind turbine. *International Journal of Green Energy*. 14(6): 540-546
- Thomson, W. T. dan M. D. Dahleh. 2005. *Theory and Vibration with Applications*. 5nd Ed. Beijing: Pearson Education Asia Limited and Tsinghua University Press.
- Wind Europe. 2018. *Wind In Power 2017: Annual Combined Onshore and Offshore Wind Energy Statistics*. Eropa: Wind Europe
- 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

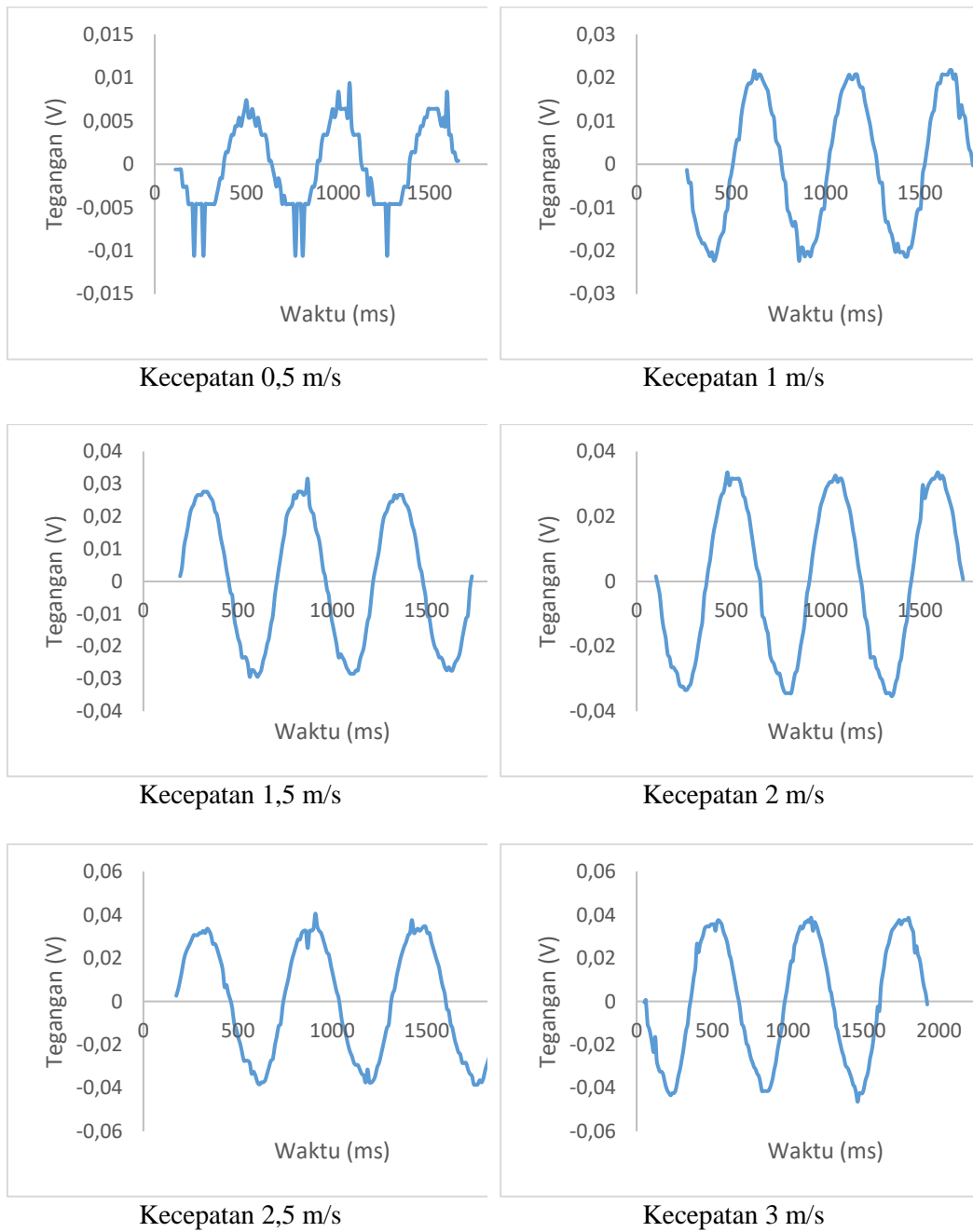
Lampiran 6.1 Tegangan *output* piezoelektrik disetiap pengujian *bluff body* di *wind tunnel*



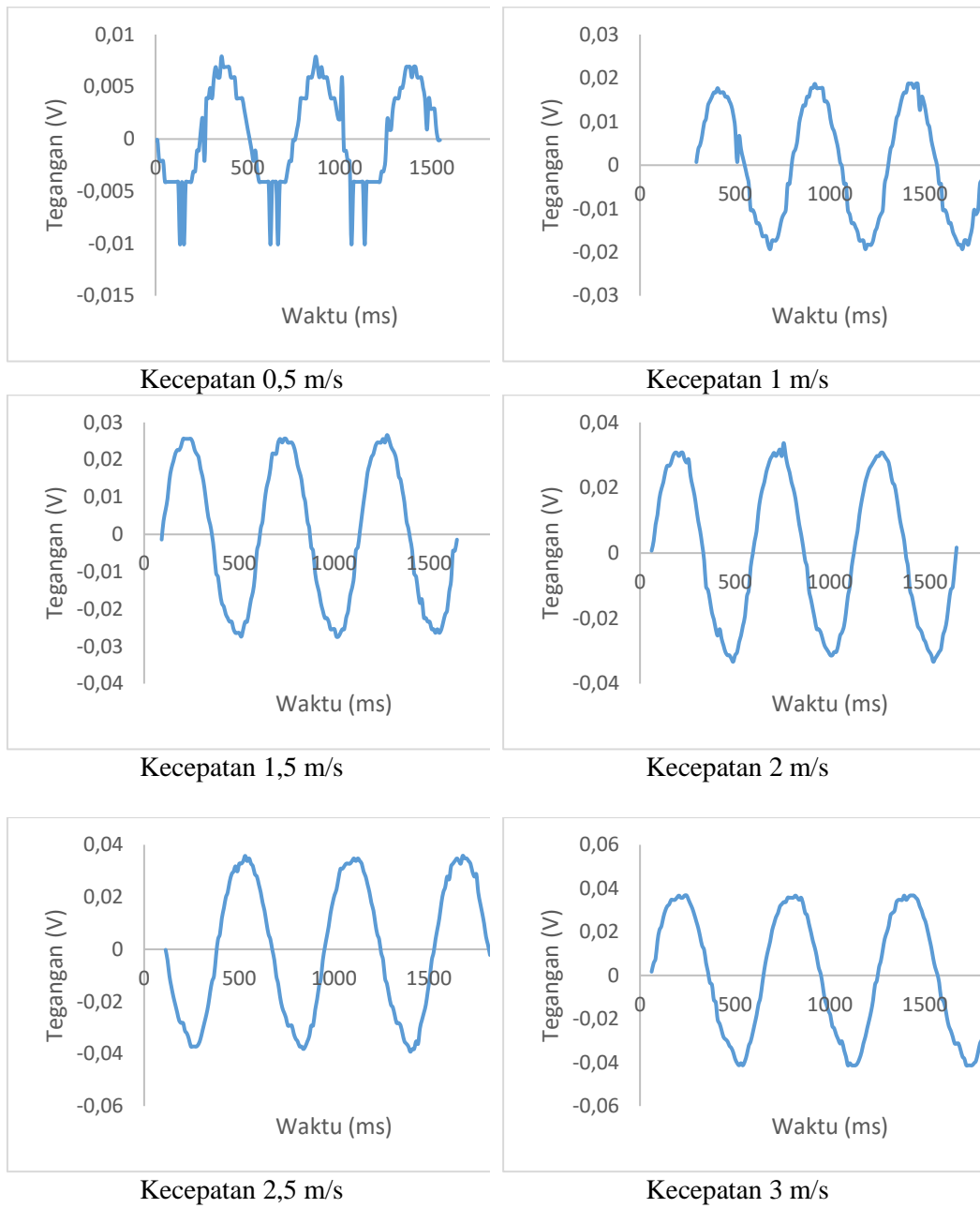
Grafik tegangan *output bluff body* jari-jari sudut 5mm pengulangan 1



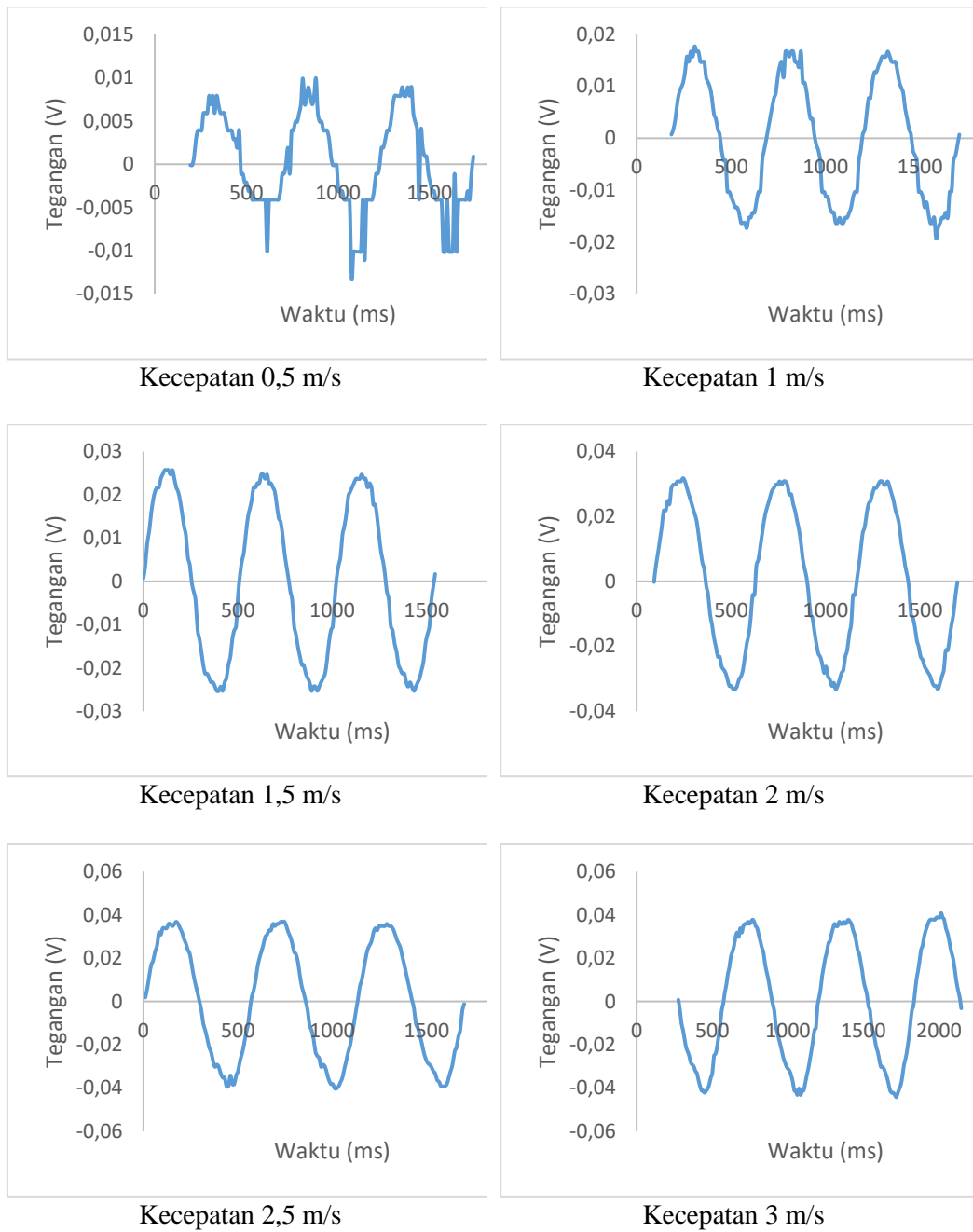
Grafik tegangan *output bluff body* jari-jari sudut 5mm pengulangan 2



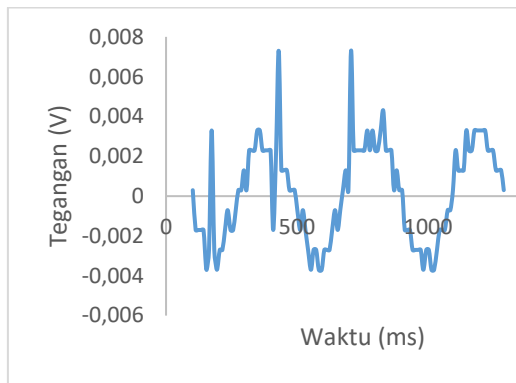
Grafik tegangan *output bluff body* jari-jari sudut 5mm pengulangan 3



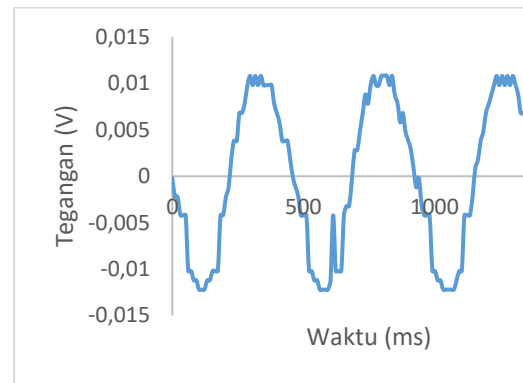
Grafik tegangan *output bluff body* jari-jari sudut 5mm pengulangan 4



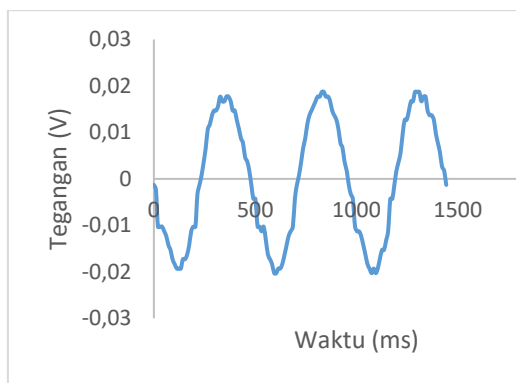
Grafik tegangan *output bluff body* jari-jari sudut 5mm pengulangan 5



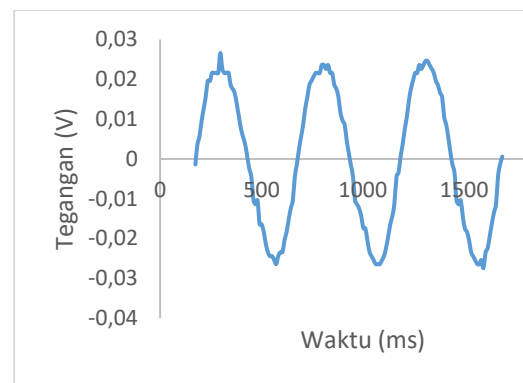
Kecepatan 0,5 m/s



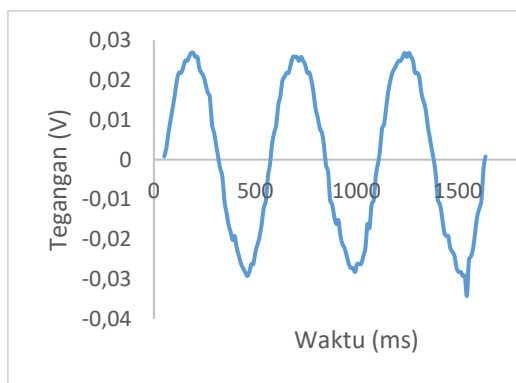
Kecepatan 1 m/s



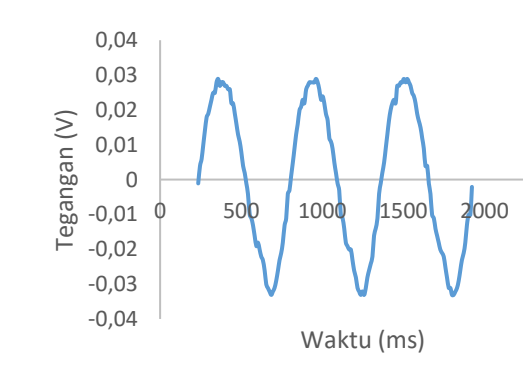
Kecepatan 1,5 m/s



Kecepatan 2 m/s

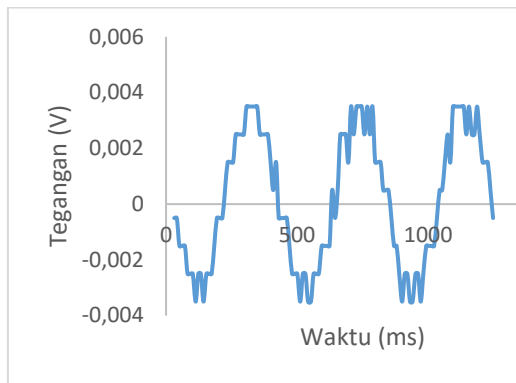


Kecepatan 2,5 m/s

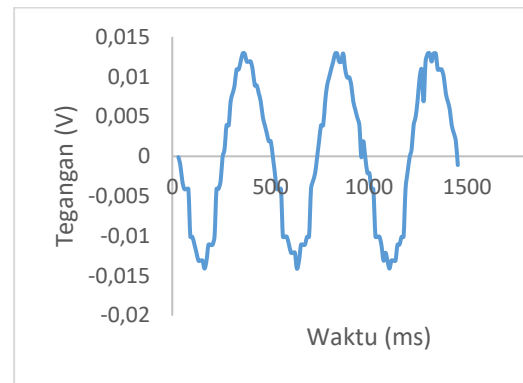


Kecepatan 3 m/s

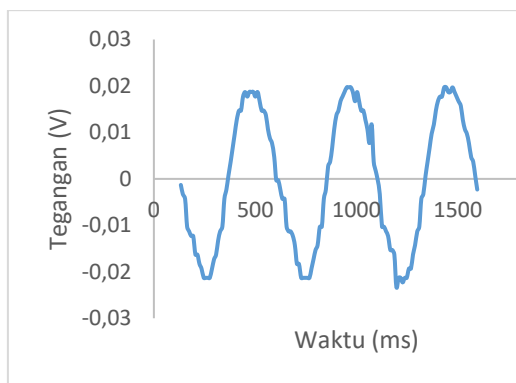
Grafik tegangan *output bluff body* jari-jari sudut 8mm pengulangan 1



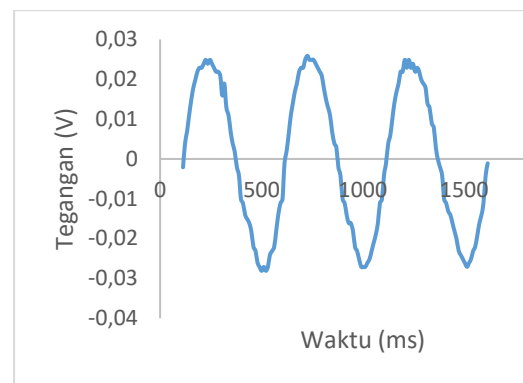
Kecepatan 0,5 m/s



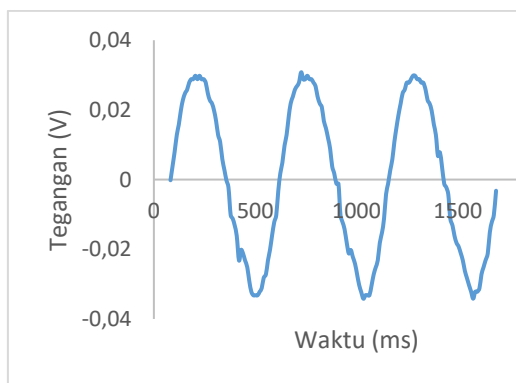
Kecepatan 1 m/s



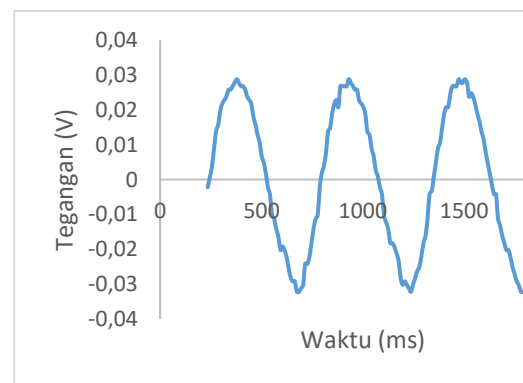
Kecepatan 1,5 m/s



Kecepatan 2 m/s

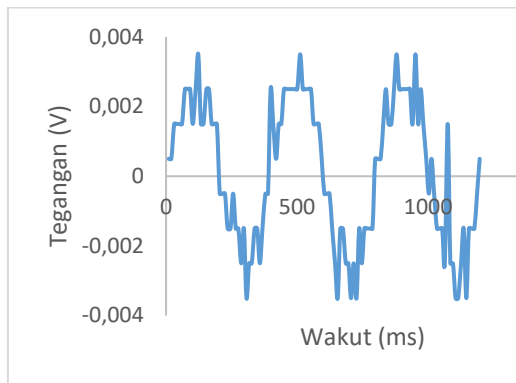


Kecepatan 2,5 m/s

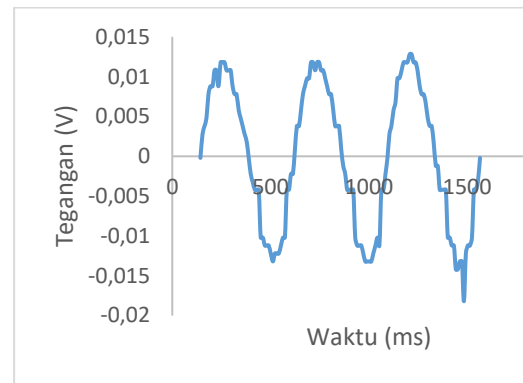


Kecepatan 3 m/s

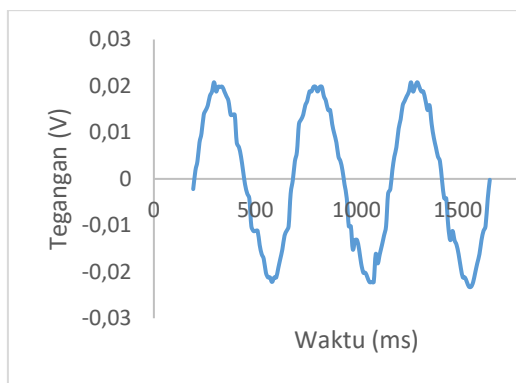
Grafik tegangan *output bluff body* jari-jari sudut 8mm pengulangan 2



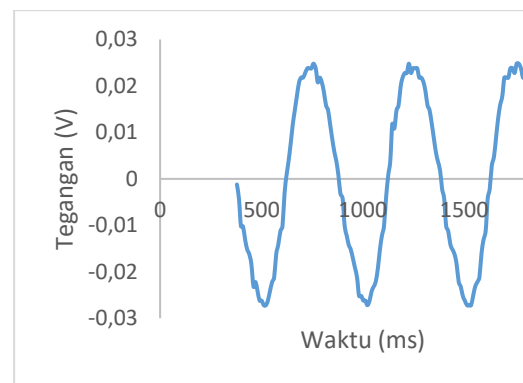
Kecepatan 0,5 m/s



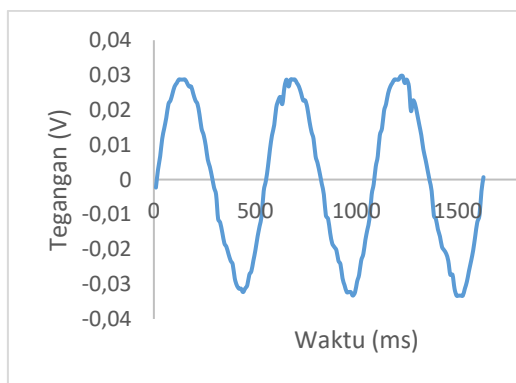
Kecepatan 1 m/s



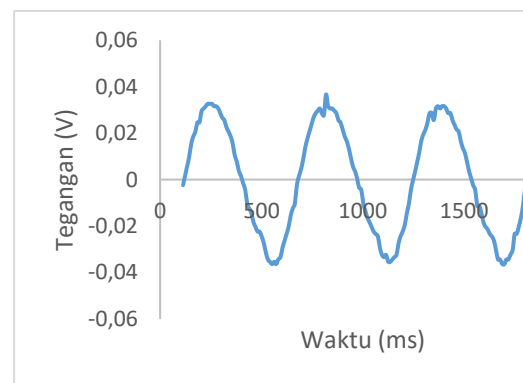
Kecepatan 1,5 m/s



Kecepatan 2 m/s

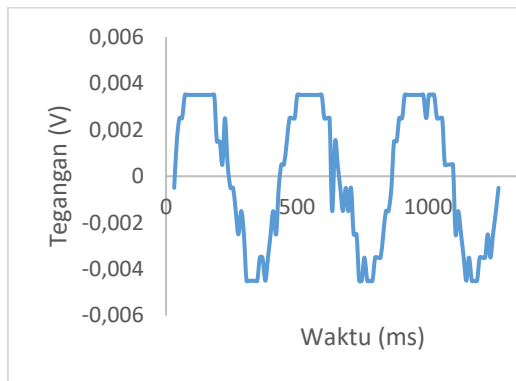


Kecepatan 2,5 m/s

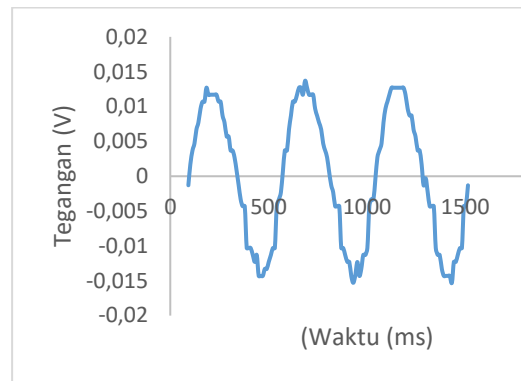


Kecepatan 3 m/s

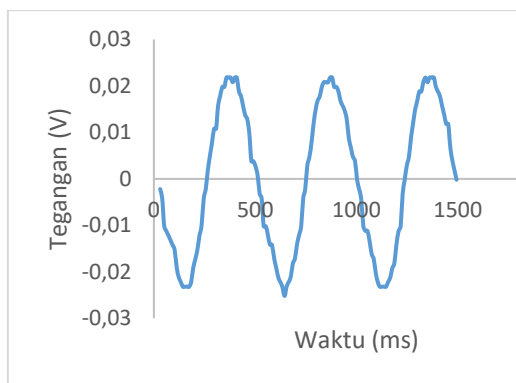
Grafik tegangan *output bluff body* jari-jari sudut 8mm pengulangan 3



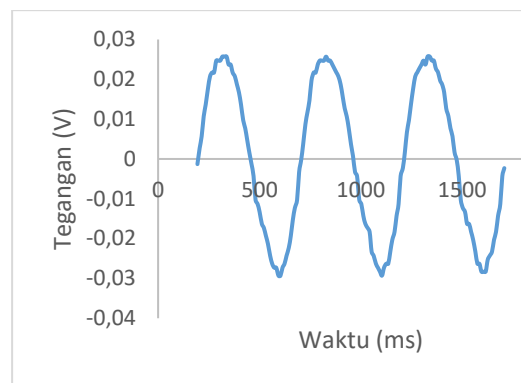
Kecepatan 0,5 m/s



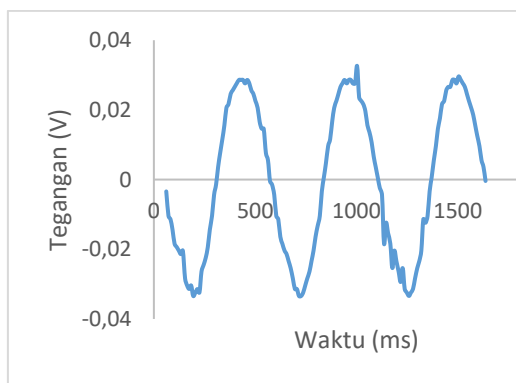
Kecepatan 1 m/s



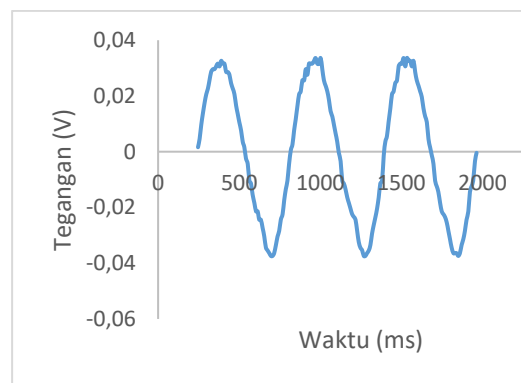
Kecepatan 1,5 m/s



Kecepatan 2 m/s

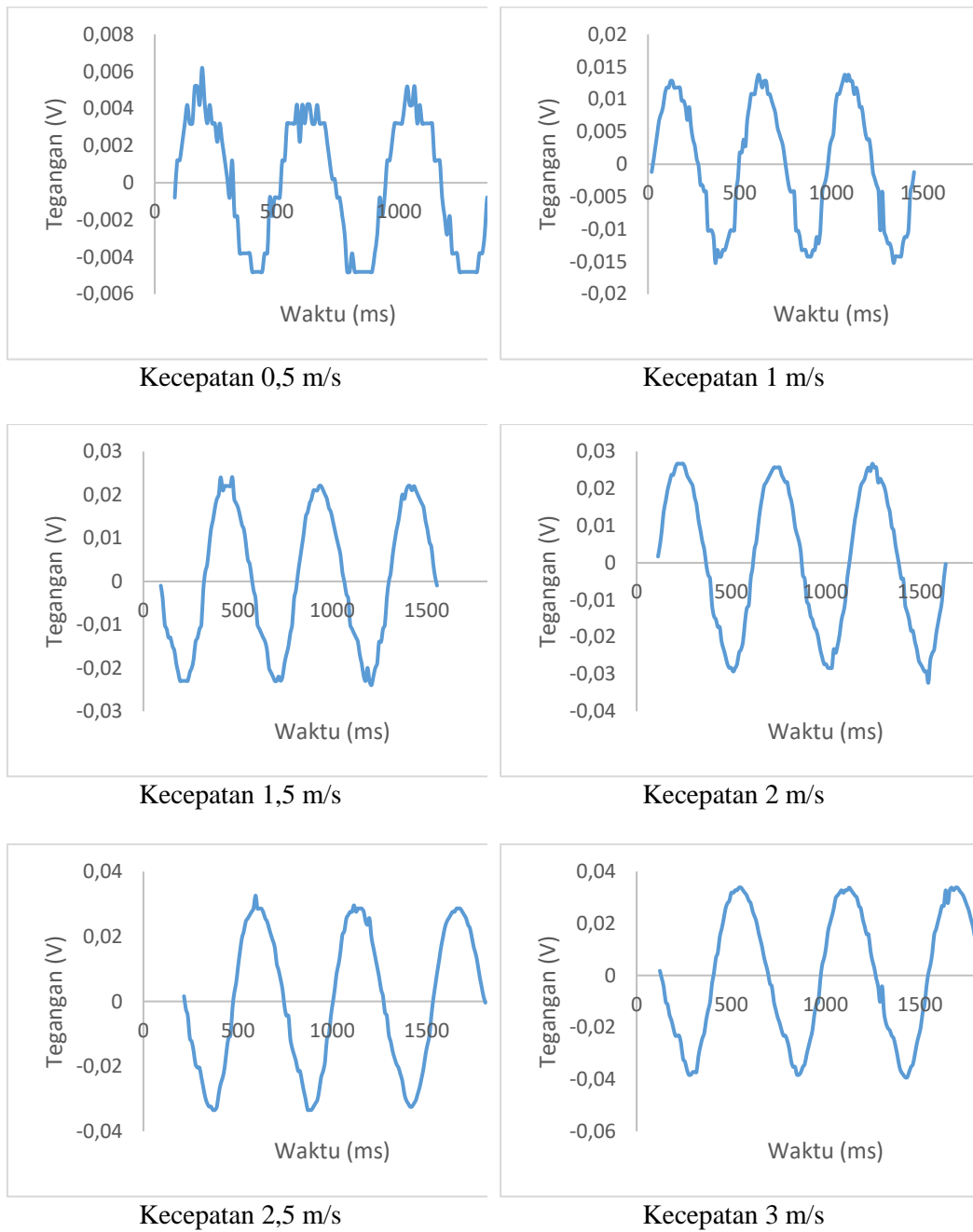


Kecepatan 2,5 m/s

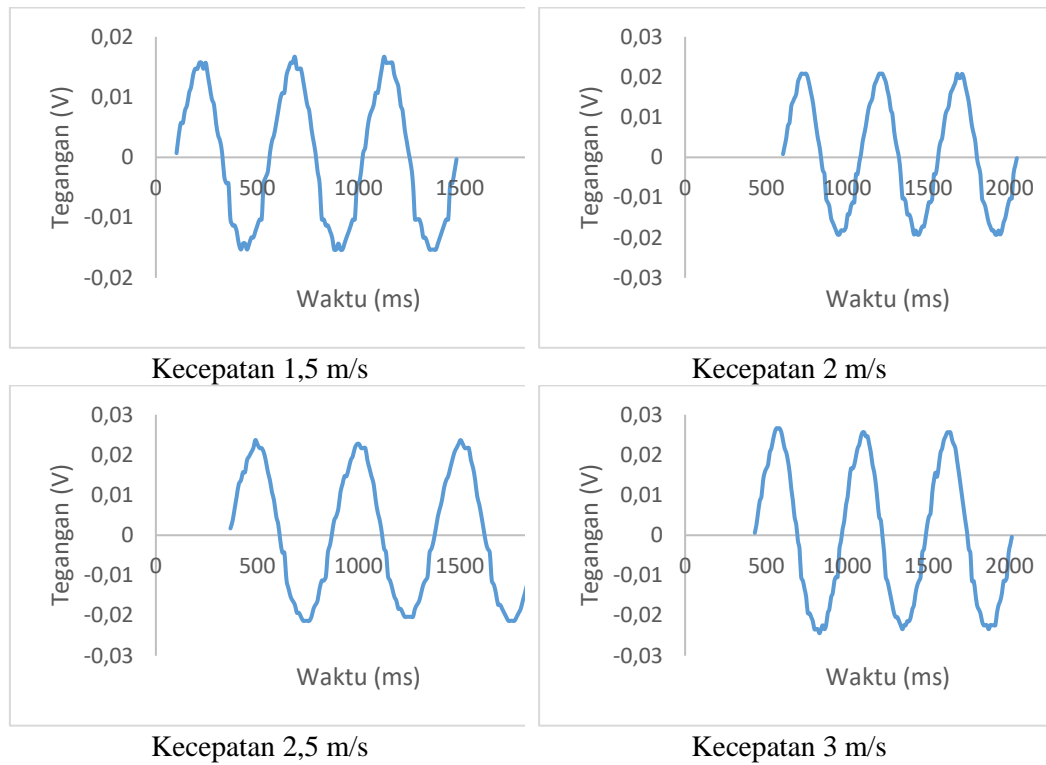


Kecepatan 3 m/s

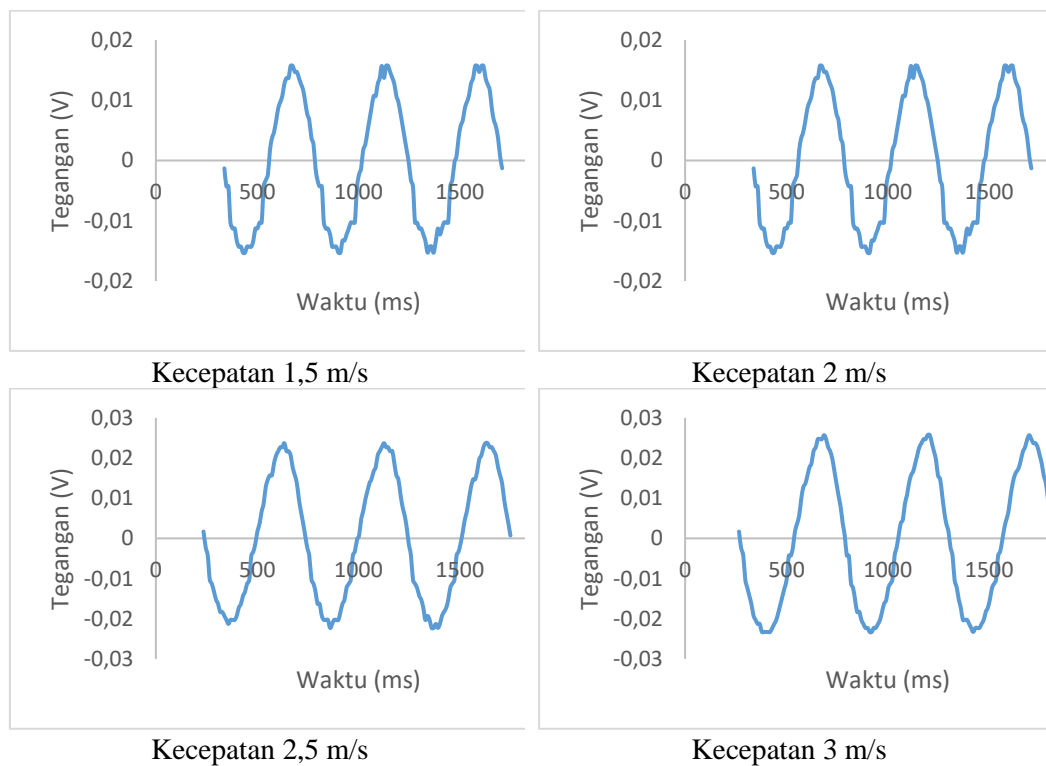
Grafik tegangan *output bluff body* jari-jari sudut 8mm pengulangan 4



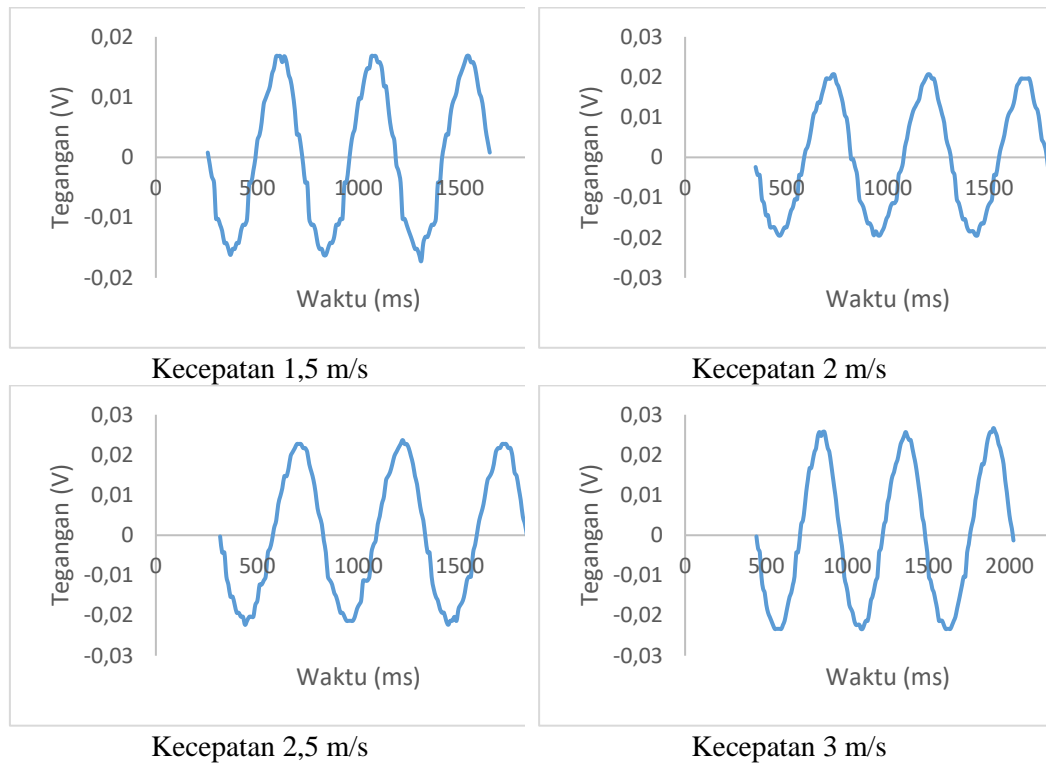
Grafik tegangan *output bluff body* jari-jari sudut 8mm pengulangan 5



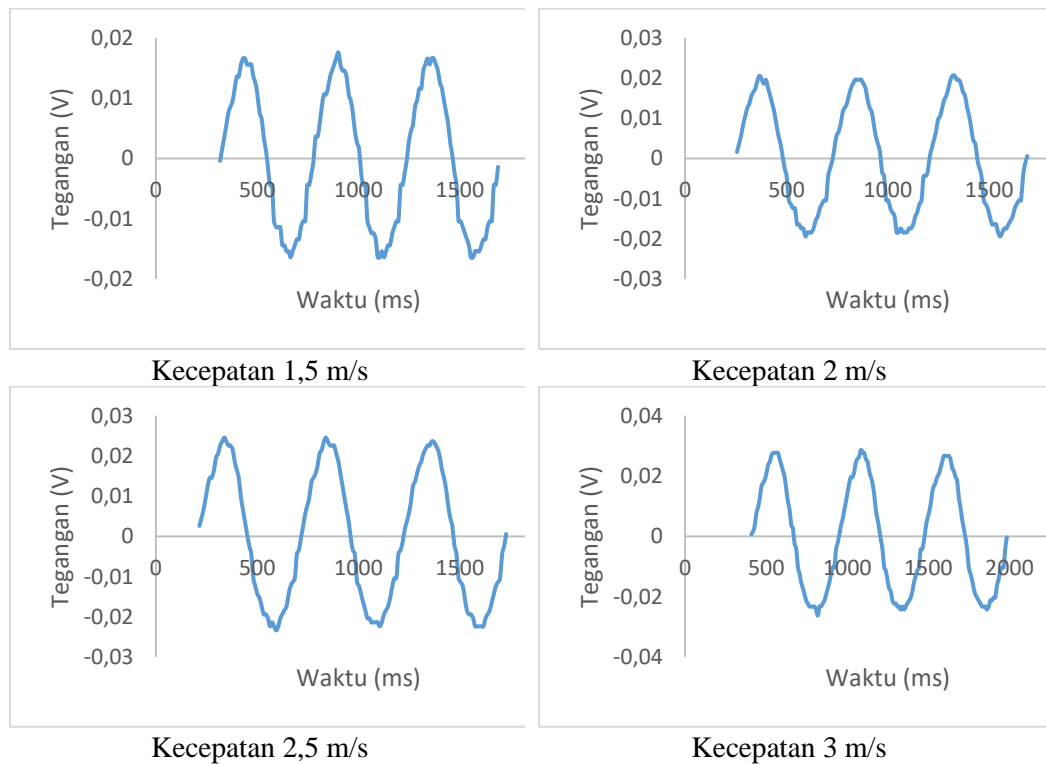
Grafik tegangan *output bluff body* jari-jari sudut 11mm pengulangan 1



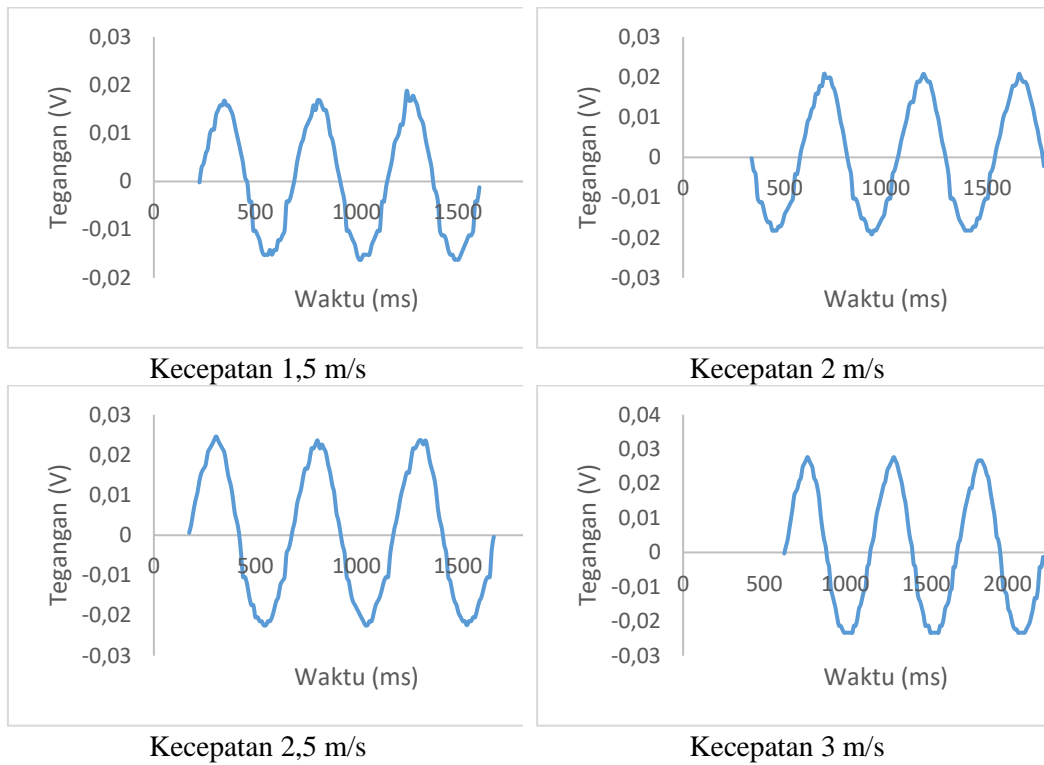
Grafik tegangan *output bluff body* jari-jari sudut 11mm pengulangan 2



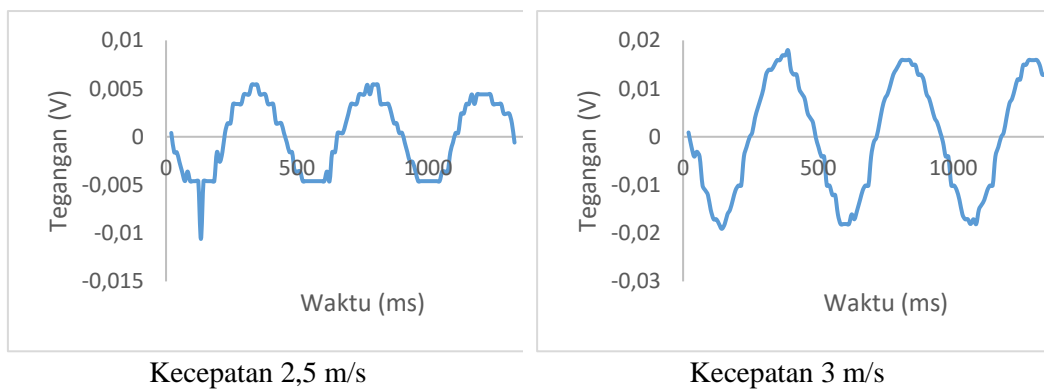
Grafik tegangan *output bluff body* jari-jari sudut 11mm pengulangan 3



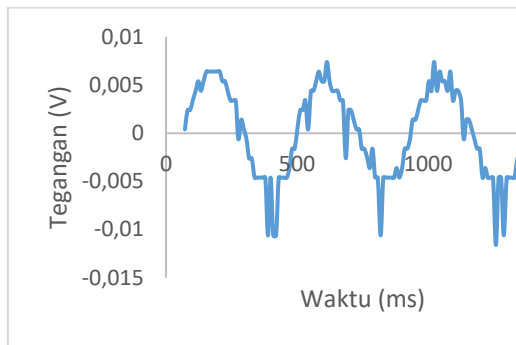
Grafik tegangan *output bluff body* jari-jari sudut 11mm pengulangan 4



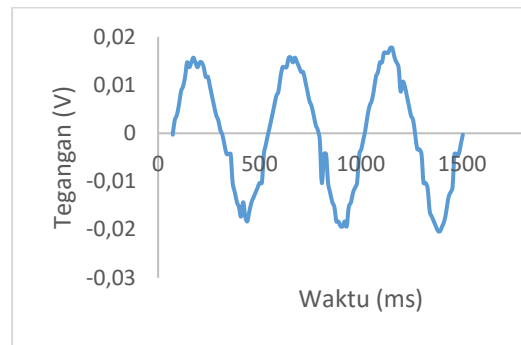
Grafik tegangan *output bluff body* jari-jari sudut 11mm pengulangan 5



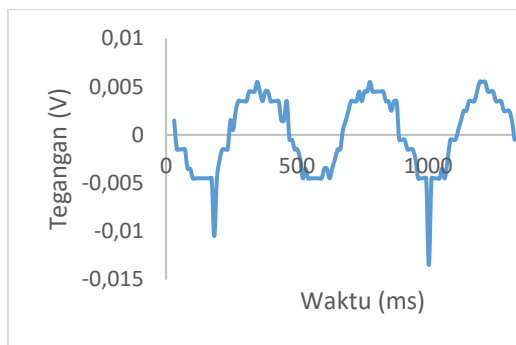
Grafik tegangan *output bluff body* jari-jari sudut 14mm pengulangan 1



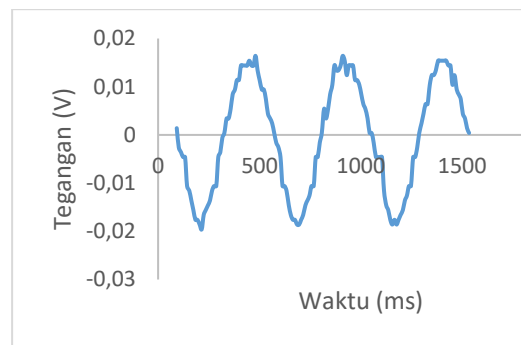
Kecepatan 2,5 m/s



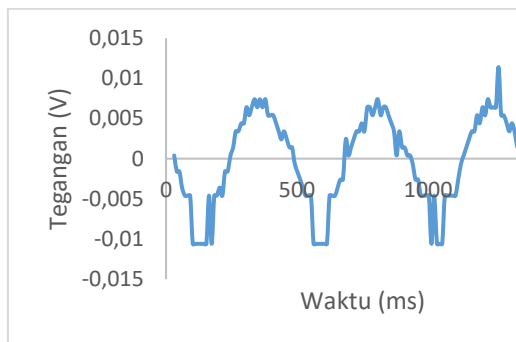
Kecepatan 3 m/s

Grafik tegangan *output bluff body* jari-jari sudut 14mm pengulangan 2

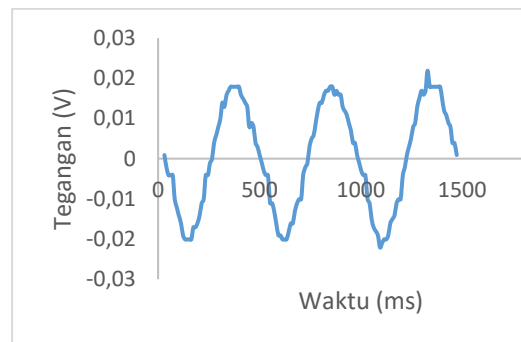
Kecepatan 2,5 m/s



Kecepatan 3 m/s

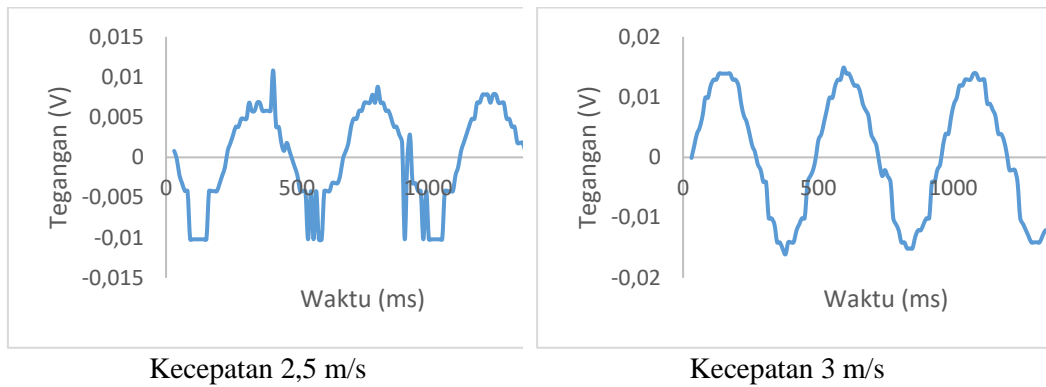
Grafik tegangan *output bluff body* jari-jari sudut 14mm pengulangan 3

Kecepatan 2,5 m/s

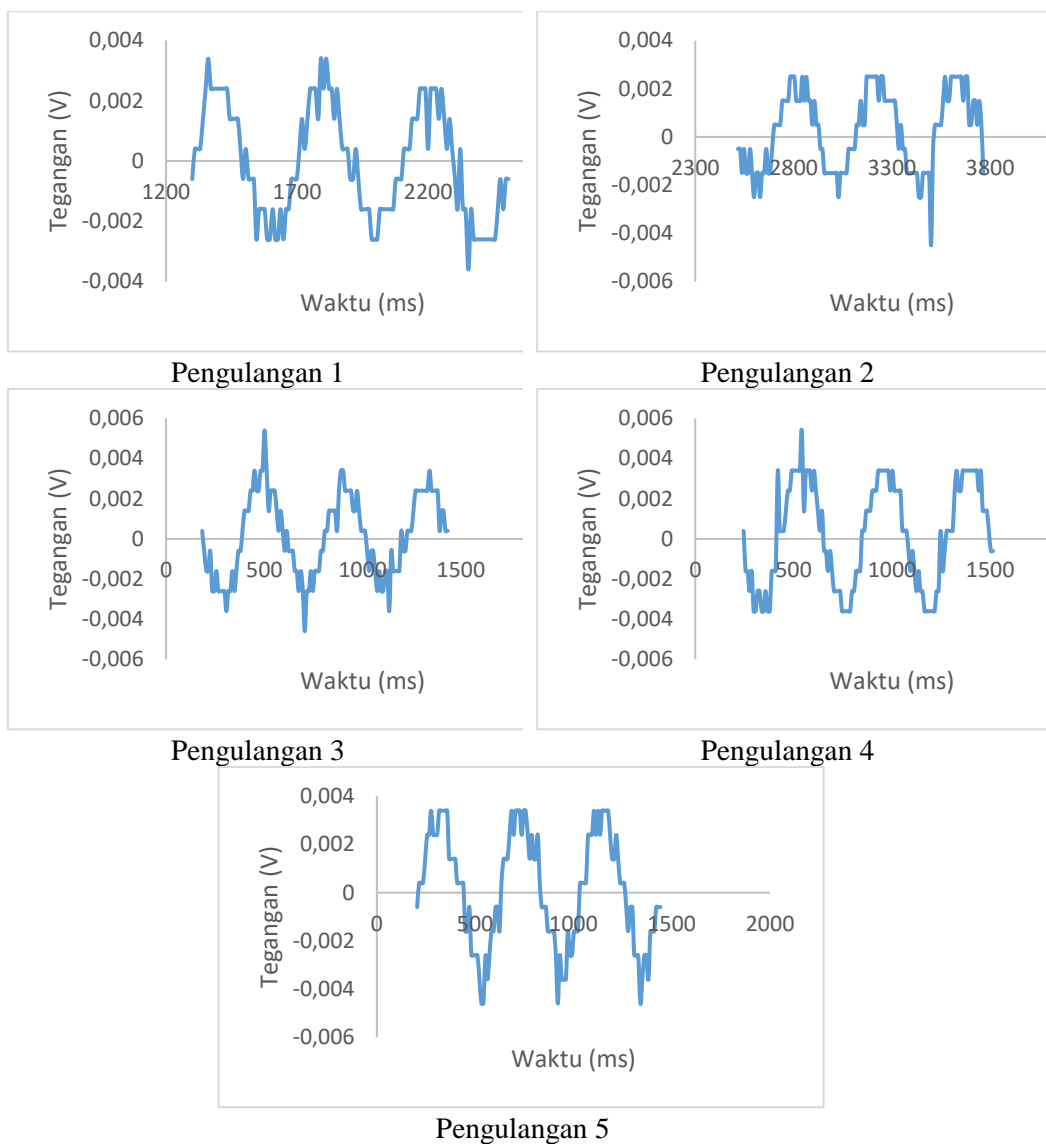


Kecepatan 3 m/s

Grafik tegangan *output bluff body* jari-jari sudut 14mm pengulangan 4



Grafik tegangan *output bluff body* jari-jari sudut 14mm pengulangan 5



Grafik tegangan *output bluff body* jari-jari sudut 17mm kecepatan angin 3 m/s

Lampiran 6.2 Data tegangan maksimum, tegangan rata rata, frekuensi, dan resonansi pengujian *bluff body* pada *wind tunnel*

Jari-jari sudut Bluff Body mm	Kecepatan angin m/s	Tegangan Rata-rata V	Tegangan Maks V	Frekuensi Hz	Tingkat Resonansi Hz
r. 5 mm	0,5	0,004606523	0,013826	1,99751157	0,91
	1	0,011266406	0,02126	2,00002504	0,91
	1,5	0,016202539	0,02912	1,9546889	0,89
	2	0,019954844	0,03418	1,8698196	0,85
	2,5	0,023407148	0,04044	1,77031445	0,81
	3	0,024711992	0,04338	1,63469512	0,74
r. 8 mm	0.5	0,002609219	0,00692	2,45015872	1,11
	1	0,008263477	0,0168	2,11189184	0,96
	1,5	0,013614645	0,026234	2,05018155	0,93
	2	0,016894531	0,0303	1,98101735	0,90
	2,5	0,019341914	0,0357	1,88175512	0,86
	3	0,020636484	0,03686	1,76822357	0,80
r. 11 mm	0,5	0	0	0	0
	1	0	0	0	0
	1,5	0,010138593	0,01832	2,17429583	0,99
	2	0,012482187	0,02198	2,08480529	0,95
	2,5	0,014287890	0,02506	1,98075918	0,90
	3	0,015821210	0,02928	1,89863964	0,86
r. 14 mm	0,5	0	0	0	0
	1	0	0	0	0
	1.5	0	0	0	0
	2	0	0	0	0
	2,5	0,004453242	0,01306	2,28017994	1,04
	3	0,010633008	0,02232	2,11284617	0,96
r. 17 mm	0,5	0	0	0	0
	1	0	0	0	0
	1,5	0	0	0	0
	2	0	0	0	0
	2,5	0	0	0	0
	3	0,001734023	0,0062	2,42001377	1,10
r. 20 mm	0,5	0	0	0	0
	1	0	0	0	0
	1,5	0	0	0	0
	2	0	0	0	0
	2,5	0	0	0	0
	3	0	0	0	0

Lampiran 6.3 Properti fisika dari udara pada tekanan atmosfer standar (satuan SI)

Temperatur (°C)	Densitas, ρ (kg/m ³)	Berat Jenis ^b , γ (N/m ³)	Viskositas Dinamik, μ (N . s/m ²)	Viskositas Kinematik, ν (m ² /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

aBerdasarkan data R. D. Blevin, Applied Fluid Dynamics Handbook, Van Nostrand Reinhold Co., Inc., New York, 1984.

bMassa 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 6.4 Properti dasar polypropylene

ASTM or UL test	Property	Homopolymer	Co-Polymer	Flame Retardant
PHYSICAL				
D792	Density (lb/in ³)	0.033	0.033	0.035
	(g/cm ³)	0.905	0.897	0.988
D570	Water Absorption, 24 hrs (%)	<0.01	0.01	0.02
MECHANICAL				
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
THERMAL				
D696	Coefficient of Linear Thermal Expansion (x 10 ⁻⁵ in./in./°F)	6.2	6.6	-
D648	Heat Deflection Temp (°F / °C) 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
C177	Thermal Conductivity (BTU-in/ft ² -hr-°F) (x 10 ⁻⁴ cal/cm-sec-°C)	0.76-0.81 2.6-28	- -	- -
UL94	Flammability Rating	HB	n.r.	V-O
ELECTRICAL				
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 ¹⁴	2 x 10 ¹⁶	10 ¹⁶
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. [diakses pada 22 Maret 2018]

Lampiran 6.5 Gambar alat penelitian



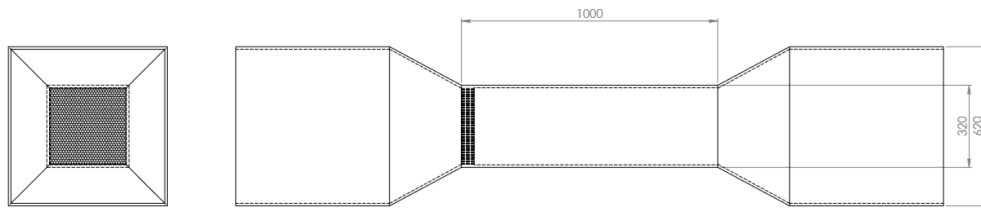
Gambar foto *wind tunnel* tampak depan



Gambar foto *wind tunnel* tampak samping kiri



Gambar foto *wind tunnel* tampak samping kanan



Gambar 2D *sketch wind tunnel*



Gambar honeycomb dengan diameter cell 10mm



Gambar *twist and bending machine*

Lampiran 6.6 Spesifikasi osiloskop



PropScope Specifications

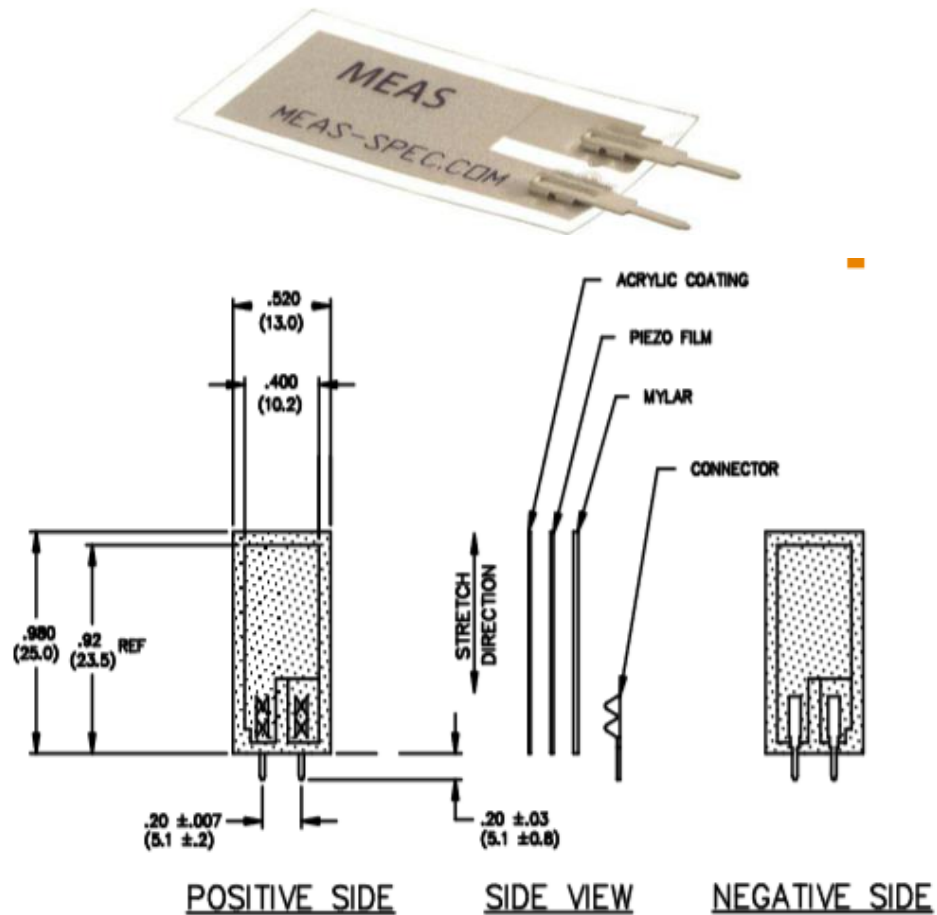
- 2 input channels
- 25 Msps maximum sample rate
- 20 Vpp maximum input range (-10 V to +10 V when DC-coupled)
- 10-bit input resolution over either the entire 20 Vpp range, or selectable 10, 2, and 1 Vpp ranges.
- 1x/10x selectable probes for 200 Vpp maximum input range (-100 V to +100 V when DC-coupled)

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 6.7 Spesifikasi *Piezo Vibration Sensor*



SPECIFICATIONS

- ◆ Piezo Film Sensors
- ◆ High Sensativity
- ◆ AC Coupled
- ◆ Laminated.
- ◆ Robust

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 6.8 Dokumentasi spesimen *bluff body*

massa *bluff body* jari-jari sudut 5mm



massa *bluff body* jari-jari sudut 8mm



massa *bluff body* jari-jari sudut 10mm



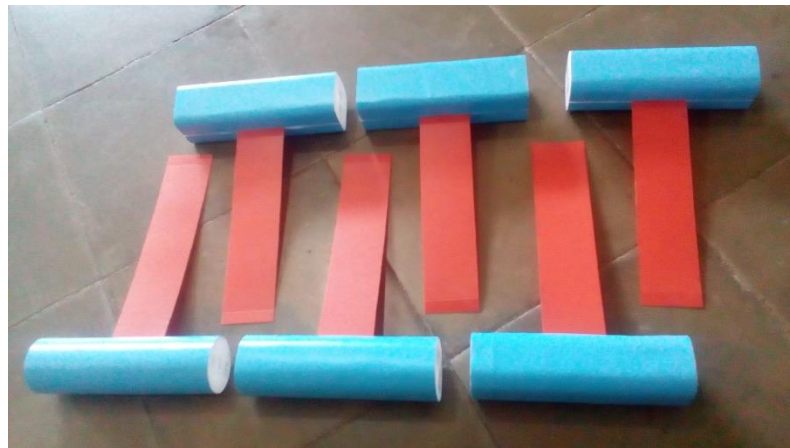
massa *bluff body* jari-jari sudut 14mm



massa *bluff body* jari-jari sudut 17mm



massa *bluff body* jari-jari sudut 20mm



Gambar *Bluff body* yang sudah terpasang kantilever polypropylene



Gambar bahan untuk membuat kantilever polypropylene

Lampiran 6.9 Dokumentasi pengujian di wind tunnel



Bluff body di dalam wind tunnel



Gambar *bluff body* di kecepatan angin 0,5m/s

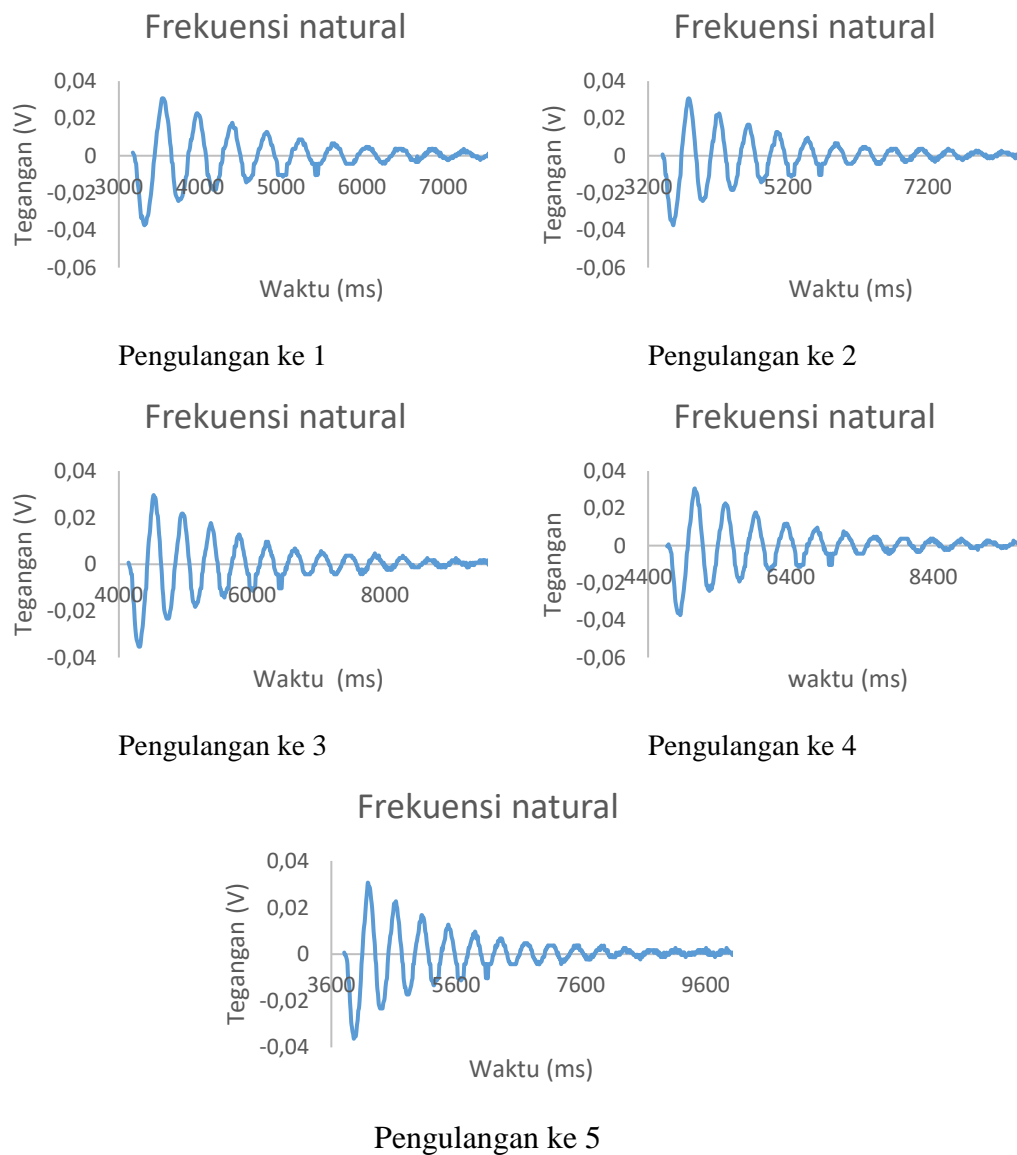


Gambar instalasi penngujian pada *wind tunnel*

Lampiran 6.10 Data Pengujian Frekuensi Natural Kantilever Polypropylene

Tabel rata-rata pengujian frekuensi natural dari 5 kali pengulangan

Pengulangan ke-n	Frekuensi (hz)
1	2,313
2	2,272
3	2,035
4	2,068
5	2,300
Rata rata	2,19805



Grafik pengujian frekuensi natural kantilever polypropylene dimensi 80mm x 40mm x 0,5mm

Tabel 6.11 Tegangan *output* piezoelektrik pengujian frekuensi natural

Sample ke-n	Time (ms)	Tegangan (V)
333	3408	0,0007
334	3418	-0,0013
335	3428	-0,0013
336	3438	-0,0043
337	3449	-0,0103
338	3459	-0,0103
339	3469	-0,0143
340	3479	-0,0213
341	3490	-0,0233
342	3500	-0,0273
343	3510	-0,0313
344	3520	-0,0343
345	3531	-0,0343
346	3541	-0,0353
347	3551	-0,0363
348	3561	-0,0373
349	3571	-0,0353
350	3582	-0,0333
351	3592	-0,0323
352	3602	-0,0293
353	3612	-0,0263
354	3623	-0,0233
355	3633	-0,0193
356	3643	-0,0153
357	3653	-0,0123
358	3664	-0,0103
359	3674	-0,0013
360	3684	0,0037
361	3694	0,0067
362	3704	0,0107
363	3715	0,0147
364	3725	0,0177
365	3735	0,0207
366	3745	0,0247
367	3756	0,0267
368	3766	0,0297
369	3776	0,0307
370	3786	0,0307
371	3797	0,0297
372	3807	0,0277

Sample ke-n	Time (ms)	Tegangan (V)
373	3817	0,0257
374	3827	0,0227
375	3838	0,0197
376	3848	0,0157
377	3858	0,0117
378	3868	0,0077
379	3878	0,0027
380	3889	-0,0013
381	3899	-0,0043
382	3909	-0,0113
383	3919	-0,0153
384	3930	-0,0183
385	3940	-0,0213
386	3950	-0,0233
387	3960	-0,0233
388	3971	-0,0233
389	3981	-0,0243
390	3991	-0,0233
391	4001	-0,0233
392	4011	-0,0223
393	4022	-0,0223
394	4032	-0,0193
395	4042	-0,0163
396	4052	-0,0143
397	4063	-0,0123
398	4073	-0,0103
399	4083	-0,0043
400	4093	-0,0013
401	4104	0,0017
402	4114	0,0047
403	4124	0,0077
404	4134	0,0077
405	4145	0,0117
406	4155	0,0147
407	4165	0,0167
408	4175	0,0217
409	4185	0,0217
410	4196	0,0217
411	4206	0,0217
412	4216	0,0227
413	4226	0,0217

Sample ke-n	Time (ms)	Tegangan (V)
414	4237	0,0197
415	4247	0,0177
416	4257	0,0157
417	4267	0,0137
418	4278	0,0087
419	4288	0,0067
420	4298	0,0037
421	4308	0,0007
422	4318	-0,0033
423	4329	-0,0043
424	4339	-0,0113
425	4349	-0,0133
426	4359	-0,0143
427	4370	-0,0163
428	4380	-0,0173
429	4390	-0,0183
430	4400	-0,0173
431	4411	-0,0183
432	4421	-0,0183
433	4431	-0,0173
434	4441	-0,0163
435	4452	-0,0153
436	4462	-0,0133
437	4472	-0,0113
438	4482	-0,0103
439	4492	-0,0043
440	4503	-0,0043
441	4513	-0,0013
442	4523	-0,0003
443	4533	0,0037
444	4544	0,0047
445	4554	0,0067
446	4564	0,0067
447	4574	0,0097
448	4585	0,0117
449	4595	0,0137
450	4605	0,0147
451	4615	0,0157
452	4625	0,0167
453	4636	0,0157
454	4646	0,0167

Sample ke-n	Time (ms)	Tegangan (V)
455	4656	0,0157
456	4666	0,0137
457	4677	0,0117
458	4687	0,0107
459	4697	0,0087
460	4707	0,0057
461	4718	0,0037
462	4728	0,0017
463	4738	-0,0013
464	4748	-0,0033
465	4759	-0,0043
466	4769	-0,0103
467	4779	-0,0113
468	4789	-0,0113
469	4799	-0,0123
470	4810	-0,0133
471	4820	-0,0143
472	4830	-0,0123
473	4840	-0,0133
474	4851	-0,0133
475	4861	-0,0123
476	4871	-0,0113
477	4881	-0,0113
478	4892	-0,0103
479	4902	-0,0103
480	4912	-0,0043
481	4922	-0,0043
482	4932	-0,0013
483	4943	-0,0003
484	4953	0,0017
485	4963	0,0027
486	4973	0,0047
487	4984	0,0057
488	4994	0,0057
489	5004	0,0057
490	5014	0,0097
491	5025	0,0107
492	5035	0,0127
493	5045	0,0127
494	5055	0,0127
495	5066	0,0117

Sample ke-n	Time (ms)	Tegangan (V)
496	5076	0,0117
497	5086	0,0117
498	5096	0,0087
499	5106	0,0087
500	5117	0,0067
501	5127	0,0047
502	5137	0,0037
503	5147	0,0027
504	5158	-0,0003
505	5168	-0,0023
506	5178	-0,0043
507	5188	-0,0043
508	5199	-0,0043
509	5209	-0,0103
510	5219	-0,0103
511	5229	-0,0103
512	5239	-0,0103
513	5250	-0,0113
514	5260	-0,0103
515	5270	-0,0103
516	5280	-0,0103
517	5291	-0,0103
518	5301	-0,0043
519	5311	-0,0043
520	5321	-0,0043
521	5332	-0,0033
522	5342	-0,0023
523	5352	-0,0023
524	5362	-0,0013
525	5373	0,0007
526	5383	0,0027
527	5393	0,0037
528	5403	0,0037
529	5413	0,0047
530	5424	0,0057
531	5434	0,0067
532	5444	0,0067
533	5454	0,0087
534	5465	0,0087
535	5475	0,0087
536	5485	0,0097

Sample ke-n	Time (ms)	Tegangan (V)
537	5495	0,0077
538	5506	0,0077
539	5516	0,0067
540	5526	0,0067
541	5536	0,0047
542	5546	0,0037
543	5557	0,0037
544	5567	0,0017
545	5577	-0,0003
546	5587	-0,0003
547	5598	-0,0023
548	5608	-0,0043
549	5618	-0,0043
550	5628	-0,0043
551	5639	-0,0043
552	5649	-0,0103
553	5659	-0,0103
554	5669	-0,0103
555	5680	-0,0103
556	5690	-0,0043
557	5700	-0,0043
558	5710	-0,0043
559	5720	-0,0043
560	5731	-0,0043
561	5741	-0,0033
562	5751	-0,0023
563	5761	-0,0013
564	5772	-0,0003
565	5782	-0,0003
566	5792	0,0007
567	5802	0,0027
568	5813	0,0027
569	5823	0,0037
570	5833	0,0037
571	5843	0,0047
572	5853	0,0047
573	5864	0,0047
574	5874	0,0067
575	5884	0,0067
576	5894	0,0057
577	5905	0,0057

Sample ke-n	Time (ms)	Tegangan (V)
578	5915	0,0067
579	5925	0,0047
580	5935	0,0047
581	5946	0,0037
582	5956	0,0037
583	5966	0,0027
584	5976	0,0027
585	5987	0,0017
586	5997	0,0007
587	6007	-0,0013
588	6017	-0,0013
589	6027	-0,0033
590	6038	-0,0033
591	6048	-0,0043
592	6058	-0,0043
593	6068	-0,0043
594	6079	-0,0043
595	6089	-0,0043
596	6099	-0,0043
597	6109	-0,0043
598	6120	-0,0043
599	6130	-0,0033
600	6140	-0,0033
601	6150	-0,0033
602	6160	-0,0023
603	6171	-0,0013
604	6181	-0,0013
605	6191	-0,0003
606	6201	0,0007
607	6212	0,0007
608	6222	0,0017
609	6232	0,0027
610	6242	0,0037
611	6253	0,0037
612	6263	0,0037
613	6273	0,0047
614	6283	0,0037
615	6294	0,0047
616	6304	0,0047
617	6314	0,0047
618	6324	0,0037

Sample ke-n	Time (ms)	Tegangan (V)
619	6334	0,0037
620	6345	0,0037
621	6355	0,0037
622	6365	0,0037
623	6375	0,0027
624	6386	0,0017
625	6396	0,0007
626	6406	-0,0003
627	6416	-0,0003
628	6427	-0,0013
629	6437	-0,0023
630	6447	-0,0023
631	6457	-0,0033
632	6467	-0,0043
633	6478	-0,0033
634	6488	-0,0043
635	6498	-0,0033
636	6508	-0,0043
637	6519	-0,0033
638	6529	-0,0043
639	6539	-0,0033
640	6549	-0,0023
641	6560	-0,0023
642	6570	-0,0023
643	6580	-0,0013
644	6590	-0,0003
645	6601	0,0007
646	6611	0,0007
647	6621	0,0017
648	6631	0,0027
649	6641	0,0027
650	6652	0,0027
651	6662	0,0027
652	6672	0,0037
653	6682	0,0037
654	6693	0,0027
655	6703	0,0037
656	6713	0,0037
657	6723	0,0037
658	6734	0,0037
659	6744	0,0037

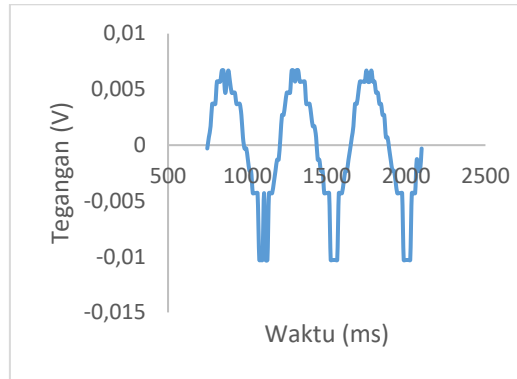
Sample ke-n	Time (ms)	Tegangan (V)
660	6754	0,0037
661	6764	0,0017
662	6774	0,0027
663	6785	0,0017
664	6795	0,0007
665	6805	0,0007
666	6815	-0,0003
667	6826	-0,0003
668	6836	-0,0023
669	6846	-0,0013
670	6856	-0,0013
671	6867	-0,0033
672	6877	-0,0023
673	6887	-0,0033
674	6897	-0,0033
675	6908	-0,0023
676	6918	-0,0023
677	6928	-0,0023
678	6938	-0,0023
679	6948	-0,0023
680	6959	-0,0003
681	6969	-0,0023
682	6979	-0,0013
683	6989	-0,0003
684	7000	0,0007
685	7010	-0,0003
686	7020	0,0007
687	7030	0,0017
688	7041	0,0027
689	7051	0,0017
690	7061	0,0027
691	7071	0,0037
692	7082	0,0027
693	7092	0,0037
694	7102	0,0037
695	7112	0,0037
696	7122	0,0037
697	7133	0,0037
698	7143	0,0027
699	7153	0,0027
700	7163	0,0017

Sample ke-n	Time (ms)	Tegangan (V)
701	7174	0,0027
702	7184	0,0017
703	7194	0,0007
704	7204	0,0007
705	7215	0,0007
706	7225	-0,0003
707	7235	-0,0013
708	7245	-0,0003
709	7255	-0,0013
710	7266	-0,0023
711	7276	-0,0023
712	7286	-0,0013
713	7296	-0,0023
714	7307	-0,0033
715	7317	-0,0013
716	7327	-0,0023
717	7337	-0,0013
718	7348	-0,0023
719	7358	-0,0003
720	7368	-0,0013
721	7378	-0,0003
722	7389	-0,0003
723	7399	0,0007
724	7409	-0,0003
725	7419	0,0017
726	7429	0,0017
727	7440	0,0007
728	7450	0,0017
729	7460	0,0027
730	7470	0,0027
731	7481	0,0027
732	7491	0,0037
733	7501	0,0037
734	7511	0,0027
735	7522	0,0027
736	7532	0,0027
737	7542	0,0027
738	7552	0,0027
739	7562	0,0027
740	7573	0,0017
741	7583	0,0007

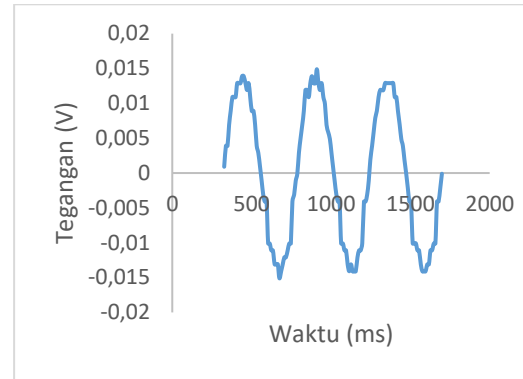
Sample ke-n	Time (ms)	Tegangan (V)
742	7593	0,0007
743	7603	0,0007
744	7614	-0,0003
745	7624	-0,0013
746	7634	-0,0013
747	7644	-0,0003
748	7655	-0,0013
749	7665	-0,0013
750	7675	-0,0013
751	7685	-0,0013
752	7696	-0,0023
753	7706	-0,0023
754	7716	-0,0013
755	7726	-0,0013
756	7736	-0,0013
757	7747	-0,0003
758	7757	-0,0003
759	7767	-0,0013
760	7777	0,0007
761	7788	-0,0003
762	7798	-0,0003
763	7808	-0,0003
764	7818	0,0017
765	7829	0,0017
766	7839	0,0017
767	7849	0,0007
768	7859	0,0017
769	7869	0,0017
770	7880	0,0017
771	7890	0,0027
772	7900	0,0027
773	7910	0,0017
774	7921	0,0017
775	7931	0,0027
776	7941	0,0017
777	7951	0,0017
778	7962	0,0017
779	7972	0,0017
780	7982	0,0007
781	7992	0,0007
782	8003	0,0007

Sample ke-n	Time (ms)	Tegangan (V)
783	8013	-0,0003
784	8023	-0,0003
785	8033	0,0007
786	8043	-0,0003
787	8054	-0,0013
788	8064	-0,0013
789	8074	-0,0003
790	8084	-0,0013

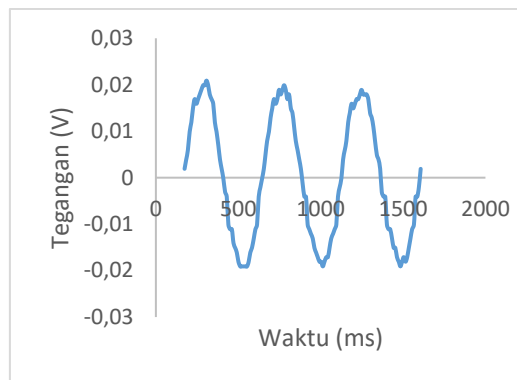
Lampiran 6.12 Grafik tegangan pada pengujian *bluff body* tanpa jari jari sudut



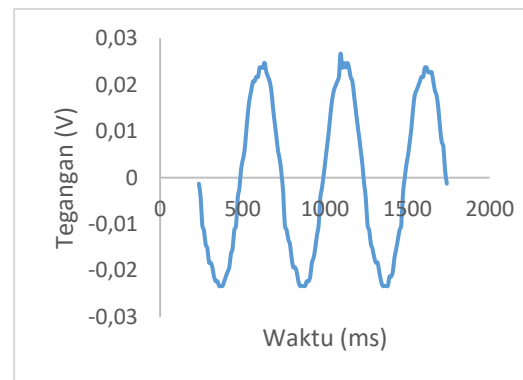
Kecepatan 0,5 m/s



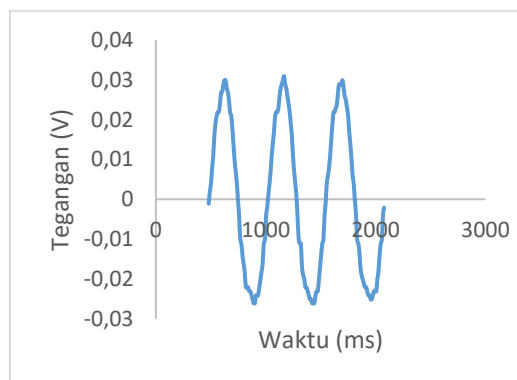
Kecepatan 1 m/s



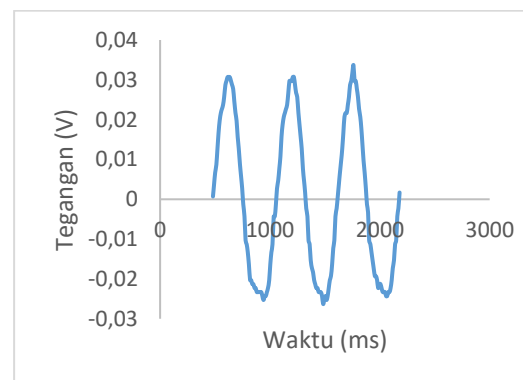
Kecepatan 1,5 m/s



Kecepatan 2 m/s



Kecepatan 2,5 m/s



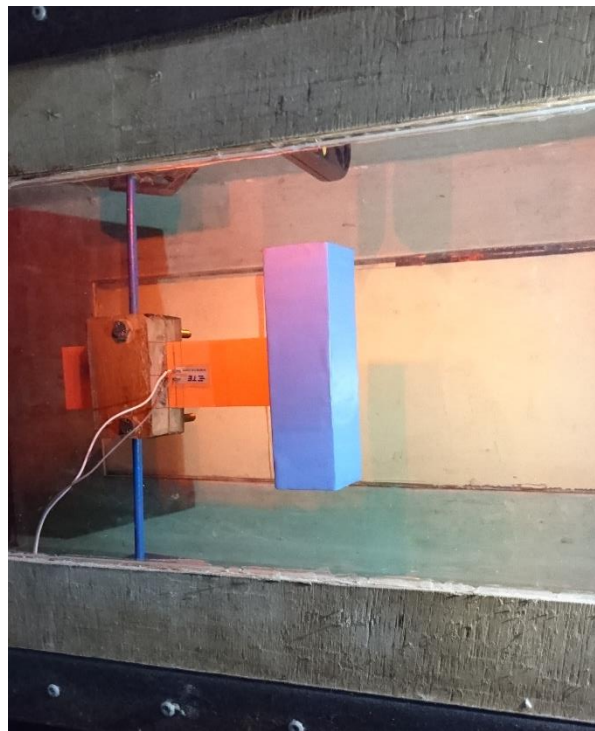
Kecepatan 3 m/s

Lampiran 6.13 Data *Bluff Body* Tanpa Jari Jari Sudut

Tabel data tegangan dan frekuensi pengujian *bluff body* tanpa jari jari sudut

Jari-jari sudut <i>Bluff Body</i> mm	Kecepatan angin m/s	Tegangan Rata-rata V	Tegangan Maks V	Frekuensi Hz	Tingkat Resonansi
Tanpa Radius	0.5	0.004625469	0.01022	2.21111204	1.01
	1	0.009152422	0.0163	2.16800793	0.99
	1.5	0.012691523	0.0219	2.08488602	0.95
	2	0.015991758	0.0269	1.98323621	0.90
	2.5	0.017401523	0.031	1.87668755	0.85
	3	0.018312578	0.0333	1.7635482	0.80

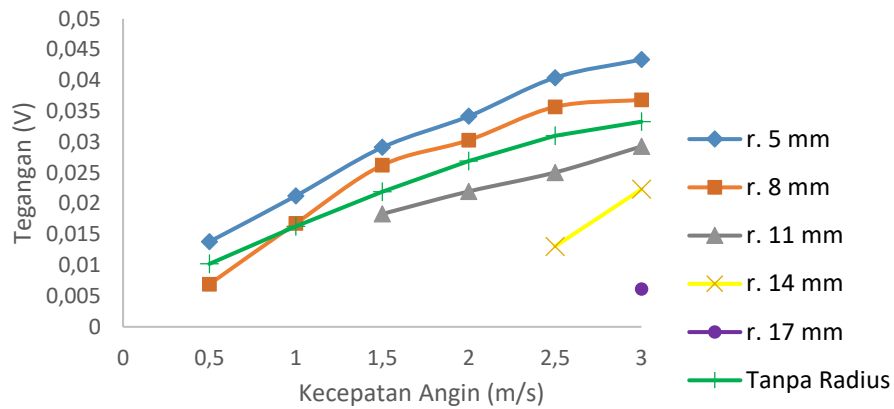
Lampiran 6.14 Dokumentasi pengujian *bluff body* tanpa jari-jari sudut



Pengujian *bluff body* tanpa jari-jari sudut

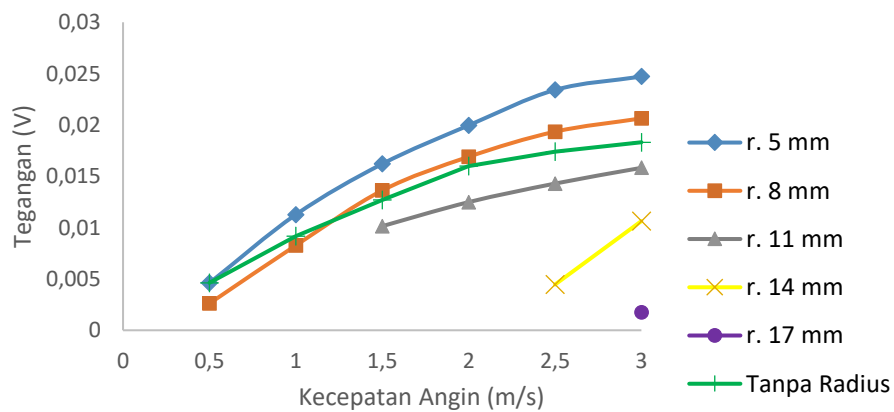
Lampiran 6.15 Grafik perbandingan *bluff body* dengan jari-jari sudut VS *bluff body* tanpa Jari-jari sudut

Perbandingan tegangan maksimum *bluff body* dengan jari-jari sudut VS *bluff body* tanpa Jari-jari sudut



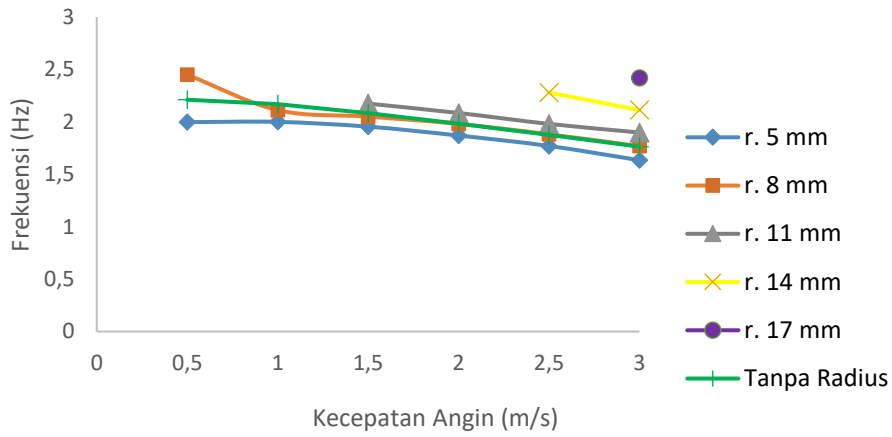
catatan : Starting osilasi setiap variasi jari-jari sudut berbeda, dan untuk jari-jari sudut 20 mm belum beresilasi di kecepatan angin 3m/s.

Perbandingan tegangan rata-rata *bluff body* dengan jari-jari sudut VS *bluff body* tanpa Jari-jari sudut



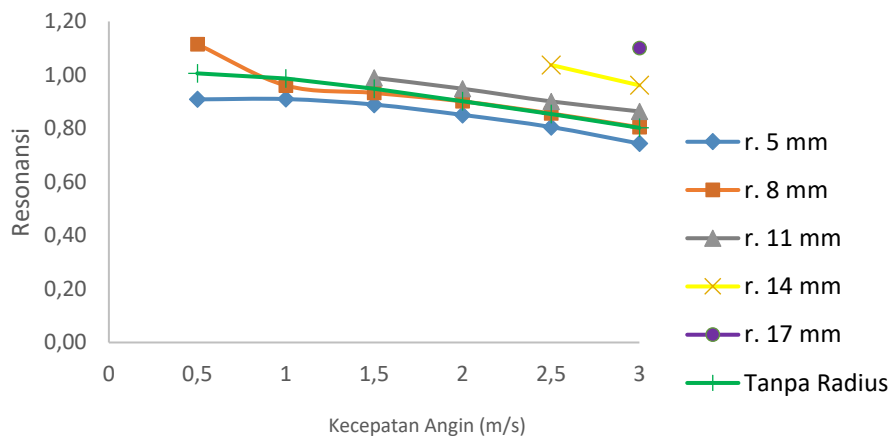
catatan : Starting osilasi setiap variasi jari-jari sudut berbeda, dan untuk jari-jari sudut 20 mm belum beresilasi di kecepatan angin 3m/s.

Perbandingan frekuensi *bluff body* dengan jari-jari sudut VS *bluff body* tanpa Jari-jari sudut



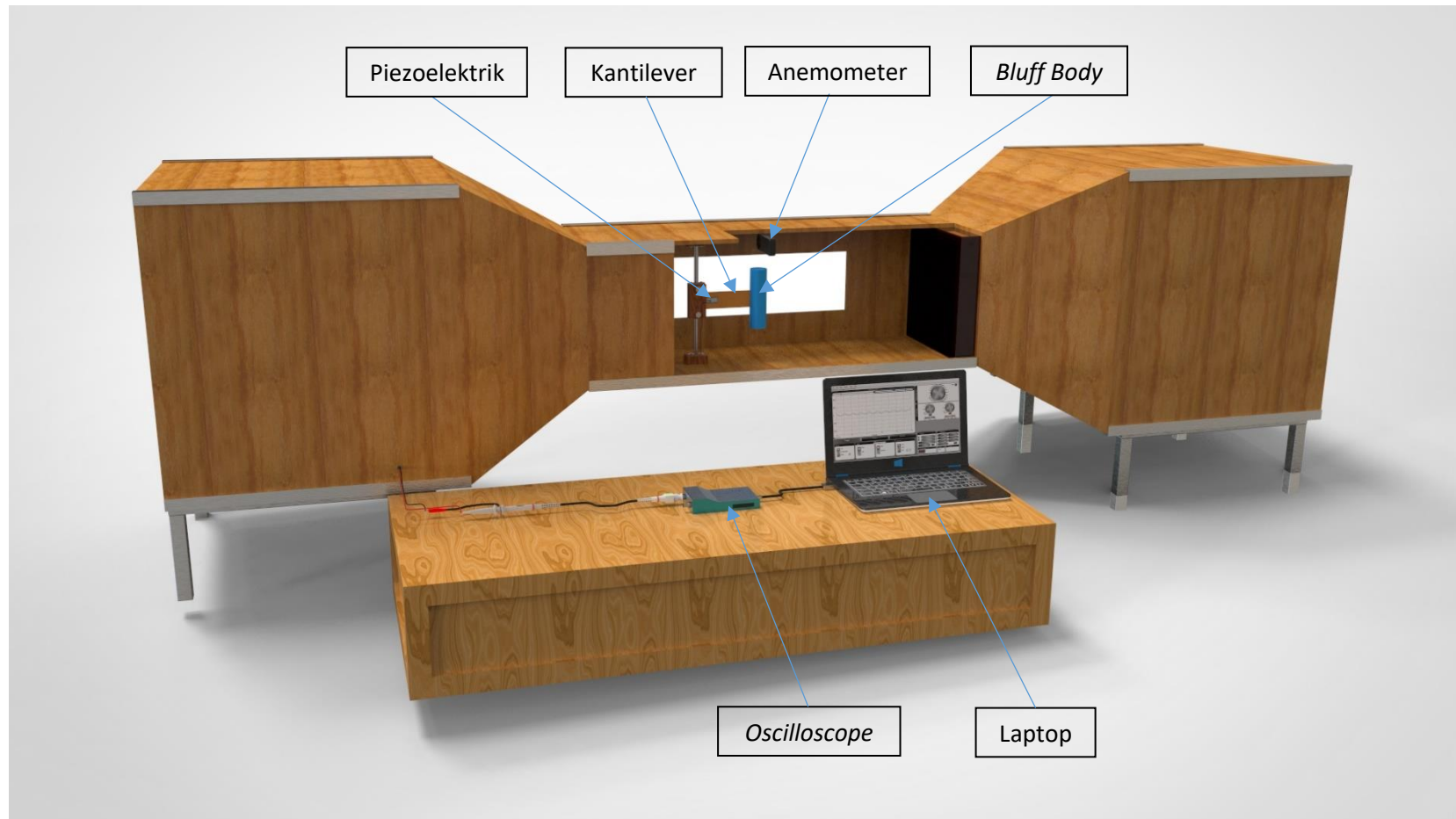
catatan : Frekuensi *bluff body* jari-jari sudut 20 mm = 0 Hz, hal ini karena *bluff body* masih belum beresilasi sampai kecepatan 3 m/s

Perbandingan resonansi getaran *bluff body* dengan jari-jari sudut VS *bluff body* tanpa Jari-jari sudut



catatan : Resonansi terjadi apabila $f_s \approx f_n$. sedangkan frekuensi *bluff body* jari-jari sudut 5 mm = 0 Hz, sehingga resonansi *bluff body* jari-jari sudut 20 mm = 0.

Lampiran 6.16 Skema 3D pengujian pada *wind tunnel*



Gambar skema pengujian *bluff body* pada *wind tunnel*