

**TESIS - MO 185401** 

# STUDI EKSPERIMEN KONVERTER ENERGI GELOMBANG LAUT TIPE PELAMPUNG BERBASIS DIRECT MECHANICAL DRIVE SYSTEM (DMDS)

RIZKI MENDUNG ARIEFIANTO NRP. 04311850012002

DOSEN PEMBIMBING: Yoyok Setyo Hadiwidodo, S.T., M.T., Ph.D. Dr. Eng. Shade Rahmawati, S.T. M.T.

PROGRAM MAGISTER DEPARTEMEN TEKNIK KELAUTAN FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER 2020



TESIS - MO 185401

# STUDI EKSPERIMEN KONVERTER ENERGI GELOMBANG LAUT TIPE PELAMPUNG BERBASIS DIRECT MECHANICAL DRIVE SYSTEM (DMDS)

RIZKI MENDUNG ARIEFIANTO NRP. 04311850012002

DOSEN PEMBIMBING: Yoyok Setyo Hadiwidodo, S.T., M.T., Ph.D. Dr. Eng. Shade Rahmawati, S.T. M.T.

PROGRAM MAGISTER DEPARTEMEN TEKNIK KELAUTAN FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER 2020 "Halaman ini sengaja dikosongkan"



THESIS - MO 185401

# EXPERIMENTAL STUDY OF OSCILLATING BUOY WAVE ENERGY CONVERTER BASED ON DIRECT MECHANICAL DRIVE SYSTEM (DMDS)

RIZKI MENDUNG ARIEFIANTO NRP. 04311850012002

SUPERVISORS:

Yoyok Setyo Hadiwidodo, S.T., M.T., Ph.D.

Dr. Eng. Shade Rahmawati, S.T. M.T.

MASTER PROGRAM DEPARTEMENT OF OCEAN ENGINEERING FACULTY OF OCEAN TECHNOLOGY INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER 2020 "Halaman ini sengaja dikosongkan"

# LEMBAR PENGESAHAN TESIS

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar Magister Teknik (MT) Program Studi Teknik Kelautan – Teknik Manajemen dan Energi Laut Di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Oleh :

RIZKI MENDUNG ARIEFIANTO NRP: 04311850012002

Tanggal Ujian : 29 Juli 2020 Periode Wisuda : September 2020

> Disetujui oleh : Pembimbing :

- Yoyok Setyo Hadiwidodo, S.T., M.T., Ph.D. NIP. 19711105 199512 1 001
- 2. Dr. Eng. Shade Rahmawati, S.T., M.T. NPP. 1990201812030

Penguji :

- 1. Dr. Ir. Wahyudi, M.Sc. NIP. 19601214 198903 1 001
- 2. R. Haryo Dwito Armono S.T., M.Eng., Ph.D. NIP. 19680810 199512 1 001
- 3. Prof. Ir. Widi Agoes Pratikto, M.Sc., Ph.D. NIP. 19530816 198003 1 004

Muner.

Kepala Departemen Teknik Kelautan

DEPARTEMEN Prilikno, S.T., M.T., Ph.D. ТЕКНИК КЕЦИЦАН 1730415 200003 1 001

# STUDI EKSPERIMEN KONVERTER ENERGI GELOMBANG LAUT TIPE PELAMPUNG BERBASIS *DIRECT MECHANICAL DRIVE SYSTEM* (DMDS)

Nama Mahasiswa	: Rizki Mendung Ariefianto
NRP	: 04311850012002
Pembimbing	: Yoyok Setyo Hadiwidodo, S.T., M.T., Ph.D.
Co-Supervisor	: Dr. Eng. Shade Rahmawati, S.T., M.T.

## ABSTRAK

Energi gelombang laut merupakan salah satu energi yang menjanjikan untuk diterapkan di negara kepulauan seperti Indonesia. Namun, potensi ini masih belum termanfaatkan dengan baik karena minimnya studi tentang implementasi konverter energi gelombang (WEC). Dalam rangka implementasi, mengadopsi teknologi WEC dari luar negeri dan memodifikasinya menjadi pilihan yang lebih realistis. Salah satu teknologi pembangkit gelombang yang cukup bagus diterapkan adalah APR WEC yang memiliki konstruksi sederhana. Selain itu device ini juga telah diuji di Selat Taiwan. Namun, WEC ini memiliki kelemahan yaitu tidak mampu menghasilkan daya listrik pada sea state dengan frekuensi gelombang kurang dari 3 sekon. Jika pada *sea state* tersebut APR WEC mampu mengonversi potensi yang ada, maka akan memperbesar jumlah energi yang dihasilkan. Masalah inilah yang coba diatasi oleh DMDS-Oscillating Buoy WEC agar desainnya mampu mengonversi daya gelombang dengan range yang lebih lebar sehingga akan meningkatkan perolehan energi gelombang dalam skala implementasi. Solusi untuk mengatasi hal tersebut adalah dengan menaikkan rasio putaran sistem mekanik dan mengurangi inersia flywheel.

Berdasarkan hasil eksperimen diperoleh konfigurasi sistem yang tepat agar model mampu bekerja pada periode gelombang minimal kurang dari 3 sekon adalah dengan menaikkan rasio putaran menjadi 1:61 dan memperkecil inersia *flywheel* menjadi 1/17 dari APR WEC yang merupakan acuan adopsi teknologi. Konfigurasi ini mampu menghasilkan rata-rata efisiensi sistem mekanik pada semua variasi adalah antara 15 – 40% dengan rata-rata terbaik pada kode variasi C sebesar 40%. Kemudian dari eksperimen diperoleh hasil bahwa bentuk pelampung balok lebih baik dibandingkan pelampung silinder pada kode variasi yang sama dengan konfigurasi optimal adalah C2 yang memiliki panjang tuas 0.9 m, jarak poros terhadap MWL 0.67 m, dan *draft* 0.075 m.

Selain itu, model *DMDS–Oscillating Buoy* WEC berhasil bekerja secara kontinyu dan mampu menghasilkan daya listrik pada kondisi gelombang dengan periode 1.12 s dan 0.931 s yang merupakan hasil skala minimum untuk periode gelombang 3 sekon. Jika diskala pada prototipenya diestimasikan *DMDS–* 

Oscillating Buoy WEC mampu menghasilkan daya listrik maksimal sebesar 246.5 Watt.

Konstanta hidrodinamik yang diperoleh dari simulasi berbasis metode Ursell – Tasai menunjukkan hasil yang valid. Nilai konstanta tersebut digunakan untuk mendapatkan parameter hidrodinamik berupa koefisien massa tambah, redaman, dan kekakuan yang lebih dominan dipengaruhi oleh frekuensi gelombang serta sangat berpengaruh dalam menghasilkan daya output. Untuk pelampung silinder, nilai koefisien massa tambah sebesar 17.24 – 19.44 kg, koefisien redaman 78.19 – 91.68 kg/s, dan koefisien kekakuan 1384.77 – 1426.37 kg/s<sup>2</sup>. Sedangkan untuk pelampung balok, nilai koefisien massa tambah sebesar 26.8 – 28.75 kg, koefisien redaman 68.03 – 96.51 kg/s, dan koefisien kekakuan 1500.93 kg/s<sup>2</sup>.

**Kata Kunci:** *DMDS–Oscillating Buoy* WEC, Daya listrik, Energi gelombang laut, Parameter hidrodinamik

# EXPERIMENTAL STUDY OF OSCILLATING BUOY WAVE ENERGY CONVERTER BASED ON DIRECT MECHANICAL DRIVE SYSTEM (DMDS)

Author	: Rizki Mendung Ariefianto
NRP	: 04311850012002
Supervisor	: Yoyok Setyo Hadiwidodo, S.T., M.T., Ph.D.
Co-Supervisor	: Dr. Eng. Shade Rahmawati, S.T., M.T.

## ABSTRACT

Wave energy is one of the promising energies to be applied in an archipelago like Indonesia. However, this potential is still not being utilized properly due to the lack of studies on the implementation of the wave energy converter (WEC). Adopting WEC technology from other countries and modifying it for implementation context becomes a more realistic choice. One of the well applied WEC technology is APR WEC, which has a simple construction. This device also has been tested in the Taiwan Strait. Yet, this WEC has a weakness, namely that it is not able to generate electric energy in sea states with a wave frequency of fewer than 3 seconds. If APR WEC can convert the existing wave energy potential in this sea state, it will increase the amount of energy produced. It is this problem that is tried to be answered by DMDS – Oscillating Buoy WEC so that the design can convert wave energy with a wider range. Consequently, it will increase the yield of wave energy on an implementation scale. The solution to solve this problem can be done by increasing the rotation ratio of the mechanical system and reducing the flywheel inertia.

Based on the experimental results, the correct system configuration is obtained so that the model can work in a minimum wave period of fewer than 3 seconds by increasing the rotation ratio to 1:61 and reducing the flywheel inertia to 1/17 of the APR WEC which is the reference for technology adoption. This configuration can produce an average mechanical system efficiency in all variations between 15 - 40% with the best average in code variation C of 40%. Then, the results of the experiment show that the shape of the rectangle buoy is better than the cylindrical buoy in the same variation code with the optimal configuration is C2 which has a lever length of 0.9 m, a shaft distance to MWL of 0.67 m, and a draft of 0.075 m.

Also, the DMDS – Oscillating Buoy WEC model was successful in working continuously and was able to generate electric power in wave conditions with a period of 1.12 s and 0.931 s, which is the result of the minimum scale for the 3 second wave period. If applied on a prototype scale, it is estimated that the DMDS

– Oscillating Buoy WEC is capable of producing a maximum electrical power of 246.5 Watts.

The hydrodynamic constant obtained from the simulation based on the Ursell–Tasai method shows valid results. This constant value is used to obtain hydrodynamic parameters in the form of added mass coefficient, damping, and stiffness, which are more dominant influenced by wave frequency and very important in generating output power. For cylindrical buoys, the value of the added mass coefficient is 17.24 - 19.44 kg, the damping coefficient is 78.19 - 91.68 kg/s, and the stiffness coefficient is 1384.77 - 1426.37 kg/s<sup>2</sup>. While for the rectangle buoys, the added mass coefficient is 26.8 - 28.75 kg, the damping coefficient is 68.03 - 96.51 kg/s, and the stiffness coefficient is 1500.93 kg/s<sup>2</sup>.

**Keywords:** DMDS–Oscillating Buoy WEC, Electric power, Wave energy, Hydrodynamic parameters

## **KATA PENGANTAR**

Tiada kata yang pantas terucap selain syukur Alhamdulillah kehadirat Allah Subhaanahu Wa Ta'alaa yang telah melimpahkan nikmat Iman dan Islam serta nikmat rahmat, taufik dan hidayah yang tak tergantikan. Sholawat serta salam senantiasa tercurahkan kepada Sang suri tauladan yaitu Nabi Muhammad Shallallaahu 'Alaihi Wasallam yang telah membawa cahaya hidup berupa Agama Islam. Alhamdulillah, pada kesempatan ini di semangat tahun baru Hijriyah 1 Muharram 1442 H, penulis akhirnya mampu menyelesaikan penelitian tesis yang berjudul: **"Studi Eksperimen Konverter Energi Gelombang Laut Tipe Pelampung Berbasis** *Direct Mechanical Drive System* (DMDS)".

Penelitian ini disusun guna memenuhi persyaratan dalam menyelesaikan Studi Magister (S-2) di Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan (FTK), Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya (ITS). Penelitian ini membahas tentang studi eksperimen sebuah konverter energi gelombang tipe pelampung berbasis sebuah sistem mekanik dalam mekanismenya guna mendapatkan konfigurasi desain yang optimal dalam menghasilkan daya listrik.

Penulis sangat mengharapkan agar penelitian ini dapat memberikan ilmu pengetahuan secara akademik dalam pemanfaatan energi laut yang masih minim dibahas khususnya di Indonesia sehingga suatu saat dapat dikembangkan pada tahap implementasi yang bermanfaat bagi masyarakat. Penulis menyadari bahwa di dalam penyelesaian penelitian ini masih terdapat banyak kekurangan, sehingga kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan oleh penulis. Akhir kata, harapan penulis berikutnya adalah semoga penelitian ini terus dielaborasi agar bermanfaat bagi kemajuan dunia kelautan, khususnya di Indonesia.

Surabaya, 20 Agustus 2020

Penulis

"Halaman ini sengaja dikosongkan"

## UCAPAN TERIMA KASIH

Alhamdulillah, keberhasilan penulis dalam menyusun tesis ini tidak terlepas dari bantuan, dorongan dan bimbingan dari semua pihak. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya dan penghargaan tulus kepada:

- Bapak Sucipto dan Ibu Arbaatun, beserta keluarga besar yang sangat berjasa untuk senantiasa memberikan semangat, dukungan dan doa yang sangat berarti.
- Istri tercinta Arina Hidayatus Sakinah dan putri kecilku Najma Fathimah 'Abidatus Sajidah yang menjadi motivasi di setiap waktu.
- Pondok Pesantren Muhyiddin beserta segenap keluarga Ndalem dan temanteman pondok yang senantiasa mendoakan dan memberikan dorongan spiritual bagi penulis.
- Bapak Yoyok Setyo Hadiwidodo, S.T., M.T., Ph.D dan Ibu Dr. Eng. Shade Rahmawati, S.T., M.T selaku dosen pembimbing yang atas segala bimbingan, motivasi, dan sarannya penulis dapat menyelesaikan tesis dengan baik.
- Departemen Teknik Kelautan yang memfasilitasi saya dalam pembelajaran selama menempuh jenjang magister dan memberikan izin eksperimen selama pandemi COVID 19.
- Bengkel Hidro Cipta Mandiri yang membantu membuatkan rancang bangun DMDS–Oscillating Buoy WEC selama 3 bulan.
- 7. Bapak Ali Burhanuddin yang telah memberikan dan mengajarkan program Ursell – Tasai di BPPT, Mas Nurman Firdaus yang memfasilitasi akses ke BPPT, Mas Mohammad Ridwan yang membantu dalam pembuatan *data logger*, Mbak Evianita Dewi Fajrianti yang membantu penyelesaian *software* beserta sensor gerak, Elyas Nur Fridayana yang membantu desain model 3D, dan Mas Hendra Dwi yang memfasilitasi *running* di *flume tank*.
- Teman-teman yang membantu dalam eksperimen, Ismail Ali Hajar Aswad, Asfarur Ridlwan, Liany Ayu Catherine, Fuad Mahfud Assidiq.
- 9. Teman-teman Pascasarjana Teknik Kelautan yang selalu memberikan *support* dan bantuan untuk bisa segera menyelesaikan studi magister (S-2).

10. Pihak-pihak lain yang membantu pelaksanaan dan penyelesaian penulisan penelitian ini baik dalam teknis maupun non teknis.

Penulis berpesan agar kita tidak melupakan jasa-jasa orang yang membantu di kita dalam keadaan apapun karena akan banyak keberkahan yang senantiasa mengiringi dalam dinamika hidup ini.

## **DAFTAR ISI**

HALAMAN JUDUL	i
COVER PAGE	iii
LEMBAR PENGESAHAN TESIS	V
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
UCAPAN TERIMA KASIH	xiii
DAFTAR ISI	XV
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL	XXV
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Perumusan Masalah	7
1.3. Tujuan Penelitian	7
1.4 Manfaat Penelitian	7
1.5. Batasan Masalah	8
1.6. Sistematika Penulisan	
BAB II KAJIAN PUSTAKA	11
2.1. Penelitian Terkait Sebelumnya	11
2.1. Teori Gelombang Laut	21
2.2.1. Dasar Gelombang Laut Reguler	21
2.2.2. Klasifikasi Gelombang Laut	
2.2.3. Kinematika Gelombang Laut	26
2.2.4. Analisa Energi dan Daya Gelombang Laut	28
2.3. Hidrodinamika Bangunan Laut	30
2.3.1. Teori Gerak Bangunan Laut	30
2.3.2. Konsep Dasar Gerakan Apung	31
2.3.3. Decay Test	34
2.3.4. Gaya Total Gelombang	36
2.3.5. Respon Gerak pada Gelombang Reguler	38

2.4. Power Take-Off System – Direct Mechanical Drive System	40
2.5. Konsep Mekanika pada Konverter Energi Gelombang	40
2.5.1. Roda Gigi (Gear)	40
2.5.2. Rasio <i>Gear</i>	41
2.5.3. Momen Torsi	41
2.5.4. Momen Inersia	42
2.5.5. Konstanta Kekakuan Torsi Poros	43
2.5.6. Sistem Torsi	44
2.5.7. Flywheel	45
2.5.8. Analisa Gaya Mekanik Tuas – Pelampung	46
2.6. Pemodelan Fisik	48
2.6.1. Kesebangunan Geometri (Geometry Similarity)	<u>49</u>
2.6.2. Kesebangunan Kienmatik (Kinematic Similarity)	50
2.6.3. Kesebangunan Dinamik (Dynamic Similarity)	50
2.6.4. Faktor Skala Froude	51
2.7. Komponen Elektronika	52
2.7.1. Arduino Uno	52
2.7.2. Data Logger	54
2.7.3. Sensor MPU 6050 Accelerometer – Gyroscope 521	55
BAB III. METODOLOGI PENELITIAN	57
3.1. Diagram Alir Penelitian	57
3.2. Penjelasan Diagram Alir Penelitian	58
3.2.1. Studi Literatur	58
3.2.2. Identifikasi Masalah	59
3.2.3. Pembuatan Konsep dan Desain DMDS – Oscillating	
Buoy WEC	<u>60</u>
3.2.3.1 Konsep	60
3.2.3.2 Desain	61
3.2.4. Rancang Bangun DMDS–Oscillating Buoy WEC	
3.2.4.1. Komponen-Komponen DMDS–Oscillating	
Buoy WEC	64
3.2.4.2. Fabrikasi DMDS–Oscillating Buoy WEC	67

3.2.5. Persiapan Komponen Pendukung Eksperimen	68
3.2.5.1. Data Logger	<u>68</u>
3.2.5.2. Modul Pengukuran Sudut Gerak Pelampung	70
3.2.5.3. Digital Spring Balance	71
3.2.6. Kalibrasi Peralatan Eksperimen	72
3.2.6.1. Kalibrasi Wave Probe	72
3.2.6.2. Kalibrasi <i>Data Logger</i>	72
3.2.6.3. Kalibrasi Sensor Accelerometer	73
3.2.7. Pemodelan Numerik dan Eksperimen	74
3.2.7.1. Pemodelan Numerik	74
3.2.7.2. Pemodelan Eksperimen	74
3.2.7.3. Analisa Dimensi	75
3.2.8. Skenario Desain Eksperimen di Laboratorium	77
3.2.9. Analisa Hasil dan Kesimpulan	80
3.2.10. Penyusunan Laporan Akhir dan Finalisasi Tesis	81
BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	
4.1. Pemodelan Sistem	84
4.1.1. Pemodelan Numerik dan Validasi	
4.1.2. Pemodelan Eksperimen	88
4.2. Hasil Kalibrasi Instrumen Pengukuran	
4.2.1. Gelombang Tercatat	
4.2.2. Kalibrasi <i>Data Logger</i>	91
4.2.3. Kalibrasi Sensor Accelerometer	<u>93</u>
4.3. Analisa Hidrodinamik	<u>94</u>
4.3.1. Perbandingan Perubahan Sudut dan Amplitudo	
Gerakan <i>Heave</i>	
4.3.2. Parameter Hidrodinamik	99
4.4. Analisa Daya	109
4.4.1. Daya Terserap (Absorbed Power)	111
4.4.2. Analisa <i>Flywheel</i>	113
4.4.3. Captured Width Ratio (CWR)	111
4.4.4. Efisiensi Sistem DMDS–Oscillating Buoy WEC	120

4.4.5. Analisa Hubungan Daya Output dengan Parameter Uji	124
4.4.5.1. Hubungan Daya Output dengan Kecuraman	
Gelombang	124
4.4.5.2. Hubungan Daya Output dengan Rasio	
Tinggi Poros–Panjang Tuas	125
4.4.5.3. Hubungan Daya Output dengan Rasio	
Garis Air – Draft	126
4.4.5.4. Hubungan Daya Output dengan Rasio	
Kedalaman Air – Draft	127
4.4.5.5. Hubungan Daya Output dengan Sudut Tuas	
Terhadap MWL	130
4.5. Estimasi Batasan Kinerja Model	132
4.6. Analisa Umum Implementasi	133
BAB V. PENUTUP	139
5.1. Kesimpulan	139
5.2. Saran	140
DAFTAR PUSTAKA	141
LAMPIRAN A	153
LAMPIRAN B	155
LAMPIRAN C	157
LAMPIRAN D	159
LAMPIRAN E	163
LAMPIRAN F	171
BIODATA PENULIS	173

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1. Kenaikan Konsumsi Energi Listrik dari Tahun 2018–2050
di Berbagai Sektor1
Gambar 1.2. Rasio Elektrifikasi Indonesia Tiap Provinsi Tahun 20182
Gambar 1.3. Persentase Pengembangan EBT Setiap Tahun2
Gambar 1.4. Hasil Pengujian APR WEC5
Gambar 1.3. Persentase Pengembangan EBT Setiap Tahun2
Gambar 2.1. Konsep OWSC Berbasis Sistem Paddle dan Rotary
Generator12
Gambar 2.2. Konsep dan Eksperimen WEC Tipe Pelampung Bola-Tuas
dengan Rotary Generator13
Gambar 2.3. Konsep dan Eksperimen WEC Tipe Pelampung Bola–Tuas
dengan Linear Generator14
Gambar 2.4. Konsep dan Eksperimen WEC Tipe Pelampung Silinder–Tuas
dengan Rotary Generator15
Gambar 2.5. Konsep dan Eksperimen WEC Tipe Pelampung Silinder-Tuas
Menggunakan Konfigurasi Gear Kompleks dengan
Rotary Generator16
Gambar 2.6. Konsep WEC tipe Multi Pelampung–Tuas Satu Poros
Menggunakan One-Way Gear17
Gambar 2.7. Konsep WEC ALETTONE Berbasis Sistem Empat Bar
Terintegrasi17
Gambar 2.8. Transmisi Gear Mekanik pada WEC ALETTONE:
One-Way Clutch (kiri), dan Couple One-Way Clutch (kanan). 18
Gambar 2.9. Konsep dan Eksperimen WEC Tipe Pelampung
Menggunakan Transmisi Sproket dengan Rotary Generator18
Gambar 2.10. Konsep dan Implementasi Floating Array-Point-Raft WEC
di Selat Taiwan, China19
Gambar 2.11. Bentuk Lengan A pada Floating Array-Point-Raft WEC19
Gambar 2.12. Transmisi Gear Mekanik pada Floating Array-Point-Raft
WEC20

Gambar 2.13. Ilustrasi Gelombang Laut Reguler	21
Gambar 2.14. Proses Pembentukan Gelombang Akibat Angin	21
Gambar 2.15. Definisi Parameter Gelombang Airy	22
Gambar 2.16. Klasifikasi Gelombang Berdasarkan Kedalaman Relatif	24
Gambar 2.17. Superposisi Gelombang	_27
Gambar 2.18. Notasi Analisa Energi dan Fluks Gelombang	28
Gambar 2.19. Gerakan Enam Derajat Kebebasan	30
Gambar 2.20. Skema Silinder Terapung	31
Gambar 2.21. Single Linear Mass-Spring-Damper System	33
Gambar 2.22. Penentuan Logarithmic Decrement	_36
Gambar 2.23. Contoh Karakteristik RAO dan Sudut Fase dari sebuah	
Silinder Vertikal	39
Gambar 2.24. Sistem Power Take-Off Direct Mechanical Drive System	40
Gambar 2.25. <i>Gear Ratio</i>	41
Gambar 2.26. Sistem Torsi Piringan yang Tersusun pada Shaft	_44
Gambar 2.27. Mekanisme Kesetimbangan Statis Pada Sebuah Poros	_46
Gambar 2.28. Mekanisme Kesetimbangan Dinamis Pada Sebuah Poros	_47
Gambar 2.29. Arduino Uno	_53
Gambar 2.30. Modul <i>Data Logger</i>	54
Gambar 2.31. Modul Sensor MPU 6050 Accelerometer GY 521	_56
Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian	58
Gambar 3.2. Desain Konsep DMDS–Oscillating Buoy WEC	_60
Gambar 3.3. Desain DMDS–Oscillating Buoy WEC	<u>61</u>
Gambar 3.4. Prinsip Kerja DMDS-Oscillating Buoy WEC saat Fase Naik	62
Gambar 3.5. Prinsip Kerja DMDS-Oscillating Buoy WEC saat Fase Turun	n <u>6</u> 3
Gambar 3.6. Desain Pelampung Silinder dan Balok	64
Gambar 3.7. Desain Tuas dan Disc	_65
Gambar 3.8. Inverse Gear, Gearbox dan Flywheel	<u>  66  </u>
Gambar 3.9. Desain Sprocket dan Freewheel yang Dihubungkan Rantai	66
Gambar 3.10. Desain Motor DC yang Difungsikan sebagai Generator	<u>67</u>
Gambar 3.11. Hasil Fabrikasi DMDS–Oscillating Buoy WEC	_68

Gambar 3.12. Modul <i>Data Logger</i>	69
Gambar 3.13. Tampilan Aplikasi untuk <i>Running Data Logger</i>	69
Gambar 3.14. Hardware Sensor Modul Pengukuran Sudut Gerak	
Pelampung	70
Gambar 3.15. Software untuk Penyimpanan Data Sudut Pitch	71
Gambar 3.16. Digital Spring Balance	71
Gambar 3.17. Konfigurasi Rangkaian untuk Kalibrasi Data Logger	72
Gambar 3.18. <i>Flume Tank</i> di Departemen Teknik Kelautan ITS	78
Gambar 3.19. Konfigurasi Pemasangan Model pada Flume Tank	79
Gambar 4.1. Hasil Konstanta Massa Tambah "C" Berbasis Metode	
Ursell – Tasai yang Dijalankan dengan MATLAB 7.0	
dan Grafik Konstanta Lewis Form	85
Gambar 4.2. Komparasi Grafik Konstanta Massa Tambah "C" di	
Beberapa Nilai $\Psi$ pada $\beta = 0.8$	86
Gambar 4.3. Hasil Amplitude Ratio $(\overline{A})$ Berbasis Metode Ursell – Tasai	
yang Dijalankan dengan MATLAB 7.0 dan Grafik	
Konstanta Lewis Form	86
Gambar 4.4. Komparasi Grafik $\overline{A}$ di Beberapa Nilai $\Psi$ pada $\beta = 0.8_{\dots}$	
Gambar 4.5. Ilustrasi Parameter $\beta = A_d/A_t \operatorname{dan} \Psi = B_n/h_0$	88
Gambar 4.6. Trend Kecuraman Gelombang antara Input dan	
Pembacaan Probe	91
Gambar 4.7. Konfigurasi Rangkaian untuk Kalibrasi Data Logger	<u>91</u>
Gambar 4.8. Hasil Kalibrasi Statis	_92
Gambar 4.9. Hasil Kalibrasi Dinamis	93
Gambar 4.10. Perubahan Sudut pada Pelampung Silinder	_95
Gambar 4.11. Perubahan Sudut pada Pelampung Balok	<u>96</u>
Gambar 4.12. Sudut yang Dihasilkan pada Variasi Pelampung Silinder	
dan Balok	<u>   97   </u>
Gambar 4.13. Amplitudo Gerakan <i>Heave</i> ( <i>z</i> <sub><i>a</i></sub> ) pada Semua Variasi	98
Gambar 4.14. Dinamika Struktur Akibat Gerakan Fluida	99
Gambar 4.15. Nilai Koefisien Massa Tambah pada Semua Variasi	101
Combon 4.16 Konstanta Massa Tambah nada Silindan Hanizantal	102

Gambar 4.17. Koefisien Pengembali (c) pada Semua Variasi	_104
Gambar 4.18. Sistem Osilasi Underdamped pada Semua Variasi	105
Gambar 4.19. Koefisien Redaman pada Semua Variasi	105
Gambar 4.20. Karakteristik Elevasi Gelombang dan Gerakan Heave pada	
Frekuensi Gelombang 5.61 rad/s	107
Gambar 4.21. Response Amplitude Operator (RAO) pada Kecuraman	
Gelombang 0.012	_108
Gambar 4.22. Area Frekuensi Sehubungan dengan Karakteristik Gerakan.	109
Gambar 4.23. Dokumentasi Pelampung Cenderung mengikuti Gerakan	
Gelombang saat Naik (kiri) dan Turun (kanan)	109
Gambar 4.24. Diagram Blok Simulink Mass-Spring-Damper System	110
Gambar 4.25. Daya yang Terserap oleh Mekanisme Power Take-Off pada	
Kecuraman Gelombang 0.012	_111
Gambar 4.26. Kecepatan Gerakan <i>Heave</i> pada Kecuraman Gelombang	
0.012	<u> 113 </u>
Gambar 4.27. Daya Output Total dengan Flywheel pada Semua Variasi	<u>114</u>
Gambar 4.28. Persentase Penambahan Daya dengan Flywheel	115
Gambar 4.29. Daya <i>Flywheel</i> yang Dihasilkan pada Semua Variasi	_116
Gambar 4.30. Keterserapan Daya oleh Pelampung	_117
Gambar 4.31. Daya Elektrik Rata-Rata Hasil Eksperimen	_118
Gambar 4.32. Captured Width Ratio (CWR) pada Semua Variasi	_119
Gambar 4.33. Skema Aliran Daya pada DMDS–Oscillating Buoy WEC	_120
Gambar 4.34. Efisiensi Sistem Mekanik pada Semua Variasi	120
Gambar 4.35. Pengaruh Efisiensi Penyerapan Pelampung terhadap Rasio	
antara Gaya Gesek Dinamik dan Gaya Transmisi	.121
Gambar 4.36. Penelitian Point Absorber WEC pada Gelombang Reguler	
dan Ireguler	123
Gambar 4.37. Hubungan Daya Output dengan Kecuraman Gelombang	124
Gambar 4.38. Hubungan Daya Output dengan Rasio	
Tinggi Poros–Panjang Tuas	126
Gambar 4.39. Hubungan Daya Output dengan Rasio Garis Air – Draft	127
Gambar 4.40. Hubungan Daya Output dengan Rasio	

Kedalaman Air – <i>Draft</i>	129
Gambar 4.41. Grafik Konstanta Hidrodinamik untuk Silinder pada Bebera	пра
Rasio <i>h/a</i> : (a) Massa Tambah, (b) Redaman	129
Gambar 4.42. Grafik Konstanta Hidrodinamik untuk Balok pada Beberapa	a
Rasio <i>h/a</i> : (a) Massa Tambah, (b) Redaman	130
Gambar 4.43. Hubungan Daya Output dengan Sudut Tuas Terhadap MWI	L <u>1</u> 31
Gambar 4.44. Daya Output Eksperimen pada Kecuraman Gelombang	
0.021 - 0.023	132
Gambar 4.45. Mekanisme Konversi Listrik DC ke Listrik AC	135
Gambar 4.46. Ilustrasi Implementasi DMDS-Oscillating Buoy WEC	
di Lautan	136
Gambar A1. Plot Grafik Hasil Pembangkitan Gelombang yang Terbaca ol	eh
<i>Wave Probe</i> untuk Input $H = 23$ cm, $T = 1.2$ s dan $H = 25$ cm	n,
T = 1.2  s	153
Gambar A2. Plot Grafik Hasil Pembangkitan Gelombang yang	
Terbaca oleh <i>Wave Probe</i> untuk Input $H = 23$ cm, $T = 1$ s	
dan $H = 25$ cm, $T = 1$ s	153
Gambar D1. Validasi Konstanta Massa Tambah "C" untuk $\beta_n = 0.5$	159
Gambar D2. Validasi Konstanta Massa Tambah "C" untuk $\beta_n = 0.6$	159
Gambar D3. Validasi Konstanta Massa Tambah "C" untuk $\beta_n = 0.7$	159
Gambar D4. Validasi Konstanta Massa Tambah "C" untuk $\beta_n = 0.8$	160
Gambar D5. Validasi Konstanta Massa Tambah "C" untuk $\beta_n = 0.9$	160
Gambar D6. Validasi Konstanta Massa Tambah "C" untuk $\beta_n = 1$	_160
Gambar D7. Validasi Konstanta <i>Amplitude Ratio</i> " $\overline{A}$ " untuk $\beta_n = 0.5$	161
Gambar D8. Validasi Konstanta <i>Amplitude Ratio</i> " $\overline{A}$ " untuk $\beta_n = 0.6$	161
Gambar D9. Validasi Konstanta <i>Amplitude Ratio</i> " $\overline{A}$ " untuk $\beta_n = 0.7$	161
Gambar D10. Validasi Konstanta <i>Amplitude Ratio</i> " $\overline{A}$ " untuk $\beta_n = 0.8$	162
Gambar D11. Validasi Konstanta <i>Amplitude Ratio</i> " $\overline{A}$ " untuk $\beta_n = 0.9$	162
Gambar D12. Validasi Konstanta <i>Amplitude Ratio</i> " $\overline{A}$ " untuk $\beta_n = 1$	162
Gambar E1. Desain 2D DMDS – Oscillating Buoy WEC	163
Gambar E2. Desain <i>Disc</i> dan <i>Gear</i> Transmisi	163
Gambar E3. Desain Poros Transmisi	_164

Gambar E4. Desain <i>Gearbox</i> 1:10.56	165
Gambar E5. Desain Rumah Seal dan Bearing Gearbox	166
Gambar E6. Desain Roda Gigi <i>Gearbox</i>	167
Gambar E7. Desain Poros Transmisi Gearbox	168
Gambar E8. Desain <i>Casing Gearbox</i>	169
Gambar F1. Dokumentasi Eksperimen	171

## DAFTAR TABEL

Tabel 1.1. Sea State Pengujian APR WEC di Selat Taiwan	_5
Tabel 2.1. Klasifikasi Gelombang Laut	24
Tabel 2.2. Gerakan Translational dan Rotational pada Bangunan Laut	_30
Tabel 2.3. Persamaan Inersia pada Berbagai Bentuk Benda	_42
Tabel 2.4. Faktor Skala Froude untuk Beberapa Variabel Umum	52
Tabel 3.1. Data APR WEC	_58
Tabel 3.2. Nilai Parameter pada Eksperimen DMDS–Oscillating Buoy	
WEC	_64
Tabel 3.3. Hasil Penskalaan Pelampung DMDS–Oscillating Buoy WEC	_75
Tabel 3.4. Dimensi Parameter yang Berpengaruh Terhadap Eksperimen	_75
Tabel 3.5. Perhitungan Penentuan Jarak Wave Probe terhadap Pelampung	_78
Tabel 3.6. Konfigurasi Variasi Dimensi DMDS-Oscillating Buoy WEC	_79
Tabel 3.7. Rancangan Konfigurasi Eksperimen	.80
Tabel 4.1. Tabel MAPE Konstanta Massa Tambah di Beberapa	
Nilai $\Psi$ pada $\beta = 0.8$	85
Tabel 4.2. Tabel MAPE $\overline{A}$ di Beberapa Nilai $\Psi$ pada $\beta = 0.8$	87
Tabel 4.3. Tabel MAPE	88
Tabel 4.4. Hasil Penskalaan dan Realisasi Uji DMDS–Oscillating Buoy	
WEC	89
Tabel 4.5. Hasil Perekaman Gelombang Eksperimen	90
Tabel 4.6. Pengujian dan Kalibrasi Manual Sensor Accelerometer	_94
Tabel 4.7. Hasil Perhitungan Nilai Amplitudo Gerakan Heave	97
Tabel 4.8. Parameter Hidrodinamik Simulasi untuk Koefisien Massa	
Tambah	_100
Tabel 4.9. Parameter Hidrodinamik Simulasi untuk Koefisien Redaman	_100
Tabel 4.10. Uraian Karakteristik RAO pada Semua Variasi	_108
Tabel 4.11. Perbedaan Sudut Fase (dalam Derajat)	_109
Tabel 4.12. Nilai Massa pada Setiap Variasi Eksperimen	_110
Tabel 4.13 Daya Gelombang Terserap pada Semua Variasi (dalam Watt).	_111
Tabel 4.14 Daya Elektrik Pelampung Silinder Hasil Eksperimen	134

"Halaman ini sengaja dikosongkan"

## **BAB I**

## PENDAHULUAN

## **1.1 Latar Belakang**

Energi listrik menjadi kebutuhan yang tidak terelakkan di zaman modern ini. Berbagai upaya telah dilakukan oleh Negara-negara di dunia termasuk Indonesia agar dapat mencukupi kebutuhan energi listrik. Namun untuk mencukupi kebutuhan tersebut, Indonesia terancam mengalami krisis energi dalam beberapa tahun mendatang. Hal ini disebabkan terjadinya kenaikan permintaan energi listrik yang mencapai 6.9% per tahun menurut Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) Nomor 143K/20/MEM/2019 tentang Rencana Umum Ketenagalistrikan Nasional Tahun 2019–2038. Kondisi ini juga dianalisa oleh Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT) yang dituangkan dalam *Indonesia Energy Outlook* pada tahun 2019, dimana konsumsi energi listrik hingga tahun 2050 mencapai hampir 9 kali lipat dari konsumsi tahun 2018 (Gambar 1.1).



Gambar 1.1. Kenaikan Konsumsi Energi Listrik dari Tahun 2018–2050 di Berbagai Sektor (BPPT, 2019)

Tingginya konsumsi energi tersebut ditambah oleh semakin meningkatnya pemerataan rasio elektrifikasi Indonesia yang pada akhir 2018 mencapai 98.3% (PLN, 2019) dengan rata-rata elektrifikasi di setiap provinsi lebih dari 95% (Gambar 1.2). Meskipun demikian, ternyata masih terdapat provinsi lain yang memiliki rasio elektrifikasi kurang dari 95%, khususnya provinsi yang memiliki banyak pulau seperti NTT (62%), Kalimantan Barat (87%), Kepulauan Riau (88%), Maluku (90%), Papua (90%), NTB (90%), dan Jawa Timur (94%).



Gambar 1.2. Rasio Elektrifikasi Indonesia Tiap Provinsi Tahun 2018 (PLN, 2019) Berkaitan dengan hal tersebut, salah satu alternatif untuk mencukupi kebutuhan energi di masa mendatang dan meningkatkan rasio elektrifikasi di daerah kepulauan adalah dengan menggunakan energi baru dan terbarukan (EBT). Pemanfaatan potensi energi terbarukan sebagai pembangkit listrik juga didorong pemerintah melalui Permen ESDM No. 12 Tahun 2017 dan Peraturan Pemerintah No. 79 tahun 2014 tentang Ketahanan Energi (*Indonesia Energy Outlook*, 2019). Selama ini pengembangan sektor energi terbarukan masih fokus pada energi matahari, hidro, angin, biomass dan biofuel (Gambar 1.3) sedangkan potensi energi laut masih belum menjadi prioritas untuk dikembangkan. Padahal jika melihat potensi kelautan Indonesia yang sangat besar dan pentingnya elektrifikasi di kepulauan, maka pengembangan potensi dari energi laut menjadi *supplier* energi listrik di masa depan perlu dipertimbangkan.



Gambar 1.3. Persentase Pengembangan EBT Setiap Tahun (BPPT, 2018)

Salah satu energi terbarukan berbasis kelautan yang dapat dikembangkan adalah energi gelombang laut. Energi ini sangat menjanjikan karena dapat menghasilkan energi hampir di semua wilayah laut (Masjono, 2012). Secara teori, laut mencakup lebih dari dua per tiga dari seluruh permukaan bumi, dan potensi daya yang dapat dimanfaatkan dari energi gelombang laut adalah sekitar 32 TW/tahun (Lisboa *et al.*, 2017). Konversi 10–15% dari potensi energi gelombang laut tersebut diprediksi dapat memenuhi kebutuhan energi dunia (Yusnitasari *et al.*, 2012). Fakta di Indonesia, potensi teoritis energi gelombang laut yang tercatat mencapai 141,472 GW sedangkan potensi praktisnya mencapai 1.99 GW (Balitbang ESDM dan ASELI, 2014). Pengembangan energi gelombang laut untuk diekstraksi menjadi energi listrik di Indonesia cukup prospektif dan relevan dalam rangka peningkatan rasio elektrifikasi di daerah kepulauan. Hal ini dikarenakan sebagian besar pengembangan energi gelombang laut memang ditujukan untuk elektrifikasi daerah kepulauan dan kawasan pesisir (Mukhtasor, 2012).

Karena potensi energi gelombang laut yang besar tersebut, penggunaan konverter energi gelombang (Wave Energy Converter/WEC) menjadi salah satu aspek yang penting diperhatikan (Chen et al., 2019) sehingga banyak dikembangkan dengan berbagai macam tipe dan model. Secara garis besar, berdasarkan karakteristik pemanfaatan arah gelombang WEC terbagi atas 2 macam yaitu tipe attenuator (sejajar arah gelombang) dan terminator (tegak lurus arah gelombang) (Yue et al, 2014). Attenuator ini umumnya memanfaatkan bodi apung (oscillating buoy) sehingga terbagi lagi menjadi tipe point absorber WEC dan raft WEC. Perlu diketahui bahwa WEC tipe oscillating buoy ini sangat berkembang dengan persentase implementasi mencapai 45% (Mustapa et al., 2017). Alasan mengapa oscillating buoy terus dikembangkan adalah karena kemampuannya dalam menyerap energi gelombang dalam range yang lebar dan mempunyai efisiensi konversi yang lebih tinggi (Falnes dan Perlin, 2003; Choi et al., 2012; Zhang et al., 2014; Larsson dan Falnes, 2006; Falcão, 2008). Selain itu, oscillating buoy juga memiliki ukuran divais yang lebih kecil, berbiaya lebih rendah, dan kontruksinya lebih sederhana dibandingkan tipe WEC yang lainnya (Yang dan Zhang, 2018) serta lebih cocok diterapkan pada area di sepanjang pantai (Shi et al.,

2012). Berdasarkan fakta-fakta tersebut, maka pada penelitian ini akan difokuskan untuk membahas *oscillating buoy* WEC.

Dalam rangka implementasi teknologi WEC untuk kebutuhan elektrifikasi, dengan mengacu teknologi yang sudah diterapkan di dunia tentu menjadi lebih realistis. Hal ini dikarenakan pengembangan WEC dari konsep hingga tahap komersial sangat sulit, lambat, dan mahal (Yang *et al*, 2019). WEC yang diterapkan di dunia dengan prinsip *oscillating buoy* masih memiliki banyak kelemahan seperti memiliki geometri yang lebih kecil dibandingkan panjang gelombang sehingga efisiensi penyerapannya tidak dipengaruhi oleh gelombang datang namun dipengaruhi oleh frekuensi natural yang relatif lebih tinggi dibandingkan frekuensi gelombang sehingga sangat buruk untuk penerapan pada lautan luas (António and Falcão, 2010). Selain itu, WEC ini mudah rusak di bawah kondisi gelombang ekstrim ketika amplitudo getaran berada di luar kisaran normal yang telah ditentukan (Lin *et al*, 2015). Untuk memanfaatkan kelebihan dan sekaligus mengatasi kekurangan penyerapan dan *oscillating buoy* WEC, para peneliti mengembangkan integrasi dua teknologi WEC yaitu antara *point absorber* WEC dengan *raft* WEC.

Salah satu WEC yang dikembangkan dari integrasi tersebut adalah Array-Point-Raft (APR) WEC yang telah diujikan di Selat Taiwan. WEC ini cukup menarik jika dikembangkan untuk implementasi di kepulauan terpencil karena teknologinya yang sederhana. Sistem WEC ini menggunakan multi buoy dibantu tuas yang digunakan untuk mengekstraksi daya gelombang melalui gerakan naik turun pelampung. Sistem WEC diletakkan di kapal yang relatif kecil dengan dimensi 18 m x 8 m x 2.4 m. Sistem konversi daya WEC ini adalah berbasis Power Take-Off (PTO) direct mechanical drive system atau secara sederhana menggunakan kombinasi gear mekanik untuk pengonversian dayanya. Sebenarnya terdapat metode PTO lain seperti menggunakan hydraulic converter atau direct electrical drive system (Têtu, 2017). Namun pada sistem hydraulic converter, kebocoran pelumas (oil leakage) menjadi masalah yang umum terjadi bahkan berpotensi mencemari laut sehingga berdampak buruk pada lingkungan (López et al., 2013). Sedangkan masalah pada direct electrical drive system adalah perlindungan pada komponen elektris dan pengaturan celah udara (air gap) yang membutuhkan desain rumit (Mueller, 2005). Selain itu pembuatan WEC dari kedua sistem kerja tersebut juga berbiaya mahal. Sedangkan pada *direct mechanical drive system*, selain menghabiskan biaya yang lebih murah, sistem PTO ini juga dapat mengonversi energi secara efisien (Yang *et al.*, 2019; Têtu, 2017).

Terkait hasil penelitian sebelumnya tentang APR WEC diperoleh hasil bahwa WEC ini hanya menghasilkan efisiensi kurang dari 5% pada periode gelombang kurang dari 3 sekon. Bahkan pada case 3, pada periode tersebut efisiensinya mendekati 0% yang artinya WEC tidak mampu bekerja (Gambar 1.4). Padahal dari hasil perekaman kondisi *sea state*, probabilitas gelombang yang kurang dari 3 sekon cukup banyak seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1.1.



Gambar 1.4. Hasil Pengujian APR WEC (Yang et al, 2019)

Fal	oel	1.1.	. Sea	State	Pengujian	APR	WEC	di	Selat	Taiwan	(Yang	et al	, 201	9)
-----	-----	------	-------	-------	-----------	-----	-----	----	-------	--------	-------	-------	-------	----

<i>H</i> <sub>s</sub> (m)	$T_e(s)$								
	<2.5	2.5-3.0	3.0-3.5	3.5-4.0	4.0-4.5	4.5-5.0	5.0-5.5	5.5-6.0	Total
<0.3	12	37	52	82	26	2	1		212
0.3-0.6	28	86	323	426	232	26	14	4	1140
0.6-0.9	14	66	606	772	302	142	58	12	1972
0.9-1.2	5	42	104	282	108	56	26	3	626
1.2-1.5		28	62	110	89	65	12		365
1.5-1.8			1	5	27	8	1		42
1.8-2.1			1	8	5	2			16
2.1-3.0				5	2				7
Total	59	259	1149	1690	791	301	112	19	4380

Jika energi gelombang dapat dikonversi sea state tersebut, maka tentu akan menghasilkan energi listrik yang lebih besar dan efektifitas pengonversian menjadi lebih tinggi. Ketidakmampuan APR WEC untuk mengonversi energi gelombang pada sea state tersebut dikarenakan periode gelombang yang semakin pendek akan menghasilkan simpangan gerak translasi pelampung yang semakin kecil sehingga jika dikonversi dalam gerak rotasi maka dihasilkan putaran yang kecil dan tidak cukup untuk memutar generator. Ditambah lagi pada APR WEC memiliki inersia flywheel yang besar sehingga beban mekaniknya juga semakin besar. Solusi agar sistem mampu bekerja pada kondisi gelombang tersebut adalah dengan mendesain sistem mekanik seefektif mungkin. Desain sistem mekanik dapat dilakukan dengan menaikkan rasio putaran gear dan memperkecil inersia flywheel. Oleh karena itu, pada penelitian ini dilakukan eksperimen tentang desain sistem mekanik agar sebuah WEC dapat bekerja pada range periode gelombang minimal 3 sekon pada skala prototipenya. WEC yang didesain ini selanjutnya dinamakan DMDS-Oscillating Buoy WEC. Untuk mendukung penelitian ini, beberapa desain yang dijadikan referensi mengacu pada penelitian Hazra et al., 2012; Yusnitasari et al., 2012; Cahyadi, 2014; Maris, 2015; Santoso, 2015; Susanto, 2015; Masjono, 2016; Albert et al., 2017; Pamungkas et al., 2019; Yang et al., 2019.

Gambaran singkat prinsip kerja *DMDS–Oscillating Buoy* WEC yaitu memanfaatkan gerakan *heave* pelampung akibat gelombang. Gerakan tersebut selanjutnya diteruskan oleh tuas (*lever*) untuk menggerakkan konfigurasi *gear* yang disetting menghasilkan putaran tinggi. Sistem *DMDS–Oscillating Buoy* WEC ini juga menggunakan konsep putaran searah (*unidirectional rotation*) yang dihasilkan baik saat gerakan gelombang naik maupun saat gerakan gelombang turun. Pada penelitian ini digunakan metode eksperimen yang dititik beratkan pada desain sistem mekanik yang mampu menghasilkan daya pada periode gelombang minimal 3 sekon. Desain sistem mekanik dituangkan pada sistem *gearbox* dan *flywheel* yang ditujukan agar mampu memutar generator tipe *rotary* sebaik mungkin. Selain itu, untuk mendapatkan daya yang optimal, digunakan variasi panjang tuas, bentuk pelampung, dan ketinggian poros model, sehingga dapat diketahui efektifitas kinerja sistem mekanik yang digunakan pada *DMDS–Oscillating Buoy* WEC.

#### 1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang yang telah disebutkan, perumusan masalah dari penelitian ini yaitu:

- 1. Bagaimana konfigurasi sistem mekanikal elektrikal yang tepat dari desain *DMDS–Oscillating Buoy* WEC yang dibuat dengan variasi panjang tuas, bentuk pelampung, dan ketinggian poros model terhadap permukaan air?
- 2. Bagaimana performa kinerja sistem mekanik *DMDS–Oscillating Buoy* WEC dalam menghasilkan daya listrik pada nilai periode gelombang minimum kurang dari 3 sekon baik dari hasil eksperimen maupun estimasi pada skala prototipe?
- 3. Bagaimana pengaruh parameter hidrodinamik pelampung terhadap kinerja sistem mekanikal elektrikal *DMDS–Oscillating Buoy* WEC hasil eksperimen?

## **1.3 Tujuan Penelitian**

Sesuai dengan perumusan masalah yang ada, maka tujuan dari penelitian ini antara lain:

- 1. Untuk mendapatkan konfigurasi sistem mekanikal elektrikal yang tepat dari desain *DMDS–Oscillating Buoy* WEC pada variasi panjang tuas, bentuk pelampung, dan ketinggian poros model terhadap permukaan air.
- Untuk mendapatkan performa kinerja sistem mekanik DMDS–Oscillating Buoy WEC dalam menghasilkan daya listrik pada nilai periode gelombang minimum kurang dari 3 sekon baik dari hasil eksperimen maupun estimasi pada skala prototipe.
- 3. Untuk mendapatkan parameter hidrodinamik pada pelampung yang berpengaruh pada kinerja sistem mekanikal elektrikal *DMDS–Oscillating Buoy* WEC.

#### **1.4 Manfaat Penelitian**

Manfaat yang dapat diperoleh dari penelitian ini yaitu:

- a. Sebagai kontribusi pengembangan teknologi pembangkit listrik tenaga gelombang laut.
- b. Sebagai solusi pemenuhan kebutuhan energi listrik di masa depan dari energi gelombang laut.
- c. Sebagai dasar penelitian selanjutnya (*pre-eliminary study*) yang berhubungan dengan implementasi pembangkit listrik tenaga gelombang laut.

d. Sebagai langkah maju untuk memanfaatkan potensi energi gelombang di Indonesia yang masih belum termanfaatkan sama sekali guna memenuhi kebutuhan energi listrik nasional.

## 1.5 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- 1. Hanya memodelkan mekanisme *oscillating buoy* WEC tipe *direct mechanical drive system*.
- Merupakan studi awal sehingga hanya menggunakan analisa gelombang regular atau Airy.
- 3. Rentang periode gelombang yang diujikan adalah gelombang dengan periode kurang dari 3 sekon pada skala prototipenya.
- 4. Menggunakan validasi dari simulasi numerik untuk menentukan parameter hidrodinamik.
- 5. Gerakan pelampung diasumsikan dominan pada satu derajat kebebasan saja yaitu gerakan *heave* (vertikal).
- 6. Analisa struktur bangunan WEC diluar pembahasan ini.

## 1.6 Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan dalam tesis ini adalah:

#### BAB 1. PENDAHULUAN

Pada bagian ini dijelaskan mengenai latar belakang permasalahan dari penelitian yang akan dilakukan, perumusan masalah, tujuan yang hendak dicapai, manfaat penelitian selanjutnya, batasan masalah pada penelitian, dan sistematika penulisan tesis.

#### BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

Pada bagian ini dijelaskan tentang hasil penelitian sebelumnya dan menjelaskan teori dasar yang mendukung tesis ini.

## BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN

Pada bagian ini dijelaskan tentang metode yang dilakukan dalam eksperimen melalui diagram alir (*flow chart*) dan disusun *step by step* secara sistematis.

## BAB 4. ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini dijelaskan mengenai hasil studi eksperimen yang telah dilakukan di Laboratorium Energi dan Lingkungan Laut pada kolam gelombang *(flume tank)* Departemen Teknik Kelautan ITS. Selain itu juga dilakukan analisa terhadap data yang diperoleh.

## BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bagian ini dijelaskan tentang penarikan kesimpulan berdasarkan tujuan yang hendak dicapai pada tesis ini, serta memberikan saran pengembangan untuk penelitian selanjutnya. "Halaman ini sengaja dikosongkan"
# BAB II TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Penelitian Terkait Sebelumnya

Penelitian mengenai sumber energi terbarukan dari laut seperti pasang surut, arus (Rahmawati *et al.*, 2016), angin (Purba *et al.*, 2014), gelombang (Sugianto *et al.*, 2017) dan panas laut (Koto, 2016), bukan termasuk hal baru di Indonesia. Pemetaan potensi energi laut di Indonesia pun telah dilakukan (IRENA, 2017; Purba *et al.*, 2015) yang kemudian diikuti dengan penelitian-penelitian yang mengurai potensi energi dalam skala lokal dengan lebih detail (Alifdini *et al.*, 2018). Memasuki tahap berikutnya, penelitian mengenai teknologi pembangkit yang sesuai dengan masing-masing karakter sumber energi laut terbarukan tersebut mulai berkembang, baik yang dikembangkan untuk dioperasikan di laut dalam dan transisi (Rahmawati *et al.*, 2018; Mutsuda *et al.*, 2019) maupun di laut dangkal (Adiputra *et al.*, 2019), dimana proporsi terbanyak berasal dari penelitian untuk konversi energi dari arus pasang surut mengingat banyaknya selat di antara kepulauan-kepulauan di Indonesia. Padahal, potensi energi teoritis dari gelombang lalut diestimasikan jauh lebih besar (510 GW) ketimbang arus pasang surut air laut (160 GW) (Quirapas, 2015).

Penelitian tentang konverter energi gelombang laut (WEC) telah banyak dilakukan meskipun hanya beberapa saja yang diterapkan secara nyata. Hambatan dalam tahap implementasi ini sebagian besar disebabkan karena faktor biaya implementasi WEC yang besar. Tantangan para peneliti saat ini adalah bagaimana membuat desain WEC yang optimal dengan biaya implementasi yang murah. Hingga saat ini, konsep WEC yang dianggap paling ekonomis adalah tipe pelampung (*oscillating buoy*) sehingga persentase implementasinya mencapai 45% (Mustapa *et al.*, 2017). Desain *oscillating buoy* WEC juga bermacam-macam tergantung pada lokasi implementasinya. WEC yang berlokasi di laut lepas dan membutuhkan mekanisme *mooring* tentu membutuhkan biaya investasi yang lebih mahal dibandingkan WEC yang ditempatkan di pesisir pantai. Jika dikaitkan dengan kondisi kekinian Indonesia yang memiliki banyak pulau dan kawasan

pesisir, maka penerapan WEC tipe apung untuk lokasi *onshore* lebih *feasible* diterapkan. Beberapa penelitian WEC tipe apung telah banyak dilakukan dengan berbagai variasi. Sesuai dengan fokusan penelitian ini, maka referensi yang digunakan adalah *oscillating buoy* WEC berbasis *direct mechanical drive system* menggunakan sistem *lever* atau tuas.

Hazra *et al* (2012) melakukan eksperimen dengan mendesain sistem WEC yang dinamakan OWSC (*Oscillating Wave Surge Converter*). Skema kerja yang pada Gambar 2.1 menunjukkan bahwa sistem OWSC yang dibuat menggunakan *paddle* atau semacam dayung dengan memanfaatkan gerakan *surge* dari gelombang laut. OWSC akan bergerak maju mundur sehingga memutar *gearbox* yang terkopel dengan *rotary generator AC* tipe PMSG (*Permanent Magnet Synchronous Generator*). Putaran awal yang dihasilkan sekitar 5 sampai 25 rpm dan ditingkatkan menjadi 1500 rpm menggunakan *gearbox*. Penelitian ini fokus pada peningkatan kecepatan rotasi melalui desain generator yang lebih efektif hingga pada tahap implementasi sistem elektronika daya dengan keluaran *smooth* dan penggunaan *storage* berupa superkapasitor. Kelemahan WEC ini adalah lebih pada sistem yang menghasilkan kecepatan input sangat rendah sehingga desain generator hingga sistem elektrisnya membutuhkan desain yang kompleks dan biaya yang mahal.



Gambar 2.1. Konsep OWSC Berbasis Sistem Paddle dan Rotary Generator

Selanjutnya adalah penelitian dari Yusnitasari *et al* (2012) yang melakukan eksperimen skala laboratorium pada model WEC tipe pelampung bola–tuas dengan variasi pembebanan dan panjang tuas serta menggunakan *rotary generator* (Gambar 2.2). Model tersebut diuji pada *flume tank* berukuran 4.5 m x 1 m x 0.7 m. Konsep kerja WEC yang dibuat adalah memanfaatkan kondisi turunnya gelombang laut. Ketika gelombang bergerak turun, *bearing* satu arah akan mengunci yang menyebabkan poros berputar, sedangkan ketika air bergerak naik maka pelampung

ikut naik dan menggerakkan tuas namun *bearing* satu arah dalam keadaan bebas atau tidak terkunci sehingga poros tidak ikut bergerak. Hasil yang diperoleh adalah bahwa pada panjang tuas dan tinggi gelombang yang besar, energi yang dihasilkan juga besar. Kelemahan pada penelitian ini yaitu hanya memanfaatkan gerakan turun gelombang yang ditunjang oleh massa pelampung dan massa tuas yang digunakan sehingga listrik yang dihasilkan generator hanya pada salah satu fase saja.



Gambar 2.2. Konsep dan Eksperimen WEC Tipe Pelampung Bola–Tuas dengan *Rotary Generator* 

Cahyadi (2014) melakukan eksperimen sistem WEC tipe pelampung – tuas dengan variasi bentuk pelampung bola, silinder tegak dan oval. Prinsip kerja WEC yang digunakan menggunakan konsep tuas yang dihubungkan serangkaian *gear* dan generator. Parameter yang digunakan yaitu panjang penampang yang terkena air untuk pelampung bola sebesar 9.8 cm, pelampung silinder tegak 9.5 cm, pelampung oval 8.8 cm; frekuensi *wave maker* disetting pada 9 Hz, 12 Hz, 15 Hz; dan tinggi strok 5 cm, 6.25 cm, 7.5 cm. Hasil yang diperoleh yaitu bentuk pelampung bola memiliki daya serap energi yang terbesar. Efisiensi yang dihasilkan WEC yang digunakan mencapai 12.09% yang terjadi pada tinggi strok 7.5 cm dan frekuensi *wave maker* 15 Hz. Kelemahan penelitian ini adalah terlalu kecilnya fisik model sehingga power input akibat peningkatan daya gelombang menjadi semakin besar. Implikasinya adalah terjadinya penurunan efisiensi daya saat input terus bertambah.

Maris (2015) melakukan penelitian eksperimen WEC tipe pelampung bolatuas dengan variasi titik tumpu tuas pengungkit dan massa pelampung serta menggunakan *linear generator* (Gambar 2.3). Prinsip kerja WEC yang ditawarkan adalah mengonversi gerakan naik turun gelombang dengan memanfaatkan jarak tumpuan tertentu di tuas dan kemudian gerakan naik turun yang dihasilkan akan menggerakkan *linear generator*. Parameter yang digunakan yaitu menggunakan tinggi gelombang 7 cm; variasi massa pelampung 0.363 kg, 0.388 kg, 0.413 kg; dan 4 titik tumpu tuas dengan titik tumpu keempat (T4) memiliki jarak terjauh dari pelampung. Hasil yang diperoleh yaitu kombinasi T4 dan massa pelampung terkecil (0,363 kg) memberikan hasil output daya yang lebih besar dibandingkan kombinasi yang lain. Kelemahan pada sistem ini adalah output daya yang dihasilkan hanya mampu menghasilkan GGL Induksi pada satu arah saja (naik atau turun) tergantung polaritas yang disetting. Selain itu, hasil eksperimen dan simulasi menunjukkan *error* yang besar dan efisiensi maksimal sistem hanya mencapai 0.988%.



Gambar 2.3. Konsep dan Eksperimen WEC Tipe Pelampung Bola–Tuas dengan *Linear Generator* 

Santoso (2015) melakukan penelitian eksperimen WEC tipe pelampung silinder-tuas dengan variasi inersia tuas dan ketinggian model terhadap permukaan air serta menggunakan *rotary generator* (Gambar 2.4). Prinsip kerja WEC ini adalah pelampung silinder akan bergerak naik turun akibat gelombang laut. Dikarenakan pelampung ditopang oleh tuas dan terhubung dengan poros yang terdapat *one-way bearing*, maka pada poros terjadi putaran searah. Putaran pada poros itu ditransmisikan menggunakan roda gigi lurus untuk menggerakkan *gearbox* sehingga dapat memutar generator dan dapat menghasilkan listrik. Parameter yang digunakan yaitu model disetting pada ketinggian 5 cm, 10 cm, 15 cm dari permukaan air; variasi inersia 0.032 kgm<sup>2</sup>, 0.029 kgm<sup>2</sup>, 0.026 kgm<sup>2</sup>; dan tinggi gelombang 8 cm. Hasil yang diperoleh yaitu daya output terbesar dihasilkan pada ketinggian 5 cm dari permukaan air dan inersia 0.026 kgm<sup>2</sup> yang dapat diartikan bahwa semakin besar inersia tuas dan ketinggian model WEC terhadap permukaan air, maka daya output yang dihasilkan semakin menurun. Kelemahan

pada penelitian ini yaitu hanya memanfaatkan gerakan naik gelombang saja sedangkan ketika turun, sistem menggunakan *one-way bearing* sehingga listrik yang dihasilkan generator hanya pada salah satu fase saja. Efisiensi yang dihasilkan sistem juga sangat kecil yaitu sebesar 0.106%.



Gambar 2.4. Konsep dan Eksperimen WEC Tipe Pelampung Silinder–Tuas dengan *Rotary Generator* 

Susanto (2015) melakukan eksperimen sistem WEC tipe pelampung silinder-tuas dengan variasi dimensi pelampung dan panjang tuas serta menggunakan *rotary generator* (Gambar 2.5). Sistem WEC yang diusulkan hampir sama dengan penelitian Santoso (2015), namun sistem WEC ini menggunakan jumlah *gear* lebih banyak untuk mengakomodir gerakan baik saat gelombang naik maupun gelombang turun sehingga kinerja generator lebih kontinyu. Kombinasi yang digunakan yaitu *wave maker* disetting pada frekuensi 1 Hz, 2 Hz, 3 Hz; tinggi gelombang 11 cm; panjang tuas disetting 50 cm, 45 cm, 30 cm; panjang pelampung disetting 30 cm, 28 cm, 25 cm; dan rasio *gearbox* 1:12. Hasil yang diperoleh yaitu daya terbesar dihasilkan pada setting *wave maker* 3 Hz, panjang tuas 30 cm, dan panjang pelampung 30 cm. Efisiensi rata-rata yang dihasilkan sistem sekitar 9,079% dan mampu mencapai efisiensi maksimum sebesar 15,029%.



Gambar 2.5. Konsep dan Eksperimen WEC Tipe Pelampung Silinder–Tuas Menggunakan Konfigurasi *Gear* Kompleks dengan *Rotary Generator* 

Masjono et al (2016) telah meneliti WEC tipe apung dengan sistem oneway gear untuk pengoperasian pada gelombang ireguler menggunakan metode analitis dan numerik. Konsep WEC yang ditawarkan yaitu memanfaatkan pelampung (gravity weight) yang terpancang dengan rantai dan terhubung dengan one-way gear. Proses konversi dimulai dari interaksi antara gelombang dan gravity weight yang menghasilkan gerakan vertikal (heave). Pergerakan ini terhubung dengan one-way gear untuk mengonversi gerak vertikal menjadi gerakan rotasi satu arah dan *counter weight* untuk mengondisikan rantai tetap lurus. Deretan pasangan gear yang dihubungkan di poros akan membentuk putaran yang kontinyu untuk memutar generator listrik. Agar bekerja, konverter ini harus dipasang searah dengan gelombang laut sehingga pelampung yang pertama bekerja adalah  $M_1$  dan m<sub>1</sub>, lalu diikuti oleh pelampung berikutnya. Pada Gambar 2.6 menunjukkan sistem WEC dari Masjono et al (2016). Hasil simulasi dari penelitian ini menunjukkan bahwa perubahan tinggi gelombang berpengaruh sangat signifikan terhadap energi yang dihasilkan. Namun pada penelitian ini, pemanfaatan gelombang hanya dilakukan pada saat pelampung naik, sedangkan pada saat pelampung bergerak turun sistem tidak bekerja karena adanya one-way gear.



Gambar 2.6. Konsep WEC tipe Multi Pelampung–Tuas Satu Poros Menggunakan One-Way Gear

Albert *et al* (2017) melakukan eksperimen pada sistem WEC yang dinamakan ALETTONE. Konsep WEC ini adalah menggunakan empat tuas yang saling terhubung (*four bar linkage*) dengan pergerakan pada bidang vertikal dan horisontal (Gambar 2.7).



Gambar 2.7. Konsep WEC ALETTONE Berbasis Sistem Empat Bar Terintegrasi

Prinsip kerja sistem WEC ini adalah gelombang laut akan memberikan gaya ke bar *c* sehingga bergerak naik turun. Bar ini terhubung dengan engsel O yang membantu dalam pergerakan. Ketika gerakan ke atas maka bar *b* akan turut bergerak ke atas sehingga akan menggerakkan bar *a* untuk memutar *gear* yang terkopel dengan *rotary generator*. Sedangkan ketika gerakan ke bawah, sistem kembali pada posisi normal karena pengaruh *one-way clutch*. Pada penelitian ini dilakukan perbandingan antara mekanisme single *one-way clutch* dan *couple one-way clutch* (Gambar 2.8). Hasilnya adalah penggunaan sistem *couple one-way* 

*clutch* menghasilkan efisiensi daya yang lebih besar yaitu 12,7% dibandingkan sistem *one-way clutch* yang menghasilkan efisiensi daya sebesar 11,8%.



Gambar 2.8. Transmisi *Gear* Mekanik pada WEC ALETTONE: *One-Way Clutch* (kiri), dan *Couple One-Way Clutch* (kanan)

Pamungkas *et al* (2019) melakukan eksperimen WEC tipe pelampung menggunakan sistem transmisi sproket dan variasi panjang tuas serta menggunakan *rotary generator* (Gambar 2.9). Prinsip kerja sistem WEC ini adalah memanfaatkan mekanisme pendulum yang ditempatkan di atas ponton. Besarnya naik turun pelampung ditentukan oleh panjang tuas, yang kemudian menggerakkan poros searahkan dengan dipasang *one-way bearing*. Untuk menghubungkan generator dan poros maka digunakan transmisi dengan sproket. Parameter yang digunakan dalam eksperimen yaitu *wave maker* disetting 0.8 Hz, 1 Hz, 1.4 Hz; variasi panjang tuas 37 cm, 42 cm, 47.5 cm; panjang pelampung 12.5 cm; dan rasio sproket 1:2. Hasil yang diperoleh yaitu nilai daya output terbesar diperoleh pada variasi *wave maker* 1.4 Hz dan panjang tuas 47.5 cm yang dapat diartikan bahwa semakin panjang tuas yang digunakan, output daya yang dihasilkan semakin besar. Efisiensi yang dihasilkan sistem WEC ini mencapai 4%.



Gambar 2.9. Konsep dan Eksperimen WEC Tipe Pelampung Menggunakan Transmisi Sproket dengan *Rotary Generator* 

Yang *et al* (2019) melakukan eksperimen performa dari *floating array-point -raft* WEC (APR WEC) berkapasitas 10 kW yang dipasang di Selat Taiwan, China. Konsep WEC ini adalah menggunakan *multi buoy* yang ditempatkan di struktur apung berupa kapal (Gambar 2.10).



Gambar 2.10. Konsep dan Implementasi *Floating Array-Point-Raft* WEC di Selat Taiwan, China

Kemudian sistem WEC yang diterapkan yaitu menggunakan *oscillating buoy* dan transmisi *gear* mekanik. Untuk *oscillating buoy* yang digunakan menggunakan bentuk lengan V atau A karena dapat menurunkan gaya *mooring* secara signifikan (Pecher *et al.*, 2012) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.11



Gambar 2.11. Bentuk Lengan A pada Floating Array-Point-Raft WEC

Sedangkan bentuk transmisi *gear* mekanik yang digunakan adalah *two-way transmission gearset* (Gambar 2.12) untuk membuat putaran searah pada *rotary generator* tipe PMG (*Permanent Magnet Generator*).



Parameter yang fokus diteliti oleh Yang *et al* (2019) adalah pengaruh jumlah *oscillating buoy* yang digunakan dengan jumlah 10 (Case I), 6 (Case II), dan 2 (Case II). Hasilnya adalah efisiensi daya yang dihasilkan PMG yaitu 9.53% untuk Case I, 14.57% untuk Case II, dan 26.65% untuk Case III. Hal ini menunjukkan sistem WEC lebih efisien jika menggunakan jumlah *buoy* yang lebih sedikit karena pengaruh redaman WEC. Selain itu, efisiensi konversi energi meningkat terhadap resistansi ketika jumlah *oscillating buoy* tetap. Hal ini dikarenakan seiring meningkatnya resistansi menyebabkan koefisien redaman elektris mendekati nilai koefisien redaman optimum. Frekuensi natural dari WEC juga mendekati frekuensi gelombang laut. Sedangkan efisiensi konversi energi menurun pada periode mengindikasikan bahwa daya output meningkat dan variasi *range* daya output menurun pada penggunaan lebih banyak *buoy*. Artinya lebih banyak *buoy* menguntungkan untuk meningkatkan produksi energi listrik dan meningkatkan kualitas daya.

#### 2.2 Teori Gelombang Laut

#### 2.2.1 Dasar Gelombang Laut Reguler

Gelombang dasar biasanya dianggap sebagai variasi sinusoidal pada ketinggian permukaan air dan dapat didefinisikan memiliki ketinggian (H) yang merupakan jarak vertikal dari puncak gelombang ke lembah gelombang, panjang gelombang (L) yang merupakan jarak antara dua titik yang sama dari gelombang, dan periode gelombang (T) yang merupakan waktu yang dibutuhkan untuk mengulangi gelombang (Gambar 2.13) (Folley, 2017).



Gambar 2.13. Ilustrasi Gelombang Laut Reguler (Pecher dan Kofoed, 2016)

Gelombang laut sebagian besar disebabkan oleh angin yang bertiup atas air (Gambar 2.14). Gelombang pada awalnya dibentuk oleh proses resonansi dan pergeseran yang kompleks, dimana gelombang dengan tinggi, panjang dan periode gelombang yang berbeda dihasilkan dan bergerak ke berbagai arah. Setelah terbentuk, gelombang laut dapat menyebar secara luas dengan mengurangi ketinggian namun mempertahankan panjang gelombang dan periodenya (Reeve *et al.*, 2018).



Gambar 2.14 Proses Pembentukan Gelombang Akibat Angin (Reeve et al, 2018)

Salah satu pendekatan yang banyak digunakan sebagai acuan perhitungan gelombang laut adalah Teori Gelombang Amplitudo Kecil atau Teori Gelombang Airy. Teori ini merupakan dasar yang penting karena mudah dan handal untuk sebagian besar daerah gelombang. Secara matematis teory Airy dapat dipertimbangkan sebagai pendekatan pertama yang dapat dijelaskan secara teoritis untuk seluruh perilaku gelombang (Pratikto *et al.*, 2013). Namun, teori gelombang Airy hanya berlaku untuk kondisi dimana tinggi gelombang kecil dibandingkan dengan panjang gelombang dan kedalaman air (Reeve *et al.*, 2018).

Pada teori gelombang Airy Gambar 2.15 menggambarkan gelombang monokromatik yang bergerak dengan kecepatan (*C*) pada kedalaman (*d*) dalam sistem koordinat *x* dan *z*. Sumbu *x* adalah posisi muka air diam (SWL) dan di bagian bawah adalah z = -d. Profil permukaan gelombang didefinisikan oleh  $z = \eta$ , dimana  $\eta$  adalah fungsi dari *x* dan waktu *t* (Sorensen, 2006).



**Gambar 2.15.** Definisi Parameter Gelombang Airy (Sorensen, 2006) Berdasarkan Gambar 2.15 dapat dijelaskan bahwa:

d = Jarak antara muka air rata dan dasar laut (kedalaman laut)

 $\eta$  (*x*,*t*) = Fluktuasi muka air terhadap muka air diam

H = Tinggi gelombang

- A = Amplitudo gelombang (H/2)
- *L* = Panjang gelombang, yaitu jarak antara dua puncak gelombang yang berurutan
- T = Periode gelombang, yaitu interval waktu yang diperlukan untuk mengulangi gelombang

- $\zeta$  = Perpindahan partikel air dalam arah horizontal
- $\varepsilon$  = Perpindahan partikel air dalam arah vertikal
- C = Kecepatan rambat gelombang (L/T)
- k = Angka gelombang (2 $\pi/L$ )
- $\omega$  = Frekuensi anguler gelombang ( $2\pi/T$ )

Penerapan persamaan Laplace (Salmon, 2002), *bottom boundary condition*, *kinematic boundary condition* dan linierisasi *dynamic boundary condition* dapat menghasilkan persamaan potensial kecepatan dengan rumus (Sorensen, 1997):

$$\phi(x, z, t) = \frac{gH}{2\omega} \frac{\cosh k \, (d+z)}{\cosh k d} \sin \left(kx - \omega t\right) \tag{2.1}$$

dimana *z* merupakan kedalaman tertentu (*deep of interest*) dan *d* merupakan kedalaman laut (Kamphuis, 2000). Dengan memasukkan persamaan potensial kecepatan pada linierisasi *dynamic boundary condition* diperoleh persamaan elevasi muka air yaitu:

$$\eta = \frac{H}{2}\cos(kx - \omega t) = \frac{H}{2}\cos 2\pi \left(\frac{x}{L} - \frac{t}{T}\right)$$
(2.2)

Kombinasi *kinematic boundary condition* dan *dynamic boundary condition* serta menghilangkan elevasi muka air menghasilkan:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} + g \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \text{ pada } z = 0$$
(2.3)

Dengan memasukkan potensial kecepatan selanjutnya diperoleh:

$$\omega^2 = gk \tanh kd \tag{2.4}$$

Karena  $\omega = kC \operatorname{dan} k = 2\pi/L$  maka didapatkan persamaan kecepatan rambat gelombang (kecepatan fase) sebagai fungsi dari panjang gelombang yaitu:

$$C = \frac{\omega}{k} = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh kd} = \sqrt{\frac{gL}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{L}}$$
(2.5)

Dengan mensubstitusikan C = L/T maka didapatkan persamaan kecepatan rambat gelombang dan panjang gelombang sebagai fungsi dari periode gelombang.

$$C = \frac{gT}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{L}$$
(2.6)

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{L}$$
(2.7)

# 2.2.2 Klasifikasi Gelombang Laut

Gelombang dapat diklasifikasi ke dalam beberapa cara. Namun, klasifikasi gelombang laut yang paling umum digunakan adalah berdasarkan periode dan panjang gelombang (Toffoli *et al*, 2017). Secara ringkas klasifikasi tersebut ditunjukkan pada Tabel 2.1

Classification	Period Band	Generating Forces	<b>Restoring Forces</b>
Capillary waves	<0.1 s	Wind	Surface tension
Ultragravity waves	0.1 - 1 s	Wind	Surface tension and gravity
Gravity waves	1 - 20  s	Wind	Gravity
Infragravity waves	20 s to 5 min	Wind and atmospheric pressure gradients	Gravity
Long-period waves	5 min to 12 h	Atmospheric pressure gradients and earthquake	Gravity
Ordinary tidal waves	12 - 24 h	Gravitational attraction	Gravity and Coriolis force
Transtidal waves	>24 h	Storms and gravitational attraction	Gravity and Coriolis force

Tabel 2.	<b>1.</b> Kl	asifikasi	Gelombang	Laut	(Toffoli	et al.,	2017)
----------	--------------	-----------	-----------	------	----------	---------	-------

Selain klasifikasi tersebut, penting juga dilakukan klasifikasi gelombang yang didasarkan pada kedalaman relatif (d/L). Ketika gelombang merambat dari perairan dalam ke perairan dangkal dekat pantai, maka panjang gelombang berkurang. Kedalaman relatif juga berkurang ketika gelombang mendekati pantai (Sorensen, 2006). Secara singkat, klasifikasi tersebut dijelaskan pada Gambar 2.16.



Gambar 2.16. Klasifikasi Gelombang Berdasarkan Kedalaman Relatif (Disesuaikan dari Garrison, 2010)

Ketika nilai kedalaman relatif d/L > 1/2 (*deep water wave*), maka nilai tanh  $(2\pi d/L)$  bernilai 1, sehingga persamaan 2.6 dan 2.7 dapat ditulis:

$$C_{\rm o} = \frac{gT}{2\pi} \tag{2.8}$$

$$L_{\rm o} = \frac{gT^2}{2\pi} \tag{2.9}$$

Sedangkan ketika kedalaman relatif d/L < 1/2, karakteristik gelombang mulai terpengaruh oleh dasar laut. Karakteristik gelombang juga dipengaruhi oleh periode dan terus berubah seiring perubahan kedalaman. Persamaan dispersi digunakan untuk menghitung kecepatan rambat atau panjang gelombang untuk beberapa kedalaman dan periode (Sorensen, 2006). Pada kedalaman relatif antara 1.2 hingga 1/20 (*transitional water wave*) kecepatan rambat dan periode gelombang dihitung menggunakan persamaan (2.5), (2.6) dan (2.7) (Triatmodjo, 1999).

Pada kedalaman relatif d/L < 1/20 (*shallow water wave*), kecepatan rambat gelombang tidak tergantung pada periode namun hanya terpengaruh oleh kedalaman perairan. Pada kedalaman ini, nilai tanh  $(2\pi d/L)$  mendekati  $2\pi d/L$ , sehingga persamaan (2.5) dan (2.7) dapat dituliskan sebagai berikut:

$$C = \sqrt{gd} \tag{2.10}$$

$$L = CT = \sqrt{gd}T \tag{2.11}$$

Persamaan (2.10) dan (2.11) menunjukkan bahwa di laut dangkal, cepat rambat dan panjang gelombang hanya bergantung pada kedalaman perairan. Untuk kondisi gelombang transisi (1/20 < d/L < 1/2), nilai cepat rambat dan panjang gelombang dihitung dengan:

$$C = \frac{gT}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{L}$$
(2.12)

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{L}$$
(2.13)

Selain itu, nilai *C* juga dapat dicari menggunakan pendekatan dari Hunt (1979), sedangkan *L* dapat dicari menggunakan pendekatan dari Fenton (1990) yaitu:

$$\frac{C^2}{gd} = \left[ y_0 + \left( 1 + 0.6522 \, y_0 + 0.4622 \, y_0^2 + 0.0864 \, y_0^4 + 0.0675 \, y_0^5 \right)^{-1} \right]^{-1}, \, y_0 = \frac{2\pi d}{L_0} \, (2.14)$$

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \left\{ \tanh\left(\frac{\omega^2 d}{g}\right)^{3/4} \right\}^{2/3} \quad (2.15)$$

# 2.2.3 Kinematika Gelombang Laut

Kinematika gelombang laut sangat terkait dengan kecepatan dan percepatan partikel air dalam gelombang. Komponen kecepatan horisontal (u) dan kecepatan vertikal (w) dapat ditentukan dari potensial kecepatan pada persamaan (2.1) yaitu:

$$u = \frac{\partial \phi}{\partial x} \, \mathrm{dan} \, w = \frac{\partial \phi}{\partial y} \tag{2.16}$$

Penyelesaian persamaan tersebut menghasilkan:

$$u = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh k(z+d)}{\sinh kd} \sin (kx - \omega t)$$
(2.17)

$$w = \frac{\pi H}{T} \frac{\sinh k(z+d)}{\sinh kd} \sin \left(kx - \omega t\right)$$
(2.18)

Integrasi persamaan (2.17) dan (2.18) akan menghasilkan persamaan perpindahan partikel ke arah horizontal ( $\zeta$ ) dan vertikal ( $\varepsilon$ ).

$$\zeta = -\frac{H}{2} \frac{\cosh k(z+d)}{\sinh kd} \sin(kx - \omega t)$$
(2.19)

$$\varepsilon = \frac{H}{2} \frac{\sinh k(z+d)}{\sinh kd} \cos(kx - \omega t)$$
(2.20)

Sedangkan penurunan persamaan (2.17) dan (2.18) akan menghasilkan persamaan percepatan partikel ke arah horizontal  $(a_u)$  dan vertikal  $(a_w)$ .

$$a_{u} = \left(\frac{2\pi^{2}H}{T^{2}}\right) \frac{\cosh k(z+d)}{\sinh kd} \sin(kx - \omega t)$$
(2.21)

$$a_{w} = \left(-\frac{2\pi^{2}H}{T^{2}}\right) \frac{\sinh k(z+d)}{\sinh kd} \cos(kx - \omega t)$$
(2.22)

Jika dua gelombang harmonik dengan tinggi yang sama dan panjang dan periode gelombang yang sedikit berbeda saling tumpang tindih (superposisi), maka profil elevasi gelombang diilustrasikan pada Gambar 2.17 dan dihasilkan persamaan yaitu:

$$\eta = \eta_1 + \eta_2 \tag{2.23}$$

Pada Gambar 2.16, dalam waktu dt, perbedaan panjang gelombang dituliskan dengan dL, dan perbedaan kecepatan dituliskan dengan dC. Hubungan yang didapatkan ialah dt=dL/dC. Kelompok gelombang melaju dengan jarak dx dan waktu dt dimana dx adalah jarak yang ditempuh gelombang dalam interval waktu

dikurangi satu panjang gelombang. Sehingga kecepatan kelompok gelombang dapat dituliskan sebagai berikut (Triatmodjo, 1999).

$$dx = \left(\frac{(C+dC)+C}{2}\right)dt - \frac{(L+dL)+L}{2} \approx Cdt - L$$
(2.24)

$$C_g = \frac{dx}{dt} = \frac{Cdt - L}{dt} = C - \frac{L}{dt}$$
(2.25)

Mengingat dt = dL/dC, maka persamaan (2.25) dapat dituliskan sebagai berikut:

$$C_g = C - L \left(\frac{dC}{dL}\right) \tag{2.26}$$

Di perairan dalam dL/dC = C/2L, maka persamaan kecepatan grup di perairan dalam sama dengan setengah dari kecepatan fase (*C*). Untuk perairan dangkal dC/dL = 0 sehingga nilai  $C_g = C$  yang nilainya menggunakan persamaan (2.10). Secara umum kecepatan grup dituliskan dengan persamaan (2.27).

Persamaan Umum 
$$C_g = \frac{C}{2} \left( 1 + \frac{2kd}{\sin(2kd)} \right)$$
 (2.27)

sedangkan untuk:

Shallow water 
$$C_g = C$$
 (2.28)

Deep water 
$$C_g = C_{go} = C/2$$
 (2.29)

Atau dapat dikatakan  $C_g = nC$  dimana *n* adalah rasio kecepatan grup terhadap kecepatan fase:



Gambar 2.17. Superposisi Gelombang (Sorensen, 2006)

# 2.2.4 Analisa Energi dan Daya Gelombang Laut

Pada sebuah gelombang terdapat energi potensial dari sebuah elemen massa dari air yang dipindahkan di atas SWL seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.18.



**Gambar 2.18.** Notasi Analisa Energi dan Fluks Gelombang (McCormick, 2010) Elemen massa dari air yang dipindahkan tersebut dirumuskan dengan:

$$\delta m = \rho_{sw} \eta(\delta x) b \tag{2.31}$$

dimana  $\rho_{sw}$  merupakan massa jenis air laut (1025 kg/m<sup>3</sup>), *b* merupakan lebar puncak gelombang dan perpindahan air pada permukaan bebas  $\eta$  diposisikan pada garis tengah vertikal dari elemen simetris horizontal dan vertikal. Nilai  $\eta$  dapat dirumuskan dengan persamaan (2.2). Panjang elemen  $\delta x$  diasumsikan sangat kecil sehingga dapat diabaikan (McCormick, 2010). Jika pusat massa berada pada jarak  $\eta/2$  diatas SWL, maka elemen energi potensial dari massa yaitu:

$$\delta E_p = g(\delta m)\eta/2 = \frac{1}{2}\rho_{sw} g \eta^2 b \tag{2.32}$$

Dalam satu panjang gelombang, maka dapat diperkirakan total energi potensial yang dihasilkan yaitu:

$$E_{p} = \frac{\rho_{sw} g H^{2} b}{8} \int_{0}^{L} \cos^{2}(kx - \omega t) dx = \frac{\rho_{sw} g H^{2} L b}{16}$$
(2.33)

Selanjutnya energi kinetik dari elemen massa yang tercelup air dirumuskan dengan:

$$\delta E_k = \frac{1}{2} \rho_{sw} \left( u^2 + w^2 \right) b \, \delta x \, \delta z \tag{2.34}$$

u merupakan kecepatan partikel arah horizontal dan w merupakan kecepatan arah vertikal (Persamaan 2.17 dan 2.18), sehingga pada kedalaman dan panjang gelombang tertentu, total energi kinetik yang dihasilkan yaitu:

$$E_{k} = \frac{1}{2}\rho_{sw}b\int_{-d}^{0}\int_{0}^{L} \left(u^{2} + w^{2}\right)dx\,dz = \frac{\rho_{sw}g\,H^{2}Lb}{16}$$
(2.35)

Energi yang tersimpan pada gelombang terdiri atas energi kinetik dan energi potensial. Jumlah dari energi kinetik dan energi potensial merupakan total energi gelombang yang dapat dibangkitkan (Muetze dan Vining, 2006), sehingga:

$$E = E_p + E_k = \frac{1}{8}\rho_{sw} g H^2 Lb$$
 (2.36)

Total energi tersebut memiliki rata-rata kerapatan energi (*average energy density*) yang didefinisikan sebagai fluks energi rata-rata pada bidang vertikal yang sejajar puncak gelombang, dan dirumuskan dengan (Muetze dan Vining, 2006):

$$\overline{E} = \frac{E}{Lb} = \frac{1}{8}\rho_{sw}gH^2 = \frac{1}{2}\rho_{sw}gA^2$$
(2.37)

dimana A merupakan amplitudo gelombang dalam meter.

Rata-rata kerapatan energi gelombang jika dikalikan dengan kecepatan grup gelombang ( $C_g$ ) akan menghasilkan daya per meter *wave front* yang merupakan fluks energi rata-rata pada *fixed control surface* ( $C_g$ ) (Sheng dan Lewis, 2012), dengan rumus:

$$\frac{dE}{dt} = P_w = \overline{E}C_g \tag{2.38}$$

 $C_g$  pada persamaan (2.27) juga dapat dirumuskan dengan (Thomas *et al.*, 2007):

$$C_{g} = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right) \frac{\omega}{k}$$
(2.39)

di laut dalam (deep water) nilai:

$$C_{go} = \frac{\omega}{2k} = \frac{L_o}{2T} = \frac{\left(gT^2/2\pi\right)}{2T} = \frac{gT}{4\pi}$$
(2.40)

sehingga persamaan daya di laut dalam yaitu:

$$P_{wo} = \frac{1}{8} \rho_{sw} g H^2 \left(\frac{gT}{4\pi}\right) = \frac{1}{32\pi} \rho_{sw} g^2 H^2 T$$
(2.41)

Nilai daya ini dalam W/m, sedangkan daya yang diekstraksi oleh device yaitu:

$$P_{e} = P_{wo} \times b = \frac{1}{32\pi} \rho_{sw} g^{2} H^{2} T b$$
(2.42)

*b* merupakan lebar puncak gelombang yang pada *device* dapat disamakan dengan lebar *device* (*device width*).

#### 2.3 Hidrodinamika Bangunan Laut

#### 2.3.1 Teori Gerak Bangunan Laut

Sebuah bangunan laut jika terkena eksitasi gelombang, maka akan mengalami gerakan osilasi dalam 6-derajat kebebasan (*six degrees of freedom*). Gerakan – gerakan yang terjadi adalah berupa tiga gerakan translasi pada arah sumbu x, y dan z (Djatmiko, 2012). Keenam gerakan tersebut dikelompokkan menjadi dua gerakan berdasarkan sumbunya yaitu, gerakan *translational* dan *rotational* yang masing-masing memiliki tiga gerakan seperti pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2. Gerakan Translational dan Rotational pada Bangunan Laut

Sumbu	Translasional	Rotational
Х	Surge	Roll
Y	Sway	Pitch
Z	Heave	Yaw

Berdasarkan Tabel 2.1 dapat dijelaskan bahwa gerakan *translational* merupakan gerakan pada struktur bangunan laut baik secara horisontal maupun vertikal yang pada sumbu *x* dinamakan gerakan *surge*, sumbu *y* dinamakan gerakan *sway* dan sumbu *z* dinamakan gerakan *heave*. Sedangkan gerakan *rotational* yaitu gerakan pada struktur bangunan laut yang berputar pada tiap sumbunya yang pada sumbu *x* dinamakan *roll*, sumbu *y* dinamakan *pitch* dan sumbu *z* dinamakan *yaw*. Adapun ilustrasinya ditunjukkan pada Gambar 2.19.



Gambar 2.19. Gerakan Enam Derajat Kebebasan (Todalshaug, 2017)

Jika pada saat bangunan laut berosilasi dalam 6-derajat kebebasan, maka untuk diasumsikan sementara efek viskositas diabaikan, sehingga fluida dapat diasumsikan irotasional (Djatmiko, 2012).

#### 2.3.2 Konsep Dasar Gerakan Apung

Pada beberapa konverter energi gelombang, pelampung merupakan bagian penting yang menangkap energi gelombang untuk dikonversi menjadi energi gerak. Bentuk pelampung yang umum digunakan pada WEC adalah silinder karena memiliki geometri simetris sehingga dapat menangkap energi dari segala arah (Shi *et al.*, 2016). Ketika menangkap energi gelombang, pelampung silinder berdiameter *D* terapung bebas pada suatu medan propagasi gelombang harmonik atau sinusoidal (Comstock, 1977). Gelombang biasanya diasumsikan mempunyai panjang yang jauh lebih besar dibandingkan lebar pelampung (Djatmiko, 2012). Skema gerakan silinder apung ditunjukkan pada Gambar 2.20.



Gambar 2.20. Skema Silinder Terapung (Jahangir et al., 2018)

Ketika gelombang melewati silinder, fluida di sekitarnya akan memberikan gaya-gaya hidrodinamis terhadapnya. Gaya-gaya ini terdiri dari dua komponen, yaitu komponen eksitasi tak-tunak atau *steady* (gaya osilatori orde-1) yang menyebabkan silinder berosilasi secara linier dan proporsional terhadap tinggi gelombang. Komponen kedua adalah gaya-gaya yang timbul akibat efek non-linier (gaya osilatori orde 2) dengan intensitas yang relatif kecil dan proporsional terhadap nilai kuadrat tinggi gelombang (Djatmiko, 2012). Atlar *et al* (1987) menyebutkan bahwa gaya osilatori orde-1 dapat dibagi menjadi dua komponen, yaitu gaya viskositas dan gaya tekanan. Gaya viskositas ( $F_v$ ) berhubungan dengan kecepatan aliran fluida relatif terhadap silinder terapung yang terbentuk oleh adanya perbedaan gerak silinder dan gelombang. Kecepatan aliran akibat gerakan silinder akan menimbulkan gaya redaman pada silinder. Sedangkan gaya tekanan terdiri dari gaya hidrostatik pengembali dan gaya hidrodinamik. Gaya hidrostatik ( $F_k$ ) pengembali biasanya disebut juga *buoyancy force* atau gaya Archimedes adalah

gaya yang ditimbulkan oleh volume fluida yang terdorong akibat silinder bergerak. Gaya ini memberikan dorongan ke atas sebagai bentuk reaksi air terhadap berat silinder yang terbenam akibat gravitasi dan dicirikan sebagai gaya yang sama dengan volume air yang dipindahkan oleh silinder. Gaya apung akan berubah seiring dengan fluktuasi muka air akibat gerakan silinder terapung. Kondisi ini sesuai dengan perbedaan posisi antara permukaan air dan pusat silinder tetapi tidak terkait dengan kecepatan dan percepatan silinder.

Secara ringkas, gaya yang bekerja pada pelampung merupakan kombinasi dari gaya eksternal dan momen yang setara dengan inersia dari pelampung tersebut. Total gaya yang dihasilkan kemudian dikonversi menjadi torsi input. Gaya-gaya yang bekerja ini disebut gaya hidromekanik yang dirumuskan dengan:

$$m\ddot{z} = F_h \text{ dengan } F_h = -a\ddot{z} - b\dot{z} - cz \qquad (2.43)$$

Sedangkan untuk *decaying motion*, gerakan vertikal silinder ditentukan oleh massa silinder dan gaya hidromekanik pada silinder. Dengan menerapkan Hukum II Newton, maka gaya-gaya yang bekerja adalah:

$$m\ddot{z} = -W + PA_W - b\dot{z} - a\ddot{z}$$
  

$$m\ddot{z} = -(\rho A_W h_0)g + \rho g(h_0 - z)A_W - b\dot{z} - a\ddot{z}$$
  

$$m\ddot{z} = -\rho gA_W z - b\dot{z} - a\ddot{z}$$
  

$$(m+a)\ddot{z} + b\dot{z} + cz = 0$$
(2.44)

dimana,

Ζ.	= Perpindahan vertikal (m)
Р	= Tekanan hidrostatis (N/m <sup>2</sup> )
W	= Gaya berat (N)
$m = \rho A_W h_0$	= Massa silinder (kg)
a	= Koefisien massa tambah / <i>added mass</i> (Ns <sup>2</sup> /m = kg)
b	= Koefisien redaman / <i>damping coefficient</i> (Ns/m = kg/s)
$c = \rho \ g \ A_W$	= Koefisien pengembali / kekakuan / <i>stiffness</i> (N/m = kg/s <sup>2</sup> )
$A_W$	= Water plane area (m <sup>2</sup> )
$h_0$	= Draft silinder saat kondisi diam (m)
Persa	maan (2.44) terlihat sama dengan persamaan pada <i>single linear mas</i>

Persamaan (2.44) terlihat sama dengan persamaan pada *single linear massspring-damper system* yang diilustrasikan pada Gambar 2.21.



Gambar 2.21. Single Linear Mass-Spring-Damper System

Silinder yang berosilasi akan memiliki gerakan harmonik vertikal (*heave*) dan dapat dirumuskan dengan:

$$z = z_a \sin \omega t \tag{2.45}$$

Dimana  $z_a$  merupakan amplitudo gerakan *heave*. Jika persamaan (2.45) diturunkan, maka diperoleh persamaan kecepatan dan percepatan vertikal yaitu:

$$\dot{z} = z_a \omega \cos \omega t \tag{2.46}$$

$$\ddot{z} = -z_a \omega^2 \sin \omega t \tag{2.47}$$

Daya gerakan osilasi dapat dicari dengan perkalian antara gaya dengan kecepatan vertikal ( $\dot{z}$ ) kemudian dibagi dengan periode osilasi (T), sehingga persamaan osilasi orde 1 pada persamaan (2.44) dijabarkan sebagai berikut:

$$\frac{1}{T} \int_{0}^{T} \{(m+a)\ddot{z}\} \cdot \{\dot{z}\,dt\} = \frac{-z_a^2(m+a)\,\omega^3}{T} \int_{0}^{T} \sin\,\omega t \cdot \cos\,\omega t\,dt = 0$$
(2.48)

$$\frac{1}{T}\int_{0}^{T} \{b\,\dot{z}\}\cdot\{\dot{z}\,dt\} = \frac{z_{a}^{2}\,b\,\omega^{2}}{T}\int_{0}^{T} \cos^{2}\,\omega\,t\,dt = \frac{1}{2}b\,\omega^{2}z_{a}^{2}$$
(2.49)

$$\frac{1}{T}\int_{0}^{T} \{cz\} \cdot \{\dot{z}dt\} = \frac{z_a^2 c\omega}{T}\int_{0}^{T} \sin \omega t \cdot \cos \omega t dt = 0$$
(2.50)

dimana,

 $T = 2\pi/\omega$  = Periode osilasi (s)

 $\dot{z} \cdot dt = dz$  = Cakupan jarak saat dt sekon (m)

Berdasarkan persamaan (2.49) jelas bahwa hanya gaya redaman  $(b \dot{z})$  yang menghasilkan daya. Kemudian diketahui bahwa osilasi harmonik vertikal akan menyebabkan radiasi gelombang sebesar:

$$\zeta = \zeta_a \sin(\omega t + \varepsilon) \tag{2.51}$$

 $\zeta_a$  merupakan amplitudo gelombang. Daya akibat gaya redaman memiliki nilai yang sama dengan daya akibat proses disipasi radiasi gelombang. Radiasi ini memiliki dua sisi energi gelombang per unit area  $(0.5\rho g \zeta_a^2)$  pada jarak radiasi  $(c_g T)$  dalam satu periode (T) dan bekerja pada panjang silinder (L) yang secara detail yaitu:

$$P = \frac{1}{T} \cdot 2 \cdot \left(\frac{1}{2}\rho g \zeta_a^2\right) \cdot \left(c_g \cdot T \cdot L\right)$$
$$= \frac{\rho g^2 \zeta_a^2 L}{2\omega}$$
(2.52)

Persamaan (2.51) jika dikombinasikan dengan persamaan (2.49), maka dapat menghasilkan persamaan potensial redaman (*potential damping*) per unit panjang yaitu:

$$\frac{1}{2}b\omega^{2}z_{a}^{2} = \frac{\rho g^{2}\zeta_{a}^{2}L}{2\omega}$$
$$b' = \frac{b}{L} = \frac{\rho g^{2}}{\omega^{3}} \left(\frac{\zeta_{a}}{z_{a}}\right)^{2}$$
(2.53)

#### 2.3.3. Decay Test

Struktur yang berosilasi secara bebas sehingga tidak ada gaya eksternal yang bekerja padanya, maka dapat dianalisa dengan "*decay test*". Uji ini dilakukan dengan memindahkan struktur dari titik setimbangnya kemudian melepasnya. Proses ini akan menghasilkan gerakan osilasi vertikal yang sama dengan *mass-spring-damper system*. Uji ini bertujuan untuk mendapatkan frekuensi natural dari struktur. Selanjutnya, persamaan (2.44) dapat ditulis ulang menjadi:

$$\ddot{z} + 2v\dot{z} + \omega_n^2 z = 0 \tag{2.54}$$

dimana koefisien redaman dan frekuensi natural tak teredam (*undamped natural frequency*) masing-masing dirumuskan dengan:

$$2v = \frac{b}{m+a} \quad \text{dan} \quad \omega_n^2 = \frac{c}{m+a} \tag{2.55}$$

Rasio koefisien redaman ( $\kappa$ ), dituliskan sebagai:

$$\kappa = \frac{v}{\omega_n} = \frac{b}{2\sqrt{(m+a)c}}$$
(2.56)

Rasio ini juga merupakan perbandingan antara koefisien redaman aktual (b) dengan koefisien redaman kritis ( $b_{cr}$ ) yaitu:

$$\kappa = \frac{b}{b_{cr}}, \text{ dimana } b_{cr} = 2\sqrt{(m+a)c}$$
(2.57)

Struktur apung yang terdefleksi akan memiliki amplitudo gerakan *heave* ( $z_a$ ), sehingga untuk *decay test*, persamaan (2.54) menjadi:

$$z = z_a e^{-\kappa \omega_n t} \sin\left(\sqrt{1 - \kappa^2} \omega_n t - \varepsilon_{z\zeta}\right)$$
(2.58)

dimana  $z_a e^{-\kappa \omega_n t}$  merupakan penurunan puncak setelah satu periode osilasi.

Selain itu, perkalian antara frekuensi alami dengan fungsi faktor redaman memberikan besaran baru, yang disebut sebagai frekuensi alami sistem teredam yaitu:

$$\omega_d = \sqrt{1 - \kappa^2} \,\omega_n = \sqrt{\omega_n - \nu} \tag{2.59}$$

Jika nilai koefisien redaman kecil (v < 0.2), maka nilai  $v^2 << \omega_n^2$ , sehingga nilai  $\omega_z \approx \omega_n$ . Frekuensi alami sistem teredam akan menjelaskan pola osilasi dari yang awalnya besar kemudian melemah secara eksponensial bersamaan dengan pergerakan waktu. Penurunan ini memiliki karakteristik persamaan logaritmik (*logarithmic decrement*) yang dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\delta = \kappa \,\omega_n T_z = \kappa \,\omega_n \frac{2\pi}{\omega_z} = \frac{2\pi \,\kappa}{\sqrt{1 - \kappa^2}} \tag{2.60}$$

Jika nilai  $\kappa \ll 1$  (sistem tak teredam), maka nilai  $\delta \approx 2\pi\kappa$ . Oleh karena itu, persamaan rasio redaman menjadi:

$$\kappa = \frac{\delta}{\sqrt{(2\pi)^2 + \delta^2}},$$
 jika redaman kecil, maka  $\kappa \approx \frac{\delta}{2\pi}$  (2.61)

Nilai rasio redaman juga dapat diekspresikan dalam bentuk:

$$\kappa = \frac{1}{2\pi} \ln \left( \frac{z(t)}{z(t+T_z)} \right) = b \frac{\omega_0}{2c}$$
(2.62)

Nilai rasio redaman ini dapat mudah ditemukan pada hasil pengujian *decay test* yang diselesaikan menggunakan *logarithmic decrement* dengan karakteristik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.22.



**Gambar 2.22.** Penentuan *Logarithmic Decrement* (Journée and Adegeest, 2003) Dari *decay test* tersebut akan diperoleh persamaan matematis untuk menghitung nilai massa tambah dan redaman dengan rumus yaitu:

$$a = \frac{c}{\omega_0^2} - m \tag{2.63}$$

$$b = \frac{2\kappa c}{\omega_0} \tag{2.64}$$

Nilai periode natural  $\omega_0$  dapat dihitung dari periode osilasi, *m* merupakan massa pelampung, dan *c* yang merupakan koefisien kekakuan dihitung dari geometri pelampung.

### 2.3.4 Gaya Total Gelombang

Pada sebuah benda yang bergerak vertikal akibat gelombang terdapat gaya yang bekerja pada bagian bawah tercelup benda tersebut. Gaya ini dirumuskan dengan:

$$F = \left(\rho g \zeta_a e^{-kh_0} \cos(\omega t + \rho g h_0)\right) A_w$$
(2.65)

Bagian harmonik dari gaya ini adalah gaya harmonik gelombang regular. Lebih atau kurang dengan beban hidromekanik (pada *oscillating body* di muka air diam), gaya ini dapat juga diekspresikan sebagai koefisien kekakuan (*c*) dikalikan elevasi gelombang efektif ( $\zeta^*$ ) yaitu:

$$F_{FK} = c \cdot \zeta^* \tag{2.66}$$

$$\zeta^* = e^{-kh_0} \zeta_a \cos(\omega t) \tag{2.67}$$

Gaya ini disebut gaya Froude-Krilov yang mengikuti integrasi yang mengikuti tekanan dari sebuah benda pada gelombang tenang. Namun, bagaimanapun suatu gelombang akan terdifraksi sehingga gaya Froude-Krilov ini perlu dikoreksi dengan

melibatkan komponen gaya yang proporsional terhadap percepatan vertikal dan gaya yang proporsional terhadap kecepatan vertikal. Gaya merupakan gaya beban gelombang yang secara lengkap dituliskan yaitu:

$$F_{wl} = a\ddot{\zeta}^* + b\dot{\zeta}^* + c\zeta^* \tag{2.68}$$

Nilai elevasi muka air efektif pada setiap komponen gaya dapat dituliskan:

$$\zeta^* = \zeta_a e^{-kh_0} \cos(\omega t) \tag{2.69}$$

$$\dot{\zeta}^* = -\zeta_a e^{-kh_0} \omega \cos(\omega t) \tag{2.70}$$

$$\ddot{\zeta}^* = -\zeta_a e^{-kh_0} \omega^2 \cos(\omega t) \tag{2.71}$$

Dengan substitusi persamaan (2.69), (2.70), dan (2.71) ke persamaan (2.68), maka menghasilkan:

$$F_{wl} = \zeta_a e^{-kh_0} (c - a\omega^2) \cos(\omega t) - \zeta_a e^{-kh_0} (b\omega) \sin(\omega t)$$
(2.72)

Persamaan gaya beban gelombang dapat juga dituliskan yaitu:

$$F_{wl} = F_a \cos(\omega t + \varepsilon_{F\zeta})$$
  
=  $F_a \cos(\varepsilon_{F\zeta}) \cos(\omega t) - \sin(\varepsilon_{F\zeta}) \sin(\omega t)$  (2.73)

Mengacu pada persamaan (2.72), maka:

$$F_a \cos(\varepsilon_{F\zeta}) = \zeta_a e^{-kh_0} (c - a\omega^2)$$
(2.74)

$$F_a \sin(\varepsilon_{F\zeta}) = \zeta_a e^{-kh_0} (b\omega) \tag{2.75}$$

Dari persamaan yang telah dijabarkan, dengan menambah akar kuadrat maka dapat dicari amplitudo gaya gelombang yaitu:

$$\frac{F_a}{\zeta_a} = e^{-kh_0} \sqrt{(c - a\omega^2)^2 + (b\omega)^2}$$
(2.76)

$$\varepsilon_{F\zeta} = \arctan\left(\frac{b\omega}{c-a\omega^2}\right) \text{ dengan: } 0 \le \varepsilon_{F\zeta} \le 2\pi$$
 (2.77)

Gaya total gelombang merupakan penjumlahan antara gaya hidromekanik ( $F_h$ ) dan gaya beban gelombang ( $F_{wl}$ ). Dengan menggunakan Hukum II Newton, maka gaya total gelombang dapat dituliskan yaitu:

$$m\ddot{z} = F_h + F_{wl} = F_W \tag{2.78}$$

Dengan substitusi persamaan (2.44) dan (2.67) maka dihasilkan persamaan:

$$F_{W} = a(\ddot{\zeta}^{*} - \ddot{z}) + b(\dot{\zeta}^{*} - \dot{z}) + c(\zeta^{*} - z)$$
(2.79)

# 2.3.5 Respon Gerak pada Gelombang Reguler

Pada sebuah benda yang terkena gelombang eksitasi maka akan bergerak vertikal sesuai derajat kebebasan *heave*. Jika gerakan ini difungsikan dengan fungsi cosinus maka menghasilkan:

$$z = z_a \cos(\omega t + \varepsilon_{z\zeta}) \tag{2.80}$$

$$\dot{z} = -z_a \omega \sin(\omega t + \varepsilon_{z\zeta}) \tag{2.81}$$

$$\ddot{z} = -z_a \omega^2 \cos(\omega t + \varepsilon_{z\zeta}) \tag{2.82}$$

Substitusi persamaan (2.69), (2.70), (2.71), (2.80), (2.81), (2.82) ke persamaan (2.79) maka diperoleh:

$$z_{a}(c - (m + a)\omega^{2})\cos(\omega t + \varepsilon_{z\zeta}) - z_{a}(b\omega)\sin(\omega t + \varepsilon_{z\zeta})$$
  
=  $\zeta_{a}e^{-kh_{0}}(c - a\omega^{2})\cos(\omega t) - \zeta_{a}e^{-kh_{0}}(b\omega)\sin(\omega t)$  (2.83)

Dengan memisah ( $\omega t + \varepsilon_{z\zeta}$ ) menggunakan hukum trigonometri maka diperoleh:

$$z_{a}\left(\left(c-(m+a)\omega^{2}\right)\cos\left(\varepsilon_{z\zeta}\right)-(b\omega)\sin\left(\varepsilon_{z\zeta}\right)\right)\cos\left(\omega t\right)$$
$$-z_{a}\left(\left(c-(m+a)\omega^{2}\right)\sin\left(\varepsilon_{z\zeta}\right)+(b\omega)\cos\left(\varepsilon_{z\zeta}\right)\right)\sin\left(\omega t\right)=$$
$$\zeta_{a}e^{-kh_{0}}\left(c-a\omega^{2}\right)\cos\left(\omega t\right)-\zeta_{a}e^{-kh_{0}}(b\omega)\sin\left(\omega t\right)$$
$$(2.84)$$

Dengan mengelompokkan sesuai fungsi yang sama maka diperoleh:

$$z_{a}(c - (m + a)\omega^{2})\cos(\varepsilon_{z\zeta}) - (b\omega)\sin(\varepsilon_{z\zeta}) = \zeta_{a}e^{-kh_{0}}(c - a\omega^{2})$$

$$z_{a}(c - (m + a)\omega^{2})\sin(\varepsilon_{z\zeta}) + (b\omega)\cos(\varepsilon_{z\zeta}) = \zeta_{a}e^{-kh_{0}}(b\omega)$$
(2.85)

Kemudian dengan menambahkan akar kuadrat maka diperoleh:

$$\frac{z_a}{\zeta_a} = e^{-kh_0} \sqrt{\frac{(c - a\omega^2)^2 + (b\omega)^2}{(c - (m + a)\omega^2)^2 + (b\omega)^2}}$$
(2.86)

Dan eliminasi  $z_a/\zeta_a e^{-kh_0}$  di persamaan (2.85) maka diperoleh sudut fasa:

$$\varepsilon_{z\zeta} = \arctan\left(\frac{-mb\omega^3}{(c-a\omega^2)(c-(m+a)\omega^2) + (b\omega)^2}\right) \text{ dengan: } 0 \le \varepsilon_{F\zeta} \le 2\pi \qquad (2.87)$$

Sudut fase harus ditentukan dalam kuadran yang benar antara 0 dan  $2\pi$ . Hal ini bergantung pada tanda pembilang dan penyebut dalam fungsi tangen. Persyaratan linearitas terpenuhi jika amplitudo *heave* ( $z_a$ ) sebanding dengan amplitudo gelombang ( $\zeta_a$ ) dan pergeseran fasa ( $\varepsilon_{F\zeta}$ ) tidak tergantung pada amplitudo gelombang. Karakteristik  $z_a/\zeta_a$  ini juga disebut dengan *Response Amplitude Operator* (RAO) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.23.



Gambar 2.23. Contoh Karakteristik RAO dan Sudut Fase dari sebuah Silinder

#### Vertikal

Gambar 2.23 menunjukkan karakteristik RAO pada rentang frekuensi dengan pengaruh difraksi gelombang. Anotasi "tanpa difraksi" pada Gambar 2.23 diartikan bahwa beban gelombang hanya terdiri dari gaya Froude-Krilov ( $c\zeta^*$ ). Persamaan (2.86) menunjukkan bahwa sehubungan dengan perilaku gerak benda, maka dapat dibedakan pada klasifikasi frekuensinya sebagai berikut:

- ω<sup>2</sup> << c/(m+a), range ini memiliki gerakan vertikal yang didominasi oleh koefisien kekakuan. Karakteristiknya adalah akan dihasilkan gerakan benda yang cenderung mengikuti gelombang, nilai RAO cenderung mendekati 1 dan perbedaan fase cenderung nol.</li>
- ω<sup>2</sup> ≈ c/(m+a), range ini memiliki gerakan vertikal yang didominasi oleh koefisien redaman. Karakteristik ini menghasilkan resonansi tinggi yang dapat diperkirakan pada kasus redaman kecil. Pergeseran fasa –π terjadi di sekitar frekuensi natural (lihat penyebut pada persamaan 2.87). Pergeseran fasa di area ini sangat curam karena koefisien redaman yang kecil.
- ω<sup>2</sup> >> c/(m+a), range ini memiliki gerakan vertikal yang didominasi oleh koefisien massa tambah. Karakteristiknya adalah akan dihasilkan gelombang yang kehilangan pengaruhnya terhadap perilaku benda. Selain itu, akan muncul beberapa puncak dan lembah gelombang di sepanjang lebar benda. Pergeseran fase kedua muncul pada frekuensi yang lebih tinggi, ω<sup>2</sup> ≈ c/a. Hal ini disebabkan oleh pergeseran fasa pada beban gelombang.

### 2.4 Power Take-Off System – Direct Mechanical Drive System

Sistem penggerak mekanis langsung PTO terdiri atas pengubahan energi mekanis dari benda berosilasi yang terkena gelombang menjadi energi listrik melalui sistem mekanis tambahan yang menggerakkan generator listrik berputar. Jenis sistem PTO ini diilustrasikan pada Gambar 2.24. Sebagai contoh, sistem konversi mekanis dapat terdiri dari *gearbox*, katrol dan kabel. Roda gila dapat diintegrasikan dalam sistem ini sehingga dapat mengakumulasi atau melepaskan energi sehingga dapat menghaluskan variasi daya (Yoshida *et al*, 2010). Satu keuntungan dari jenis sistem PTO ini adalah bahwa hanya diperlukan tiga konversi energi dan dapat menghasilkan efisiensi tinggi (Têtu, 2017). Penelitian dari Sanada *et al* (2012) menunjukkan bahwa sistem PTO ini mampu menghasilkan efisiensi maksimum sekitar 30%, sehingga menegaskan keunggulan mekanisme ini dibandingkan pendekatan sistem PTO lain seperti OWC standar. Di sisi lain, sistem penggerak mekanis langsung mengalami siklus beban yang tak terhitung, dan keandalan sistem jenis ini masih perlu dibuktikan (Têtu, 2017).



Gambar 2.24. Sistem Power Take-Off Direct Mechanical Drive System (Têtu,

2017)

### 2.5 Konsep Mekanika pada Konverter Energi Gelombang

#### 2.5.1 Roda Gigi (Gear)

Roda gigi secara umum merupakan suatu mekanisme yang dipergunakan untuk memindahkan elemen mesin yang satu kegerakan elemen mesin yang lain. Selain itu roda gigi juga berfungsi mengubah jumlah putaran dan momen putar mesin, daya mesin serta mengatur keduanya untuk kebutuhan kerja mesin (Susanto, 2015). Roda gigi mampu mentransmisikan daya yang cukup besar dengan putaran yang tepat, yang tidak dapat dilakukan oleh roda biasa (roda gesek). Oleh karena itu, roda tersebut harus memiliki gigi di sekelilingnya, sehingga dapat dilakukan penerusan daya oleh gigi-gigi kedua roda yang saling berkaitan. Selain pemakaian roda gigi pada transmisi, terdapat cara lain untuk meneruskan daya, yaitu menggunakan sabuk atau rantai. Untuk sabuk yang digunakan antara lain sabuk rata, sabuk v, sabuk gigi/serempak. Sedangkan untuk rantai antara lain rantai nol dan rantai gigi). Ketika mesin mulai berjalan diperlukan tenaga yang besar, setelah kendaraan berjalan yang dibutuhkan adalah kecepatan. Untuk memenuhi kecepatan tersebut maka diperlukan perbandingan roda gigi yang lebih besar.

#### 2.5.2 Rasio Gear

Untuk memenuhi peningkatan kecepatan tertentu, maka diperlukan transmisi berupa tingkat perbandingan gigi (*gear ratio*) yang dirakit dalam kotak transmisi (*gearbox*). *Gear ratio* merupakan hasil bagi antara jari-jari output dengan jari input (Close, 2002), sehingga untuk mendapatkan *gear ratio* dapat digunakan persamaan sebagai berikut:



Gambar 2.25. Gear Ratio

$$\frac{\theta_1}{\theta_2} = \frac{R_2}{R_1} = \frac{n_1}{n_2} = N$$
(2.88)

Keterangan:

$\theta_1$	= Sudut <i>gear</i> input (°)	$\theta_2$	= Sudut <i>gear</i> output (°)
$R_1$	= Jari-jari gear input (m)	$R_2$	= Jari-jari gear output (m)
$n_1$	= Kecepatan <i>gear</i> input (rpm)	$n_2$	= Kecepatan <i>gear</i> output (rpm)

N =Rasio gear

# 2.5.3 Momen Torsi

Momen adalah suatu vektor M yang tegak lurus terhadap bidang benda. Arah M adalah tergantung pada arah berputarnya benda akibat gaya F. Momen dapat dihitung dengan rumus berikut:

$$M = F \times l \tag{2.89}$$

dimana M adalah momen, F adalah gaya yang bekerja, dan l adalah lengan gaya. Arah momen dapat ditentukan dengan menggunakan konversi tanda misalnya tanda positif (+) untuk momen yang berlawanan arah jarum jam, dan tanda negatif (-) untuk momen yang searah jarum jam. Penentuan tanda dari momen ini harus konsisten untuk semua persoalan (Susanto, 2015).

#### 2.5.4 Momen Inersia

Momen inersia atau massa angular rotasional merupakan besaran yang menentukan torsi untuk memberikan percepatan angular pada benda. Momen inersia umumnya berupa hasil kali massa sebuah partikel (m) dengan kuadrat jarak partikel dari titik rotasinya (r). Jarak setiap partikel yang menyusun benda tegar berbeda – beda jika diukur dari sumbu rotasi. Momen inersia sebuah benda dapat ditentukan oleh massa benda, geometri (bentuk) benda, letak sumbu putar, serta panjang lengan momen (jarak ke sumbu putar benda). Beberapa persaman momen inersia pada benda tegar ditunjukkan pada Tabel 2.3 (Ibrahim, 2014).

No	Bentuk Benda	Persamaan
1.	$\frac{z}{h}$	$dm = \rho dV = \rho(2\pi r dr h)$ $I = \int_{m} r^{2} dm = \rho(2\pi h) \int_{0}^{R} r^{3}$ $I = \frac{\rho \pi}{2} R^{4} h = \frac{1}{2} R^{2} (\rho \pi R^{2} h)$ $m = \rho \pi R^{2} h$ $I_{z} = \frac{1}{2} m R^{2}$
2.	$\frac{y}{b}$	$I_{x} = \frac{1}{12}m(b^{2} + c^{2})$ $I_{y} = \frac{1}{12}m(c^{2} + a^{2})$ $I_{z} = \frac{1}{12}m(a^{2} + b^{2})$
3.	$\int_{z} \frac{y}{L} \frac{1}{z} \frac{y}{z}$ Batang pada sumbu y atau z	$I_y = I_z = \frac{1}{12}mL^2$

**Tabel 2.3.** Persamaan Inersia pada Berbagai Bentuk Benda (Ibrahim, 2014)

No	Bentuk Benda	Persamaan
4.	z y x	$I_x = \frac{1}{2}mr^2$ $I_y = I_z = \frac{1}{4}mr^2$
	Silinder pejal pada sumbu <i>x</i> , <i>y</i> , dan <i>z</i>	
5.	Silinder pejal dengan panjang $L$ pada sumbu $x$ , $y$ , dan $z$	$I_x = \frac{1}{2}ma^2$ $I_y = I_z = \frac{1}{12}m(3a^2 + L^2)$
6.	y z z z z x x x x x x x x	$I_{x} = \frac{3}{10}mr^{2}$ $I_{y} = I_{z} = \frac{3}{5}m\left(\frac{1}{4}r^{2} + h^{2}\right)$
7.	Bola pejal pada sumbu $x$ , $y$ , dan $z$	$I_x = I_y = I_z = \frac{2}{5}ma^2$
8.	$\begin{array}{c c} y & y' \\ \hline h & \hline C & x' \\ \hline \hline b & \hline x \\ \hline \end{array}$ Persegi panjang pada sumbu x dan y	$\overline{I_{x'}} = \frac{1}{12}bh^3, \ \overline{I_{y'}} = \frac{1}{12}b^3h$ $I_x = \frac{1}{3}bh^3, \ I_y = \frac{1}{3}b^3h$ $J_C = \frac{1}{12}bh(b^2 + h^2)$

# 2.5.5 Konstanta Kekakuan Torsi Poros

Konstanta kekakuan torsi poros merupakan perkalian modulus elastisitas bahan dengan diameter poros dan panjang poros (Rao, 2011) maka untuk mencari kekakuan torsi poros digunakan persamaan sebagai berikut:

$$k_t = \frac{G}{l} \left( \frac{\pi d_p^4}{32} \right) \tag{2.90}$$

Keterangan:

$k_t$	= Konstanta kekakuan torsi poros (Nm/rad)
G	= Modolus elastistas bahan (N/m <sup>2</sup> ), jika menggunakan gray cast iron
	maka besar $G = 6.6 \text{ x } 10^{10} \text{ N/m}^2$ , dan baja $G = 8 \text{ x } 10^{10} \text{ N/m}^2$
l	= Panjang poros (m)
$d_{ m p}$	= Diameter poros (m)

# 2.5.6 Sistem Torsi

Dimisalkan sistem torsi terdiri atas dua piringan atau *gear* yang dipasang pada sebuah *shaft* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.26. Tiga segmen *shaft* memiliki konstanta kekakuan  $k_{t1}$ ,  $k_{t2}$ , dan  $k_{t3}$  dan piringan memiliki momen inersia  $J_1$  dan  $J_2$ , torsi  $M_{t1}$  dan  $M_{t2}$ , dan sudut putar bebas  $\theta_1$  dan  $\theta_2$ . Penurunan persamaannya adalah sebagai berikut (Rao, 2011):

$$J_{1}\ddot{\theta}_{1} = -k_{t1}\theta_{1} + k_{t2}(\theta_{1} - \theta_{2}) + M_{t1}$$

$$J_{2}\ddot{\theta}_{2} = -k_{t2}(\theta_{2} - \theta_{1}) - k_{t3}\theta_{2} + M_{t2}$$
(2.91)

Untuk analisa getaran bebas, maka  $\sum M_t = 0$ , sehingga

$$J_{1}\ddot{\theta}_{1} + (k_{t1} + k_{t2})\theta_{1} - k_{t2}\theta_{2} = 0$$

$$J_{2}\ddot{\theta}_{2} + (k_{t2} + k_{t3})\theta_{2} - k_{t2}\theta_{1} = 0$$
(2.92)



Gambar 2.26. Sistem Torsi Piringan yang Tersusun pada Shaft (Rao, 2011)

# 2.5.7. Flywheel

Sebuah *flywheel* berfungsi untuk menyimpan energi namun juga dapat menghaluskan daya output yang dihasilkan (Larsson, 2012). Agar mampu melakukan hal tersebut, *flywheel* harus memiliki inersia rotasi tertentu (*J*) yang secara spesifik dipilih untuk aplikasinya. Karena *J* bergantung pada ukuran, bentuk, dan massa dari benda yang berotasi, maka nilai *J* yang sama dapat dikonfigurasikan sesuai tiga parameter tersebut. Sejak bentuk silinder pejal digunakan untuk sebuah *flywheel* maka diperoleh persamaan energi yang dapat disimpan oleh *flywheel* yaitu:

$$E = \frac{1}{2}J\,\omega^2\tag{2.93}$$

$$J = \frac{1}{2}mR^2 \tag{2.94}$$

Energi yang tersimpan pada *flywheel* juga menunjukkan bahwa jumlah energi ini berbanding lurus dengan kuadrat kecepatan sudut dan momen inersia dari silinder pejal. Namun torsi yang diaplikasikan dari atau ke *flywheel* secara linier bergantung pada perubahan kecepatan sudut terhadap waktu sebagaimana dirumuskan yaitu:

$$\tau_{fly} = J \frac{\partial \omega}{\partial t} \tag{2.95}$$

Torsi yang diekstrak dari sebuah *flywheel* dengan mereduksi kecepatan sudutnya akan menghasilkan percepatan sudut bernilai negatif. Sebaliknya jika torsi diaplikasikan ke *flywheel* maka kecepatan sudut akan naik oleh percepatan sudut yang bernilai positif. Nilai percepatan sudut ini yang dirumuskan dengan:

$$\alpha = \frac{\partial \omega}{\partial t} = \frac{\ddot{z}(t)}{R}$$
(2.96)

Nilai percepatan sudut ini juga setara dengan percepatan tangensial dibagi dengan jari-jari. Karena energi yang tersimpan bergantung pada kuadrat kecepatan sudut, maka inersia putaran pada sisi yang output setara dengan  $G^2J$  dimana G merupakan rasio *gearbox* dan energi yang disimpan diasumsikan sama jika ditempatkan baik setelah maupun sebelum *gearbox* (Larsson, 2012). Kemudian dari persamaan-persamaan sebelumnya dapat diperoleh daya konversi *flywheel* yaitu:

$$P_{fly} = \tau_{fly} \,\alpha \tag{2.97}$$

# 2.5.8. Analisa Gaya Mekanik Tuas – Pelampung

Gaya-gaya yang bekerja pada mekanisme pembangkit masing-masing berada pada keseimbangan statis dan keseimbangan dinamis (Susanto, 2015). Analisa setiap kesetimbangan tersebut dijelaskan sebagai berikut:

#### a. Kesetimbangan Statis

Kesetimbangan statis terjadi diakibatkan oleh mekanisme itu sendiri tanpa dipengaruhi oleh gaya luar. Kesetimbangan statis ini hanya diakibatkan oleh berat pelampung, berat tuas, dan gaya apung (*buoyancy*) yang terjadi pada pelampung. Ilustrasi kesetimbangan statis ditunjukkan pada Gambar 2.27.



**Gambar 2.27.** Mekanisme Kesetimbangan Statis Pada Sebuah Poros dimana:

$m_P$ = Massa Pelampung (kg), $m_D$ = Massa D	ias (kg)
	isc (kg)
$F_B$ = Gaya <i>Bouyancy</i> (N), $W_T$ = Berat Tu	as (N)
$W_P$ = Berat Pelampung (N), $W_D$ = Berat <i>Dis</i>	sc (N)
$M_t$ = Momen Torsi (Nm)	

Pada kondisi statis pelampung dan *disc* dianggap sebagai benda yang menjadi satu dengan *cantilever*, sehingga diperoleh persamaan yaitu:

$$J_{P} = m_{P} L^{2} - \dots - J_{T} = \frac{1}{3} m_{T} L^{2} - \dots - J_{D} = \frac{1}{2} m_{D} L^{2}$$

$$J_{0} = J_{P} + J_{T} + J_{D}$$

$$J_{0} = m_{P} L^{2} + \frac{1}{3} m_{T} L^{2} + \frac{1}{2} m_{D} L^{2}$$
(2.98)
J merupakan simbol untuk momen inersia.

Pada hukum Newton I mengatakan bahwa:

$$\sum M = 0$$

$$F_{B}L_{T}\sin\theta - W_{P}L_{T}\sin\theta - W_{T}\left(\frac{1}{2} \times L_{T}\sin\theta\right) - W_{D}\left(0 \times L_{T}\right) = 0$$

$$F_{B}L_{T}\sin\theta = W_{P}L_{T}\sin\theta + \frac{1}{2}W_{T}L_{T}\sin\theta \qquad (2.99)$$

Pada keseimbangan statis didapatkan rumusan hubungan antara gaya *buoyancy* dan massa pelampung sebagai berikut:

$$F_B = W_P + \frac{1}{2}W_T = \left(m_P + \frac{1}{2}m_T\right)g$$
(2.100)

## b. Kesetimbangan Dinamis

Kesetimbangan dinamis terjadi saat ada gelombang yang datang mengenai pelampung sehingga jumlah gaya atau gaya berat yang bekerja pada sistem sama dengan nol. Kesetimbangan dinamis bisa terjadi karena adanya pengaruh gaya-gaya luar yang bekerja pada arah vertikal dan arah horizontal yang disebabkan oleh gelombang laut (Susanto, 2015). Pada saat terjadi gaya luar (gelombang laut), maka sudut  $\theta$  akan bergeser sejauh  $\alpha$ . Gaya gelombang (*F*<sub>W</sub>) yang bekerja ini merupakan gaya gelombang total yang sesuai dengan sistem orde 1 seperti yang dijelaskan pada Sub Bab 2.3.4. Ilustrasi kesetimbangan statis ditunjukkan pada Gambar 2.28.



Gambar 2.28. Mekanisme Kesetimbangan Dinamis Pada Sebuah Poros Pada hukum Newton II mengatakan bahwa:

$$\sum M = J_{tot}\ddot{\theta} \tag{2.101}$$

 $J_{tot}$  merupakan inersia total sistem dan  $\ddot{\theta}$  adalah percepatan sudut sistem.

Jika kondisi *gear* pada sistem transmisi tersusun seperti pada Gambar 2.26, dimana *gear* 1 dan 2 tersusun dalam satu poros, maka ketika pelampung bergerak akan memberikan perubahan sudut yang sama ( $\theta_{g1} = \theta_{g2} = \alpha$ ), sehingga persamaan (2.91) akan berubah menjadi:

$$J_1 \theta + k_{i1} \alpha = 0$$

$$J_2 \ddot{\theta} + k_{i3} \alpha = 0$$
(2.102)

Karena menghasilkan persamaan percepatan sudut yang sama, maka dapat digunakan salah satu tinjauan saja, sehingga jika ditambah sistem tuas dan pelampung yang dinamis, maka persamaan totalnya menjadi:

$$F_W L_T \sin \gamma - W_P L_T \sin \gamma - \frac{1}{2} W_T L_T \sin \gamma - k_{t1} \alpha = (J_0 + J_1) \ddot{\theta}$$
(2.103)

$$\ddot{\theta} = \frac{1}{\left(J_0 + J_1\right)} \left( F_W L_T \sin \gamma - W_P L_T \sin \gamma - \frac{1}{2} W_T L_T \sin \gamma - k_{t1} \alpha \right)$$
(2.104)

 $\alpha$  adalah perubahan sudut dan  $J_0$  adalah momen inersia kondisi awal.

#### 2.6 Pemodelan Fisik

Pemodelan fisik dapat dikatakan sebagai percobaan yang dilakukan dengan membuat bentuk model yang sama dengan prototipenya atau menggunakan model yang lebih kecil dengan kesebangunan atau similarits yang cukup memadai. Pemodelan fisik dilakukan apabila fenomena dari permasalahan yang ada pada prototipe sulit untuk diperoleh karena berbagai keterbatasan. Studi lapangan dapat menyediakan data yang akurat, tetapi biasanya membutuhkan biaya yang tinggi dan memuat variable alam yang dapat menyebabkan kesulitan dalam interpretasi data. Efek-efek fisik antar elemen fluida merupakan hal yang sangat berpengaruh untuk suatu penelitian mengenai karakter fluida. Dengan model fisik, hal tersebut dapat divisualisasikan dan dapat dijamain keakuratannya. Hasil visualisasi tersebut mungkin merupakan hal yang tidak bisa dihasilkan secara analitis atau dengan menggunakan perhitungan komputer (Hughes, 1993).

Dean dan Dalrymple (1991), menyatakan beberapa keuntungan dari pemodelan fisik, yaitu:

- Persamaan yang dipakai dapat digunakan untuk model analitis atau model numerik.
- b. Mempermudah dalam pencatatan data dan penghematan biaya.
- c. Adanya kebebasan dalam melakukan percobaan yang memungkinkan dibuat simulasi keadaan yang ada di alam yang sangat bervariasi.
- Merupakan alternatif metode terbaik untuk meneliti dan memverifikasi penyelesaian dalam bidang rekayasa teknik pantai.
   Sedangkan kekurangan dari pemodelan fisik yaitu (Hughes, 1993):
- a. Adanya efek skala; hal ini terjadi karena model dibuat lebih kecil dari prototipenya. Semua variable yang relevan tidak mungkin dimodelkan dalam hubungan yang benar satu sama lain, dengan kata lain efek skala menyederhanakan masalah melalui asumsi pada pemodelan numerik.
- b. Efek Laboratorium; hal ini dapat mempengaruhi proses simulasi secara keseluruhan bila tidak dilakukan pendekatan yang sesuai dengan prototipenya. Efek laboratorium biasanya muncul karena ketidakmampuan untuk menghasilkan kondisi pembebanan yang realistik karena adanya keterbatasan yang dimiliki model terhadap proses yang disimulasikan.
- c. Fungsi gaya dan kondisi batas yang bekerja di alam tidak disertakan dalam pemodelan, sebagai contoh adalah gaya geser angin pada permukaan.

Syarat-syarat dalam pemodelan fisik harus memenuhi setidaknya kesebangunan geometri, kesebangunan kinematik, dan kesebangunan dinamik.

## 2.6.1 Kesebangunan Geometri (Geometry Similarity)

Kesebangunan geometrik dipenuhi apabila bentuk model dan prototipe sebangun dalam artian perbandingan semua ukuran panjang antara model dan prototipe harus sebanding (Hughes, 1993). Skala model dinotasikan dengan N<sub>L</sub> yang memiliki persamaan sebagai berikut:

$$nL = \frac{L_P}{L_M} \tag{2.105}$$

dengan:

nL merupakan skala panjang,  $L_P$  merupakan panjang prototipe (m), dan  $L_M$  merupakan panjang model (m).

Menurut Winarto (2017), kesebangunan geometrik terbagi dua yaitu:

- a. Sebangun geometrik sempurna tanpa distorsi (*Undistorted*) yaitu skala panjang arah horizontal (skala panjang) sama dengan skala panjang arah vertikal (skala tinggi).
- b. Sebangun geometrik dengan distorsi (*Distorted*) yaitu skala panjang arah horizontal dan skala panjang arah vertikal tidak sama.

Sedangkan untuk skala berat (nW) juga dihitung dengan merasiokan prototipe terhadap model dinyatakan dalam persamaan yaitu:

$$nW = \frac{(\gamma_k)_P}{(\gamma_k)_M} \times (nL)^3$$
(2.106)

dengan:

nW merupakan skala berat,  $(\gamma_k)_P$  merupakan rapat massa prototipe (kg/m<sup>3</sup>),  $(\gamma_k)_M$  merupakan rapat massa model (kg/m<sup>3</sup>), dan nL merupakan skala panjang.

## 2.6.2 Kesebangunan Kinematik (*Kinematic Similarity*)

Sebangun kinematik dipenuhi apabila aliran pada model dan prototipe sebangun. Hal ini berarti bahwa kecepatan aliran di titik-titik yang sama pada model dan prototipe mempunyai arah yang sama dan sebanding. Berdasarkan kesebangunan kinematik dapat diberikan nilai-nilai skala:

• Skala Waktu

$$nT = \frac{T_P}{T_M} \tag{2.107}$$

• Skala Kecepatan

$$nU = \frac{U_P}{U_M} = \frac{\frac{L_P}{T_P}}{\frac{L_M}{T_M}} = \frac{nL}{nT}$$
(2.108)

Skala Percepatan

$$na = \frac{a_P}{a_M} = \frac{\frac{L_P}{T_P^2}}{\frac{L_M}{T_M^2}} = \frac{nL}{nT}$$
(2.109)

### 2.6.3 Kesebangunan Dinamik (Dynamic Similarity)

Kesebangunan dinamik dipenuhi jika model dan prototipe sebangun geometrik dan sebangun kinematik juga perbandingan gaya-gaya yang bersangkutan pada model dan prototipe adalah sama. Adapun gaya-gaya tersebut antara lain:

• Gaya Inersia :  $F_i = \rho L^2 v^2$ 

• Gaya Berat 
$$: F_g = \rho L^3 g$$

• Gaya Gesek 
$$: F_{\mu} = \mu v L$$

• Gaya Tegangan Permukaan :  $F_{\sigma} = \sigma L$ 

Untuk menghindari efek skala, maka perlu dipertimbangkan gaya yang dominan bekerja. Menurut Hughes (1993) pada bangunan pantai proses fisik yang terjadi dominan dipengaruhi oleh gaya gravitasi sehingga kriteria kesebangunan yang harus dipenuhi adalah kriteria sebangun dinamik menurut kondisi bilangan Froude. Bilangan Froude dapat diekspresikan dengan ratio antara gaya inersia dengan gaya gravitasi sebagai berikut:

$$Fr = \frac{\left(\rho L^3\right)\left(\frac{U^2}{L}\right)}{\rho g L^3} = \frac{U^2}{L}$$
(2.110)

Dengan:

Fr = Bilangan Froude

U = Kecepatan aliran (m/s)

g = Percepatan gravitasi (m/s<sup>2</sup>)

L = Panjang spesifik (m)

Rasio gaya gravitasi dan gaya inersia pada model dan prototipe harus sama yang dinotasikan sebagai berikut:

$$nFr = \frac{nU}{(nL)^{0.5}} = 1$$
(2.111)

#### 2.6.4 Faktor Skala Froude

Pada Tabel 2.4 menunjukkan penurunan fakto skala Froude untuk beberapa variabel umum yang digunakan dalam model teknik hidrolika dan pantai (Goda, 1985; Chakrabarti, 1994). Faktor ini melibatkan satuan, tipe kesebangunan, dan skala relatif Froude terhadap skala model ( $\lambda$ ). Perlu dicatat bahwa  $\lambda$  biasanya dipilih berdasarkan kesebangunan geometri ( $N_L$ ) untuk karakteristik panjang. Selain itu juga diasumsikan bahwa gravitasi dan massa jenis yang digunakan sama.

Variable	Units	Similitude	Froude Scale
Length	L	G	λ
Area	L <sup>2</sup>	G	$\lambda^2$
Volume	L <sup>3</sup>	G	λ <sup>3</sup>
Angle	deg	G	1
Time	Т	К	$\lambda^{0.5}$
Frequency	$T^{1}$	К	λ-0.5
Velocity	$LT^{1}$	К	$\lambda^{0.5}$
Acceleration	$LT^2$	К	λ
Discharge, Flow rate	$L^{3}T^{1}$	К	$\lambda^{2.5}$
Kinematic viscosity	$L^2T^1$	К	$\lambda^{1.5}$
Mass	Μ	D	$\lambda^{3}$
Fluid density	ML <sup>-3</sup>	D	1
Dynamic viscosity	$ML^{-1}T^{1}$	D	$\lambda^{1.5}$
Pressure, Stress	$ML^{-1}T^2$	D	λ
Force, Shear, Weight <sup>3</sup>	MLT <sup>2</sup>	D	λ <sup>3</sup>
Moment , Energy, Work, Torque	$ML^2T^2$	D	$\lambda^4$
Momentum, Impulse	MLT <sup>1</sup>	D	$\lambda^{3.5}$
Power	$ML^2T^3$	D	$\lambda^{3.5}$

Tabel 2.4. Faktor Skala Froude untuk Beberapa Variabel Umum

Notes:

M=Mass, L=Length, T=Time.

G=Geometric, K=Kinematic, and D=Dynamic similitude.

With same specific weight of material, otherwise density  $N_{\rho}$  scaling necessary.

## 2.7 Komponen Elektronika

#### 2.7.1 Arduino Uno

Arduino UNO merupakan sebuah *board* yang berbasis mikrokontroler pada ATmega328. *Board* ini memiliki 14 digital *input/output* pin (dimana 6 pin dapat digunakan sebagai *output* PWM), 6 *input analog*, 16 MHz *osilator* kristal, koneksi USB, *jack* listrik, dan tombol *reset* (Saputri, 2014). Arduino diaktifkan dengan cara menghubungkannya ke komputer melalui kabel USB kemudian diinputkan program dari *software* Arduino. Sumber tegangan Arduino Uno berupa tegangan DC yang dapat diperoleh dari sumber seperti komputer, laptop, baterai dan *power bank*. Elemen utama dari mikrokontroler Arduino UNO yaitu *Input/Output* atau I/O melalui pin-pin, *port* USB, dan mikrokontroler yang di dalamnya terdapat sejumlah kecil RAM. ATmega328 pada Arduino UNO hadir dengan sebuah *bootloader* yang memungkinkan untuk meng*-upload* kode baru ke ATmega328 (Ichwan *et al.*, 2013). Arduino memiliki *software* dan *hardware* yang bersifat *open source* sehingga sangat mudah diakses. Selain itu program *coding* dan *library* Arduino juga tersedia banyak secara bebas di internet. Bahasa pemrograman Arduino merupakan

bahasa C/C++ yang sudah disederhanakan dengan *syntax* sehingga dapat mempermudah dalam mempelajari dan mendalami mikrokontroler (Ginting, 2002).



Gambar 2.29. Arduino Uno (https://www.arduino.cc/en/products/counterfeit,

2020)

Detail spesifikasi *board* Arduino Uno yang terdapat di pasaran yaitu:

$\triangleright$	Mikrokontroler	: ATmega328
۶	Tegangan Operasi	: 5V
۶	Tegangan Input (recommended)	: 7–12 V
$\triangleright$	Tegangan Input (limit)	: 6–20 V
	Pin digital I/O	: 14 (6 diantaranya pin PWM)
	Arus DC per pin <i>I/O</i>	: 40 mA
$\triangleright$	Arus DC untuk pin 3.3 V	: 150 mA
$\triangleright$	Flash Memory	: 32 KB (0.5 KB untuk bootloader)
	EEPROM	: 1 KB
$\triangleright$	Kecepatan Pewaktuan	: 16 Mhz

Arduino Uno memiliki perintah umum program seperti:

- Kode "//" diartikan sebagai komentar yang tidak akan mempengaruhi jalannya program.
- Int (*integer*) merupakan tipe data yang digunakan untuk menyimpan bilangan bulat matematika. *Range* dari tipe data int sebesar 2147483648 sampai 214748364 (Suarga, 2012).
- *Void loop* merupakan perintah untuk melakukan kontrol pengulangan.
- SensorValue = analogRead(0), sensorValue memiliki arti tipe data menyimpan sebuah variabel sedangkan analogRead(0) menunjukkan perintah untuk membaca sensor pada pin 0.

- Serial.println(sensorValue) merupakan perintah untuk menampilkan nilai sensorValue pada serial monitor setiap barisnya ke bawah.
- Delay(3000) merupakan perintah untuk melakukan delay/menunggu program selama 3000 milisecond per detik atau setara dengan 3 detik untuk menampilkan hasil pemrograman.
- Kurung kurawal ({}) dan titik koma (;) yang digunakan untuk mendefinisikan kapan blok program mulai dan berakhir (digunakan juga pada fungsi dan pengulangan (Ginting, 2002).

Contoh aplikasi Arduino Uno pada alat sehari-hari antara lain sebagai alat detektor kebakaran, pengatur level air, alat terapi otomatis, pengaturan otomatis suhu udara, modul pengenalan suara, modul lampu otomatis dan sebagainya.

## 2.7.2 Data Logger

Data logger merupakan sistem yang berfungsi untuk merekam data ke dalam media penyimpan data. Data logger memiliki kapasitas penyimpan yang cukup besar sehingga data yang terekam dapat ditampilkan dalam grafik dalam durasi yang cukup lama. Secara umum, sistem data logger ini dibangun dari modul Arduino sebagai pengendalinya dan menggunakan SD Card sebagai media penyimpanannya. Dengan media ini kita dapat menyimpan data yang sangat besar, layaknya sebuah hardisk yang diisi file teks / txt file (Hartono, 2013). Data yang tersimpan didalam SD Card dapat dibaca pada komputer menggunakan card reader dengan output CSV File yang diolah menggunakan Microsoft Excel.



**Gambar 2.30.** Modul Data Logger (https://create.arduino.cc/projecthub/MisterBotBreak/how-to-use-a-dataloggerffd5f4, 2019)

#### 2.7.3 Sensor MPU 6050 Accelerometer – Gyroscope 521

Sensor MPU 6050 biasanya terdapat dua perangkat yaitu *accelerometer* dan *gyroscope*. *Accelerometer* adalah perangkat elektromekanis yang dapat mengukur kekuatan akselerasi (percepatan). Gaya-gaya ini mungkin statis, seperti gaya gravitasi konstan atau dapat juga dinamis akibat dari memindahkan atau menggetarkan *accelerometer*. Dengan mengukur jumlah akselerasi statis akibat gravitasi, maka dapat diketahui sudut kemiringan perangkat terhadap bumi. Pertimbangkan *Ax*, *Ay*, *Az* adalah akselerasi dalam arah *x*, *y*, dan *z*. Kemudian sudut *pitch*, *roll*, dan *yaw* dihitung menggunakan rumus (Urdhwareshe *et al.*, 2014):

$$At = \sqrt{Ax^2 + Ay^2 + Az^2}$$
(2.112)

$$roll = \sin^{-1}\left(\frac{Ax}{At}\right)$$
  $pitch = \sin^{-1}\left(\frac{Ay}{At}\right)$   $yaw = \sin^{-1}\left(\frac{Az}{At}\right)$  (2.113)

Sedangkan perangkat *Gyroscope* adalah perangkat untuk mengukur atau mempertahankan orientasi, dengan prinsip ketetapan momentum sudut. Mekanismenya adalah sebuah roda berputar dengan piringan di dalamnya yang tetap stabil. *Gyroscope* bekerja untuk menentukan orientasi gerak dengan bertumpu pada roda atau cakram yang berotasi dengan cepat pada sumbu.

$$\theta = \theta + \omega \,\delta t \tag{2.114}$$

dimana  $\theta$  adalah sudut derajat,  $\omega$  adalah kecepatan sudut dalam deg / detik, dan  $\delta t$  adalah waktu pengambilan sampel.

Kombinasi Accelerometer dan Gyroscope pada suatu sistem maka Accelerometer dapat memberikan pengukuran sudut saat sistem berada pada kondisi diam. Sedangkan pada saat sistem berotasi Accelerometer tidak bisa bekerja secara maksimal karena memiliki respon yang lambat. Kelemahan inilah yang dapat diatasi oleh Gyroscope karena sensor ini dapat membaca kecepatan sudut yang dinamis. Namun Gyroscope juga memiliki kelemahan yaitu proses perpindahan kecepatan sudut dalam jangka waktu yang panjang menjadi tidak akurat karena ada efek bias yang dihasilkan oleh Gyroscope. Contoh aplikatif kombinasi Accelerometer dan Gyroscope yaitu pada perangkat iPhone yang mengkombinasikan 2 sensor tersebut. Dari kombinasi Accelerometer dan Gyroscope didapatkan 6 sumbu pendeteksian yaitu 3 sumbu rotasi (x, y, z) dan 3 sumbu linier (atas-bawah, kanan-kiri, depan-belakang). Output dari kombinasi

sensor ini berupa gambar yang sangat detail dan halus gerakannya dibandingkan dengan smartphone yang hanya menggunakan *Accelerometer* saja (Firman, 2016).



Gambar 2.31. Modul Sensor MPU 6050 Accelerometer GY 521 (https://components101.com/sensors/mpu6050-module, 2018) Spesifikasi umum Sensor Nilai MPU 6050 Accelerometer GY 521

- ➢ Catu Daya sebesar 3 − 5 V
- Komunikasi menggunakan protokol I2C
- Built-in 16-bit ADC dengan akurasi tinggi
- Built-in DMP memberikan daya komputasi yang tinggi
- Dapat digunakan untuk berinteraksi dengan perangkat IIC lain seperti magnetometer
- Alamat IIC yang dapat dikonfigurasi

# BAB III METODOLOGI PENELITIAN

## **3.1 Diagram Alir Penelitian**

Untuk mencapai tujuan penelitian yang dikehendaki, maka dilakukan tahapan-tahapan yang sistematis agar hasil yang diperoleh sesuai harapan. Adapun tahapan tersebut secara ringkas digambarkan dengan diagram alir pada Gambar 3.1.





Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian

#### 3.2 Penjelasan Diagram Alir Penelitian

Adapun penjelasan diagram alir pada Gambar 3.1 adalah sebagai berikut:

## 3.2.1 Studi Literatur

Pada studi literatur ini dilakukan pencarian materi atau literatur yang mendukung langkah-langkah pada setiap bagian dalam penelitian. Literatur pertama yang dijadikan acuan adalah studi atau penelitian terdahulu terkait sistem *oscillating buoy* WEC terintregrasi tuas berbasis *direct mechanical drive system*. Penelitian terdahulu tentang sistem terkait antara lain penelitian dari Hazra *et al.*, 2012; Yusnitasari *et al.*, 2012; Cahyadi, 2014; Maris, 2015; Santoso, 2015; Susanto, 2015; Masjono, 2016; Albert *et al.*, 2017; Pamungkas *et al.*, 2019; dan Yang *et al.*, 2019. Dari penelitian terdahulu dianalisa utamanya terkait konfigurasi sistem, metode, dan hasil sehingga dapat dirumuskan konsep desain yang lebih baik sesuai dengan permasalahan yang diangkat.

Sistem *DMDS–Oscillating Buoy* WEC mengadopsi pada sistem *Array Point Raft* (APR) WEC yang telah diimplementasikan di Selat Taiwan dengan data yang ditunjukkan pada Tabel 3.1.

Deskripsi	Ukuran	Satuan
Buoy	2	
Diameter	1.2	m
Lebar	1.7	m
Jumlah	10	buah
Massa (termasuk lengan dan	250	ka
komponen lain)	230	ĸg
Draft	Dapat	diatur
Frekuensi Natural	1.32	rad/s

Tabel 3.1. Data APR WEC (Yang et al, 2019)

Deskripsi	Ukuran	Satuan
Central Pla	<u>atform</u>	
Panjang	18	m
Lebar	8	m
Tinggi	2.4	m
Draft	1.3	m
<u>Mechanical - Elec</u>	<u>ctrical System</u>	
Gearbox	1:25	-
Flywheel	100	kg.m <sup>2</sup>
Tegangan Generator	220	V
Daya Generator	5	kW

Kemudian, pada tahap ini juga dilakukan pencarian dasar-dasar teori pendukung yang berkaitan dengan topik konsep gelombang laut, mekanisme *energy harvesting* dari gelombang laut, hidrodinamika struktur, mekanika teknik, mekanika fluida, analisa dimensi, desain eksperimen, mesin listrik, rangkaian listrik dasar, elektronika daya, *electronic device*, dan perkembangan model pembangkit listrik tenaga gelombang laut. Semua referensi tersebut bersumber dari jurnal, hasil penelitian, artikel ilmiah, *e-book*, dan *handbook* yang diperoleh baik berupa *hardfile* maupun *softfile*.

#### 3.2.2 Identifikasi Masalah

Masalah yang diidentifikasi adalah pada sebuah oscillating buoy WEC berbasis direct mechanical drive system diupayakan mampu bekerja pada sea state yang lebih luas sehingga efektifitas konversi daya menjadi lebih tinggi. Dari contoh yang sudah ada yaitu APR WEC ternyata cenderung tidak mampu menghasilkan daya listrik ketika laut pada kondisi periode gelombangnya kurang dari 3 sekon. Ketika kondisi laut suatu saat berada pada periode gelombang yang semakin kecil, maka pada sistem oscillating buoy WEC berbasis direct mechanical drive system hanya akan menghasilkan simpangan gerak translasi pelampung yang semakin kecil sehingga jika dikonversi dalam gerak rotasi maka dihasilkan putaran yang kecil dan tidak cukup untuk memutar generator. Ditambah lagi penggunaan flywheel pada WEC yang jika inersianya terlalu besar maka beban mekaniknya juga semakin besar, sehingga tidak mampu menggerakkan generator. Solusi agar sistem mampu bekerja pada kondisi gelombang tersebut adalah dengan mendesain sistem mekanik seefektif mungkin. Desain sistem mekanik dapat dilakukan dengan menaikkan rasio putaran gear dan memperkecil inersia flywheel. Oleh karena itu, pada DMDS– *Oscillating Buoy* WEC didesain dengan rasio putaran *gear* lebih tinggi dan memperkecil nilai inersia *flywheel*. Untuk mendapatkan konversi energi optimal dari desain ini, maka dilakukan eksperimen skala laboratorium dengan variasi komponen panjang tuas, bentuk pelampung, dan ketinggian poros model terhadap permukaan air. Outputnya adalah berupa daya listrik yang kemudian dianalisa terhadap sistem mekanik yang bekerja dan dihubungkan dengan gaya hidrodinamik pelampung sehingga dapat diperoleh efisiensi sistem mekanik yang dibuat.

## 3.2.3. Pembuatan Konsep dan Desain DMDS – Oscillating Buoy WEC

#### 3.2.3.1. Konsep

Konsep DMDS-Oscillating Buoy WEC ini adalah memanfaatkan gaya apung pelampung yang terhubung dengan tuas kemudian menggerakkan konfigurasi gear yang disetting menghasilkan putaran tinggi. Tuas dan pelampung ini dapat menghasilkan torsi, kecepatan anguler, dan simpangan ketika diberikan input dari daya gelombang. Torsi berhubungan dengan gaya yang dapat diteruskan ke mekanisme pelampung dan tuas. Kecuraman gelombang berpengaruh terhadap perubahan kecepatan anguler di poros (*disc*) yang menghasilkan jarak angkat poros. Aliran energi yang terjadi selanjutnya diteruskan ke gear melalui sistem putaran searah (unidirectional rotation) yang dihasilkan baik saat gerakan gelombang naik maupun saat gerakan gelombang turun. Putaran yang dihasilkan ditingkatkan lagi menggunakan gearbox dengan rasio tertentu sehingga energi rotasi yang tersimpan di flywheel dapat lebih banyak dan membantu kinerja generator. Putaran generator tersebut akan menghasilkan energi listrik dalam bentuk arus dan tegangan. Secara began konsep oscillating buoy WEC ditunjukkan pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2. Desain Konsep DMDS–Oscillating Buoy WEC

#### 3.2.3.2. Desain

Desain konverter energi gelombang laut yang dibuat, secara spesifik berbasis konsep *oscillating buoy* yang menggunakan sistem *lever* atau tuas. Konfigurasi pelampung menggunakan hasil skala dari APR WEC. Untuk sistem tuas tidak mengadopsi desain APR WEC namun mengadopsi Wavestar karena berkaitan dengan kemudahan pembuatan. Mekanisme *power take-off* yang digunakan berbasis *direct mechanical drive system* yang terhubung dengan generator tipe *rotary*. Desain sistem mekanik didesain sedemikian rupa agar dihasilkan kinerja yang optimal. Konverter energi gelombang laut yang telah didesain ditunjukkan pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3. Desain DMDS–Oscillating Buoy WEC

Gambaran singkat prinsip kerja WEC yang dibuat yaitu memanfaatkan gaya apung pelampung yang terhubung dengan tuas kemudian menggerakkan konfigurasi *gear* yang disetting menghasilkan putaran tinggi dan *flywheel*. Sistem WEC ini juga menggunakan konsep putaran searah (*unidirectional rotation*) yang dihasilkan baik saat gerakan gelombang naik maupun saat gerakan gelombang turun.

Prinsip kerja alat saat gerakan gelombang naik (Gambar 3.4) yaitu pelampung akan terkena gaya hidrodinamik air laut sehingga bergerak ke atas dan gaya bersih yang dihasilkan (pengaruh gaya berat, buoyancy, inersia) diubah menjadi torsi oleh tuas dan menghasilkan kecepatan sudut pada disc. Perubahan kecepatan sudut ditransmisikan ke inverse gear 1 dan sprocket 1 yang seporos dengan disc. Sprocket 1 terhubung dengan freewheel 1 akan berada pada kondisi "Loss". Pada saat yang bersamaan, kecepatan sudut pada *inverse gear* 1 akan dibalik arahnya oleh *inverse gear* 2 dan putaran ini ditransmisikan ke sprocket 2 yang satu poros dengan inverse gear 2. Sprocket 2 terhubung dengan freewheel 2 dan dalam kondisi "On". Transmisi sprocket ke freewheel dibantu oleh rantai. Putaran yang dihasilkan berupa putaran searah (unidirectional rotation) diteruskan ke sprocket 3 (satu poros dengan freewheel 1 dan 2) yang terhubung dengan freewheel 3 dalam kondisi "On". Putaran ini selanjutnya ditingkatkan oleh gearbox dan kemudian diteruskan ke pulley yang dihubungkan ke generator oleh van belt. Flywheel yang seporos dengan pulley berfungsi untuk membuat putaran lebih kontinyu dan untuk menyimpan energi rotasi sehingga dapat meningkatkan kinerja generator.



Gambar 3.4. Prinsip Kerja DMDS-Oscillating Buoy WEC saat Naik

Sedangkan untuk prinsip kerja saat gelombang turun (Gambar 3.5) yaitu pelampung akan terkena gaya berat sehingga bergerak ke bawah dan gaya bersih yang dihasilkan (pengaruh hidrodinamik, *buoyancy*, inersia) diubah menjadi torsi oleh tuas dan menghasilkan kecepatan sudut pada disc. Perubahan kecepatan sudut ditransmisikan ke inverse gear 1 pada arah yang berlawanan saat gelombang naik. Selanjutnya kecepatan sudut yang dihasilkan ditransmisikan sprocket 1 yang seporos dengan disc. Sprocket 1 terhubung dengan freewheel 1 akan berada pada kondisi "On". Pada saat yang bersamaan, kecepatan sudut pada inverse gear 1 akan dibalik arahnya oleh inverse gear 2 dan putaran ini ditransmisikan ke sprocket 2 yang satu poros dengan inverse gear 2. Sprocket 2 terhubung dengan freewheel 2 dan dalam kondisi "Loss". Transmisi sprocket ke freewheel dibantu oleh rantai. Putaran yang dihasilkan berupa putaran searah (unidirectional rotation) diteruskan ke sprocket 3 (satu poros dengan freewheel 1 dan 2) yang terhubung dengan freewheel 3 dalam kondisi "On". Putaran ini selanjutnya ditingkatkan oleh gearbox dan kemudian diteruskan ke pulley yang dihubungkan ke generator oleh van belt. Flywheel berfungsi untuk membuat putaran lebih kontinyu dan untuk menyimpan energi rotasi.



Gambar 3.5. Prinsip Kerja DMDS-Oscillating Buoy WEC saat Turun

Secara detail, parameter ukuran desain *DMDS–Oscillating Buoy* WEC ditunjukkan pada Tabel 3.2.

No	Komponen	Nilai / Keterangan
1.	Dimensi Kerangka	1 m x 0.5 m x 1.15 m
2.	Variasi Panjang Tuas	0.9 m, 1 m, dan 1.15 m
3.	Variasi Tinggi Poros – MWL	0.67 m dan 0.37 m
4.	Dimensi Pelampung Silinder	d = 32.5  cm, l = 45  cm
5.	Dimensi Pelampung Balok	p = 45  cm, l = 34  cm, t = 18  cm
6.	Dimensi Disc	d = 20  cm, l = 3  cm
7.	Dimensi Flywheel	d = 20  cm, l = 7  cm
7.	Rasio Transmisi I (Sprocket 1)	1:2.4
8.	Rasio Transmisi II (Sprocket 2)	1:2.4
9.	Rasio Transmisi III (Gearbox)	1:10.56
10.	Generator DC	12 V; 0.3 A

Tabel 3.2. Nilai Parameter pada Eksperimen DMDS-Oscillating Buoy WEC

## 3.2.4. Rancang Bangun DMDS–Oscillating Buoy WEC

## 3.2.4.1. Komponen-Komponen DMDS–Oscillating Buoy WEC

## a. Buoy (Pelampung)

*Buoy* atau pelampung berfungsi untuk menghasilkan gerakan naik turun akibat energi gelombang laut pada arah *heave* yang kemudian gerakan tersebut diteruskan ke tuas pelampung menjadi gerakan sekitar beberapa derajat putaran. Pelampung terdiri atas 2 bentuk yaitu bentuk silinder dan bentuk balok. Pelampung bentuk silinder memiliki ukuran diameter 32.5 cm dan lebar 45 cm. Sedangkan pelampung balok memiliki dimensi panjang 45 cm, lebar 34 cm, dan tinggi 18 cm. Dimensi ini dibuat dengan menyesuaikan ukuran model *oscillating buoy* WEC, lebar *flume tank* untuk pengujian dan bahan yang mudah diperoleh di pasaran. Desain pelampung ditunjukkan pada Gambar 3.6.



Gambar 3.6. Desain Pelampung Silinder dan Balok

#### b. Lever (Tuas) dan Disc

*Lever* atau tuas merupakan komponen yang bertindak sebagai penghubung antara pelampung dengan mekanisme *direct mechanical drive system*. Tuas yang digunakan didesain *adjustable* untuk memudahkan dalam pemvariasian panjang tuas dalam eksperimen. Variasi tuas dilakukan dengan cara menambah ukuran sambungan dengan posisi poros tetap. Variasi panjang tuas yang digunakan adalah  $L_{T1} = 0.9$  m,  $L_{T2} = 1$  m dan  $L_{T3} = 1.15$  m. Panjang tuas sangat berpengaruh terhadap torsi dan putaran yang dihasilkan. Tuas terhubung langsung dengan poros yang menjadi satu dengan disc. *Disc* ini berfungsi untuk melihat berapa derajat putaran yang terjadi dan sebagai bantalan poros utama. Adapun desain tuas dan *disc* ditunjukkan pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7. Desain Tuas dan Disc

### c. Gear dan Flywheel

*Gear* atau roda gigi berfungsi sebagai pengubah kecepatan dari kecepatan rendah ke kecepatan tinggi atau sebaliknya. Pada *DMDS– Oscillating Buoy* WEC ini, *gear* yang digunakan berupa *gear* lurus. Penggunaannya adalah pada *inverse gear* 1, *inverse gear* 2, dan *gear* dalam *gearbox*. Pada *gearbox* ini dirancang dengan rasio kecepatan 1 : 10.56. *Gear* yang digunakan berbahan besi karena lebih mudah ditemukan di pasaran dan mudah dalam memodifikasinya. Sedangkan untuk *flywheel* didesain dari piringan besi pejal dengan diameter 20 cm dan lebar 7 cm kemudian disambungkan secara presisi ke output *gearbox*. Adapun desain *gear* dan *flywheel* ditunjukkan pada Gambar 3.8.



**Gambar 3.8.** *Inverse Gear, Gearbox* dan *Flywheel* **f. Sprocket dan Freewheel** 

Kombinasi *sprocket* dan *freewheel* sering dijumpai pada sepeda kayuh. Pada *DMDS–Oscillating Buoy* WEC, *sprocket* dan *freewheel* sangat berperan pada peningkatan kecepatan transmisi 1 dan 2 baik saat kondisi naik maupun turun. *Sprocket* dan *freewheel* yang digunakan menyesuaikan dengan komponen siap pakai yang tersedia di pasaran. Jumlah gigi *sprocket* sebanyak 44 buah sedangkan jumlah gigi *freewheel* sebanyak 18 sehingga menghasilkan peningkatan kecepatan sekitar 2.44 kali di setiap transmisi 1 dan 2 sebelum masuk ke *gearbox*. Bentuk penghubung antara *sprocket* dan *freewheel* adalah berupa rantai. Gambaran desain *sprocket* dan *freewheel* ditunjukkan pada Gambar 3.9.



Gambar 3.9. Desain Sprocket dan Freewheel yang Dihubungkan Rantai

## g. Generator

Generator yang digunakan pada penelitian *DMDS–Oscillating Buoy* WEC ini adalah motor DC yang difungsikan sebagai generator. Komponen magnet pada motor ini adalah magnet permanen. Sistem generator diberi *casing* hasil modifikasi agar lebih terlindungi. Spesifikasi motor DC yang dipakai yaitu 12 V, 0.3 A dengan daya 3.3 W.



Gambar 3.10. Desain Motor DC yang Difungsikan sebagai Generator 3.2.4.2. Fabrikasi *DMDS–Oscillating Buoy* WEC

Pada tahap fabrikasi ini, desain yang telah dirancang dibuat di bengkel Hidro Cipta Mandiri yang berlokasi di Gunung Sawur, Desa Sumberwuluh, Kecamatan Candipuro, Kabupaten Lumajang, Provinsi Jawa Timur. Proses fabrikasi dibuat secara parsial di setiap bagian dari *oscillating* WEC mulai dari *frame*, pelampung, tuas, *disc*, poros untuk *sprocket* dan *freewheel*, *gearbox*, generator, dan panel beban. Proses fabrikasi menghabiskan waktu selama 3.5 bulan. Tahap fabrikasi secara umum meliputi proses pemotongan (*cutting*), penghalusan (*grinding*), pengeboran (*milling*), pembubutan (*latching*), hingga pengecatan (*painting*.) Setiap bagian terutama yang berperan dalam sistem mekanik dikerjakan secara presisi sehingga dipastikan konfigurasi dapat bekerja dengan baik. Jika ditemukan masalah utamanya pada ketidak kontinyuan putaran atau adanya gerakan yang tidak *smooth*, maka dilakukan proses pemrosesan ulang terhadap komponen tersebut. Oleh karena itu, setiap bagian memiliki detail ukuran seperti yang ditunjukkan pada Lampiran 4.



Gambar 3.11. Hasil Fabrikasi *DMDS–Oscillating Buoy* WEC 3.2.5 Persiapan Komponen Pendukung Eksperimen

Setelah fabrikasi *DMDS–Oscillating Buoy* WEC selesai, selanjutnya adalah persiapan pengujian terhadap alat yang dibuat. Beberapa alat pendukung baik berupa *hardware* maupun *software* eksperimen diperlukan agar diperoleh data yang diinginkan. Adapun *hardware* yang digunakan yaitu:

# 3.2.5.1 Data Logger

Data logger digunakan untuk merekam nilai tegangan dan arus yang dihasilkan oleh generator selama eksperimen. Output kabel positif dan negatif dari generator dihubungkan ke input *data logger* yang memiliki *hardware* berupa Arduino Uno, *Logger Module*, dan Sensor INA219 I2C. Suplai *data logger* menggunakan *power bank*. Output dari *data logger* dihubungkan ke beban berupa lampu LED. Perekaman data diatur dalam bentuk file .CSV yang disimpan pada *SD Card*. Adapun bentuk *data logger* yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 3.12.



Gambar 3.12. Modul Data Logger



Gambar 3.13. Tampilan Aplikasi untuk Running Data Logger

Seperti yang ditunjukkan Gambar 3.13, perekaman data pada *data logger* ini berbasis perintah aplikasi android yang terkoneksi dengan *Bluetooth*. Aplikasi yang digunakan adalah aplikasi *Arduino Bluetooth Controller* yang diperoleh *free* di *Playstore*. Langkah-langkah *running* aplikasinya adalah sebagai berikut:

- 1. Setelah membuka aplikasi *Arduino Bluetooth Controller* di HP, selanjutnya pilih jaringan *Bluetooth* "LOGDUINO". Nama *bluetooth* ini merupakan penamaan bebas dari modul *data logger* yang ada.
- 2. Pilih Mode "*Terminal Mode*" untuk pemantauan di layer HP secara *real time*.

- 3. Ketikkan perintah *running* data logger misal dengan mengetik huruf "r" (bebas memberi nama, tergantung *coding* di Ardunio Uno).
- 4. Ketika *running* selesai, ketikkan "ss" untuk memberhentikan perekaman. Data yang diperoleh akan tersimpan otomatis di *SD Card* dalam bentuk file .CSV.

#### **3.2.5.2 Modul Pengukuran Sudut Gerak Pelampung**

Pengukuran sudut poros selama pelampung bergerak dilakukan dengan memasang sensor *accelerometer* MPU6050 GY 521 yang memiliki spesifikasi dapat mengukur sudut pada posisi *roll*, *pitch*, dan *yaw*. Sensor ini diletakkan di tuas *DMDS–Oscillating Buoy* WEC dalam kondisi terlindung plastik dan diletakkan pada jarak yang aman dari percikkan air. Peletakkan sensor di tuas ini bertujuan untuk dapat mengukur perubahan sudut *pitch* ketika terjadi osilasi pelampung. Dari data sudut *pitch* tersebut dapat digunakan untuk menghitung perubahan naik-turun pelampung ketika terkena gelombang.

Selanjutnya, sensor *accelerometer* dihubungkan ke Arduino Uno dan diteruskan ke *software inclining test* yang dibuat melalui Labview. *Software* ini dijalankan melalui laptop dengan tampilan pada Gambar 3.14. Ketika dijalankan, selama perekaman data dapat langsung disimpan dalam bentuk file excel yang berekstensi .XLSX. Perubahan sudut juga dapat dilihat melalui tampilan grafik.



Gambar 3.14. Hardware Sensor Modul Pengukuran Sudut Gerak Pelampung



Gambar 3.15. *Software* untuk Penyimpanan Data Sudut *Pitch* 3.2.5.3 *Digital Spring Balance* 

Alat ini merupakan neraca digital yang difungsikan untuk mengukur massa setiap komponen. Pengukuran massa ini bertujuan agar dapat menghitung inersia dari setiap komponen yang bekerja. Beberapa komponen yang penting diketahui nilai inersinya yaitu pelampung, tuas, *inverse gear* 1, *inverse gear* 2, *sprocket* 1, *sprocket* 2, *freewheel* 1, *freewheel* 2, *gearbox*, *flywheel*, dan *pulley*. Adapun digital spring balance yang digunakan, ditunjukkan pada Gambar 3.16.



Gambar 3.16. Digital Spring Balance

#### 3.2.6. Kalibrasi Peralatan Eksperimen

Pada tahap ini dilakukan pengecekan alat pengukuran pada laboratorium sebelum dilakukan proses pengujian. Hal ini bertujuan untuk menghindari dan meminimalisir kesalahan dalam pengambilan data saat proses pengujian berlangsung. Adapun peralatan yang dikalibrasi adalah setting ketinggian gelombang dan periode dari *wave maker* yang dapat terbaca di *wave probe*, *data logger*, modul pengukuran sudut pelampung, dan *digital spring balance*. Adapun metode kalibrasi setiap alat ukur yaitu:

#### 3.2.6.1 Kalibrasi Wave Probe

*Wave probe* merupakan alat pengukur fluktuasi muka air yang tercelup ke dalam air. Tujuan dari kalibrasi alat *wave probe* ini adalah mendapatkan pembacaan fluktuasi muka air dengan akurasi yang tinggi. Adapun kalibrasi *probe* dilakukan menggunakan metode Weintrit (2017) dengan cara:

- Menginputkan nilai tinggi dan periode gelombang
- Menentukan nilai target terukur
- Mencatat tinggi gelombang terukur
- Menghitung nilai error yang terjadi
- Perulangan pada input yang berbeda-beda

#### 3.2.6.2 Kalibrasi Data Logger

Kalibrasi *data logger* digunakan untuk memastikan pembacaan tegangan seakurat mungkin sehingga meminimalkan kesalahan data. Adapun kalibrasi ini dilakukan dengan cara:

- Memberi suplai *data logger* dengan tegangan DC
- Menggunakan modul STML100 dan Voltmeter dengan output tegangan 5
   V sebagai referensi output dengan konfigurasi seperti Gambar 3.17.



Gambar 3.17. Konfigurasi Rangkaian untuk Kalibrasi Data Logger

• Melihat tegangan output di board Arduino

• Mencari faktor skala pembacaan dan diinputkan ke *coding* Arduino *data logger* yaitu dengan rumus:

$$V_s = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \times V_{ADC} \times \text{Skala}$$
 (Nilai  $R_1 = 33 \text{ ohm}, R_2 = 100 \text{ ohm})$ 

Menggunakan cara *trial and error* maka diperoleh faktor skala yang sesuai adalah 0.56. Proses kalibrasi dilakukan dengan statis dan dinamis. Kalibrasi statis dilakukan dengan cara memberikan beberapa nilai tegangan input tertentu dan mengecek nilai tegangan output yang seharusnya muncul pada *data logger*. Sedangkan kalibrasi dinamis dilakukan dengan cara memberikan suplai tegangan tertentu dari sumber non linier berupa motor DC yang dioperasikan sebagai generator kemudian dibandingkan hasilnya dengan sensor INA219 I2C. Ketepatan pengukuran pada kalibrasi dinamik sangat penting dicapai pada tingkat akurasi yang tinggi dikarenakan eksperimen *DMDS–Oscillating Buoy* WEC memiliki karakteristik yang sangat dinamis sebagai dampak dari input gelombang.

#### 3.2.6.3 Kalibrasi Sensor Accelerometer

Komponen selanjutnya yang dikalibrasi adalah sensor *accelerometer* dengan tipe MPU6050 GY 521. Sensor ini penting untuk mengukur sudut yang terbentuk antara tuas dan muka air sehingga dapat diketahui perubahan sudut yang terjadi selama eksperimen. Perubahan sudut ini dapat dikonversi menjadi jarak yang ditempuh selama pelampung berosilasi (*displacement*) sehingga berguna untuk menentukan parameter hidrodinamik. Sudut yang dikonversi utamanya adalah sudut *pitch*, yaitu gerak rotasi pada sumbu *y* yang merepresentasikan gerakan naik turun pelampung. Secara umum sensor *accelerometer* dapat dikalibrasi melalui *code* Arduino Uno dengan langkah-langkah berikut:

- Kalibrasi berbasis *coding* di *library* Arduino sehingga untuk memulai kalibrasi, harus membuka *library* yang bernama IMU\_Zero
- Mengupload *code* ke *hardware* Arduino Uno yang terhubung dengan sensor MPU6050 (tunggu hingga proses upload selesai)
- Menyalin nilai *offset* yang dihasilkan
- Memasukkan nilai offset ke library lain yang bernama MPU6050\_DMP6
- Mengupload kembali code ke hardware Arduino

- Setelah selesai, membuka serial number Arduino
- Muncul tampilan pengukuran secara *realtime*
- Sensor telah terkalibrasi

#### 3.2.7. Pemodelan Penelitian

Langkah selanjutnya adalah pemodelan *DMDS–Oscillating Buoy* WEC. Pemodelan ini bertujuan untuk mendapatkan respon parameter hidrodinamik yang dikorelasikan dengan daya terbangkit dan diikuti dengan mendapatkan efisiensi sistem mekanik.

#### 3.2.7.1. Pemodelan Numerik

Pemodelan numerik dilakukan menggunakan *software* MATLAB 7.0. Pemodelan ini lebih bertujuan untuk mendapatkan konstanta parameter hidrodinamik yang digunakan untuk analisa perhitungan daya gelombang yang mampu diserap oleh pelampung. Setelah mendapatkan parameter hidrodinamik juga dilakukan simulasi menggunakan Simulink yang bertujuan untuk mendapatkan gaya total, perpindahan, kecepatan, dan percepatan gerakan *heave*. Perkalian antara gaya total dan kecepatan gerakan *heave* dalam satu periode gelombang akan menghasilkan daya gelombang terserap oleh pelampung.

#### **3.2.7.2. Pemodelan Eksperimen**

Pada tahap ini dilakukan pemodelan terhadap bentuk pelampung beserta dimensinya dan gelombang uji yang disesuaikan dengan data dari APR WEC. Pada eksperimen ini *DMDS–Oscillating Buoy* WEC dimodelkan menggunakan skala 1:3.7. Sesuai tujuan penelitian dimana WEC didesain agar mampu bekerja pada periode gelombang minimal kurang dari 3 sekon, maka dipilih periode uji adalah 1.9 s dan 2.3 s. Nilai periode tersebut kemudian diskala sehingga diperoleh periode gelombang uji di laboratorium adalah 1 s dan 1.2 s. Untuk tinggi gelombang dipilih 0.85 m dan 0.9 m pada skala prototipe dimana nilai ini masih berada pada *range sea state* APR WEC. Jika nilai tersebut dikonversi ke skala laboratorium, maka menjadi 0.23 m dan 0.25 m. Secara detail hasil pemodelan ditunjukkan pada Tabel 3.3.

Parameter	APR WEC	Faktor Skala	Kalkulasi
Massa Pelampung (kg)	200	$\lambda^3$	3.948
Diameter (m)	1.2	λ	0.324
Lebar (m)	1.7	λ	0.46
Periode (s)	1.9 dan 2.3	$\lambda^{1/2}$	1 dan 1.2
Tinggi Gelombang (m)	0.85 dan 0.9	λ	0.23 dan 0.25

 Tabel 3.3. Hasil Penskalaan Pelampung DMDS–Oscillating Buoy WEC

## 3.2.7.3. Analisa Dimensi

Analisis dimensi dapat menggunakan beberapa metode seperti metode Rayleigh, Buckingham pi, Langhaar, dan Matrix. Pada eksperimen ini analisa dimensi dilakukan menggunakan metode Matrix. Variabel-variabel yang bekerja pada eksperimen dikelompokkan sebagai berikut:

- Variabel tak bebas (*dependent variable*) : P
- Variabel yang diubah-ubah dalam eksperimen :  $H, T, d, L_t, Y, \theta, B_n, h_0$

 $: g, \rho$ 

Variabel lain

dalam eksperimen disajikan dalam bentuk koefisien transmisi yaitu:

$$C_{P} = \left[\frac{P}{\rho g^{1.5} H^{3.5}}\right] = f\left[H, T, d, L_{t}, Y, \theta, B_{n}, h_{0}, g, \rho, P\right]$$

Dalam mencari parameter tak berdimensi, maka harus diketahui terlebih dahulu dimensi dari variabel yang berpengaruh pada eksperimen. Adapun dimensi tersebut disajikan pada Tabel 3.4.

No	Simbol	Variabel	Dimensi
1.	Н	Tinggi Gelombang Signifikan	L
2.	Т	Periode Gelombang	Т
3.	d	Kedalaman Air	L
4.	$L_t$	Panjang Tuas	L
5.	Y	Tinggi Poros terhadap MWL	L
6.	$\theta$	Sudut antara Tuas dengan MWL	-
7.	$B_n$	Panjang Garis Air pada Bidang 2D	L
8.	$h_0$	Draft Pelampung	L
9.	g	Percepatan gravitasi bumi	$LT^{-2}$
10.	ρ	Massa jenis air laut	$ML^{-3}$
11.	Р	Daya Listrik	$ML^2T^{-3}$

Tabel 3.4. Dimensi Parameter yang Berpengaruh Terhadap Eksperimen

Jumlah variabel (*k*) adalah 11, dan jumlah dimensi (*r*) adalah 3, maka diperkirakan jumlah PI model =  $(k - r) = 11 - 3 = 8\pi$  model

Adapun langkah-langkah analisa dimensi eksperimen ini yaitu:

- H T d  $L_t$  $\boldsymbol{B}_n$  $h_0$ Y P g O 1 -3 L 1 0 1 1 1 0 1 1 2 0 0 0 0 0 0 0 -2 0 -3 Т 1 Μ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1
- a. Mendata keberadaan jumlah dimensi pada tiap variabel
- b. Menentukan repeating variables dan non-repeating variables dalam matrix
  - Misal *repeating variables* yang dipilih dan mewakili dimensi L, T, M adalah H, g, ρ.
  - Matrix orange untuk *repeating variables* dan matrix hijau untuk *non-repeating variables*.

	H	g	ρ	T	d	Lt	Y	$\theta$	$B_n$	<b>h</b> 0	P
L	1	1	-3	0	1	1	1	0	1	1	2
Т	0	-2	0	1	0	0	0	0	0	0	-3
$\mathbf{M}$	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
• Matriks $[A] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & -3 \\ 0 & -2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ , Invers Matrix $A \begin{bmatrix} A^{-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{2} & 3 \\ 0 & -\frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$											
• Ma	atriks	[B]=	0 1 1 0 0 0	1 0 0	1 0 0 0 0 0	1 1 0 0 0 0	$2 \\ -3 \\ 1$				

c. Mengoperasikan persamaan matrix

•	[C]=	[A]	<sup>-1</sup> [B	]										
•	[C]=	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{2}$ $-\frac{1}{2}$ 0	3 0 1	×	0 1 0	1 0 0	1 0 0	1 0 0	0 0 0	1 0 0	1 0 0	$\begin{bmatrix} 2 \\ -3 \\ 1 \end{bmatrix}$	
•	[C]=	0. -0 0	5 ).5 )	1 0 0	1 0 0	1 0 0	0 0 0	1 0 0	1 0 0	3. 1.: 1	5 5			

	T	d	Lt	Y	$\theta$	Bn	<b>h</b> 0	P
H	0.5	1	1	1	0	1	1	3.5
g	-0.5	0	0	0	0	0	0	1.5
ρ	0	0	0	0	0	0	0	1

• 
$$\mathcal{O} = \left[\frac{Tg^{0.5}}{H^{0.5}}, \frac{d}{H}, \frac{L_t}{H}, \frac{Y}{H}, \theta, \frac{B_n}{H}, \frac{h_0}{H}, \frac{P}{H^{3.5}g^{1.5}\rho}\right] = 8\pi \text{ model}$$

d. Melakukan compounding terhadap parameter yang diperoleh

• 
$$\mathcal{Q} = \left[\frac{H}{gT^2}, \frac{Y}{L_t}, \frac{B_n}{h_0}, \frac{d}{h_0}, \theta, \frac{P}{\rho g^{1.5} H^{3.5}}\right]$$

• 
$$C_P = \left[\frac{P}{\rho g^{1.5} H^{3.5}}\right] = \mathcal{O}\left[\frac{H}{gT^2}, \frac{Y}{L_t}, \frac{B_n}{h_0}, \frac{d}{h_0}, \theta\right]$$

#### 3.2.8. Skenario Eksperimen di Laboratorium

Skenario eksperimen dilakukan dengan pemodelan fisik 2D di *Flume Tank* Laboratorium Energi dan Lautan, Departemen Teknik Kelautan ITS Surabaya. Spesifikasi *flume tank* yang digunakan yaitu:

a. Whole Body

	• Panjang	: 20.3 m
	• Tinggi	: 2.3 m
	• Lebar	: 2.5 m
b.	Measuring Section	
	• Panjang	: 14 m
	• Tinggi	: 1.5 m
	• Lebar	: 2 m
	• Kedalaman air	: 0.63 m
c.	Material	
	• Dinding samping	: Toughned Glass and Mild Steel

- Lantai : *Mild Steel*
- Dinding belakang : *Mild Steel*

*Flume tank* ini dilengkapi *wave absorber* di ujung kolam dan pembangkit gelombang tipe *plunger* yang mampu membangkitkan baik gelombang regular maupun ireguler. Tinggi gelombang maksimum yang mampu dibangkitkan adalah 25 cm dengan periode antara 0.5 – 3 detik untuk gelombang reguler. Sedangkan untuk gelombang ireguler dapat menggunakan spektrum gelombang JONSWAP, Pierson-Moskowitz, ISSC, dan ITTC yang berhubungan dengan *software* yang ada. Selain itu juga dilengkapi dengan *probe* untuk sensor gelombang yang dihubungkan

dengan ADC (*Analog Digital Converter*) untuk mentransfer data ke seperangkat komputer sebagai perekam data. *Flume tank* beserta fasilitas yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 3.18.



Gambar 3.18. Flume Tank di Departemen Teknik Kelautan ITS (Winarto, 2017)

Setelah dilakukan kalibrasi, tahap selanjutnya adalah pemasangan model ke dalam *flume tank* dengan konfigurasi yang direncanakan agar dihasilkan hasil terbaik. Konfigurasi pemasangan alat di *flume tank* ditekankan pada jarak antara *wave probe* depan dengan pelampung yang memiliki variasi tuas terpanjang. Jarak ini dihitung mengacu pada penelitian Goda dan Suzuki (1976), dan Isaacson (1991) dimana disyaratkan:

 $0.4L_{max} < \Delta l < 0.6 L_{max}$  untuk gelombang reguler  $\Delta l > L_{max}$  untuk gelombang ireguler

Oleh karena itu, diambil jarak aman terhadap refleksi pelampung yaitu  $\Delta l = 2 L_{max}$ .

*L<sub>max</sub>* merupakan panjang gelombang yang dihasilkan oleh variasi input periode yang tertinggi. Penentuan ini bertujuan untuk memperkecil nilai refleksi gelombang ketika mengenai pelampung yang dapat mempengaruhi pembacaan nilai di *wave probe*. Pada eksperimen ini direncanakan menggunakan input periode antara 1 dan 1.2 sekon. Adapun hasil perhitungannya ditunjukkan pada Tabel 3.5.

 Tabel 3.5. Perhitungan Penentuan Jarak Wave Probe terhadap Pelampung

<b>T</b> (s)	<i>d</i> (m)	$L_o = gT^2/2\pi \ (\mathrm{m})$	<i>L</i> (m)	$\Delta l = 2 L (m)$
1.0	0.63	1.56131	1.54296	3.08592
1.2	0.63	2.24829	2.13978	4.27956

Perhitungan L dilakukan menggunakan iterasi dari persamaan panjang gelombang Triatmodjo (1999). Berdasarkan hasil perhitungan, maka nilai  $L_{max}$  dibulatkan ke nilai 4.5 meter seperti pada *setting* konfigurasi pemasangan model pada Gambar 3.19.





Gelombang uji yang digunakan dalam penelitian ini adalah gelombang reguler. Pengujian gelombang regular digunakan untuk analisa hubungan antar parameter pada kondisi gelombang yang ideal. Sedangkan pengujian gelombang ireguler tidak dilakukan karena keterbatasan waktu eksperimen dan kemampuan pembangkitan gelombang di *flume tank*. Selanjutnya untuk perancangan variasi eksperimen yang dibuat ditunjukkan pada Tabel 3.6 dan Tabel 3.7.

Konfigurasi	Bentuk Pelampung	Lebar Pelampung (m)	Panjang Tuas (m)	Jarak Poros Lengan dengan MWL (m)
A1	Silinder	0.45	1.00	0.67
B1	Silinder	0.45	1.15	0.67
C1	Silinder	0.45	0.90	0.67
D1	Silinder	0.45	0.90	0.37
<b>E</b> 1	Silinder	0.45	1.00	0.37
<b>F</b> 1	Silinder	0.45	1.15	0.37
A2	Balok	0.45	1.00	0.67
B2	Balok	0.45	1.15	0.67

**Tabel 3.6.** Konfigurasi Variasi Dimensi DMDS–Oscillating Buoy WEC

Konfigurasi	Bentuk Pelampung	Lebar Pelampung (m)	Panjang Tuas (m)	Jarak Poros Lengan dengan MWL (m)
C2	Balok	0.45	0.90	0.67
D2	Balok	0.45	0.90	0.37
E2	Balok	0.45	1.00	0.37
F2	Balok	0.45	1.15	0.37

Tabel 3.7. Rancangan Konfigurasi Eksperimen

No	Konfigurasi	Tipe	H (m)	<b>T1</b>	T2	Durasi Per
		Gelombang				Uji (s)
1.	Δ 1	Reguler	0.23	1	1.2	90
	Al	Reguler	0.25	1	1.2	90
2.	B1	Reguler	0.23	1	1.2	90
		Reguler	0.25	1	1.2	90
3.	C1	Reguler	0.23	1	1.2	90
		Reguler	0.25	1	1.2	90
4.	D1	Reguler	0.23	1	1.2	90
	DI	Reguler	0.25	1	1.2	90
5.	<b>E</b> 1	Reguler	0.23	1	1.2	90
	EI	Reguler	0.25	1	1.2	90
6.	F1	Reguler	0.23	1	1.2	90
		Reguler	0.25	1	1.2	90
7.	A2	Reguler	0.23	1	1.2	90
		Reguler	0.25	1	1.2	90
8.	DЭ	Reguler	0.23	1	1.2	90
	D2	Reguler	0.25	1	1.2	90
9.	C	Reguler	0.23	1	1.2	90
	C2	Reguler	0.25	1	1.2	90
10.	D2	Reguler	0.23	1	1.2	90
		Reguler	0.25	1	1.2	90
11.	E2	Reguler	0.23	1	1.2	90
	E2	Reguler	0.25	1	1.2	90
12.	F2	Reguler	0.23	1	1.2	90
		Reguler	0.25	1	1.2	90

# 3.2.9. Analisa Hasil dan Kesimpulan

Pada tahap ini dilakukan analisa data yang diperoleh dari pengujian. Data yang diperoleh adalah berupa data sudut *pitch* dari osilasi pelampung, *draft* 

pelampung dan data tegangan yang terekam oleh *data logger*. Data sudut kemudian diolah menjadi data perpindahan gerakan *heave* pelampung menggunakan persamaan trigonometri. Untuk data *draft* digunakan sebagai input simulasi MATLAB 7.0 untuk mendapatkan konstanta parameter hidrodinamik yang selanjutnya digunakan untuk menghitung koefisien massa tambah, redaman, kekakuan, amplitudo gerakan *heave*, dan amplitudo gaya gelombang. Parameter hidrodinamik diperoleh dari simulasi dikarenakan keterbatasan instrumen eksperimen dalam melakukan *decay test* untuk menentukan parameter tersebut. Data sudut yang diubah menjadi data perpindahan *heave* tersebut digunakan sebagai validasi nilai amplitude gerakan *heave* yang dihitung dari hasil simulasi.

Ketika semuanya telah sesuai, maka selanjutnya adalah perhitungan daya gelombang yang diserap oleh pelampung hingga diperoleh daya mekanik sistem. Dari data tegangan yang terekam oleh *data logger* digunakan untuk menghitung daya listrik dan daya mekanik juga, sehingga jika dibandingkan dengan hasil input dapat diperoleh efisiensi sistem mekanik dari *DMDS–Oscillating Buoy* WEC. Selain itu, dengan variasi panjang tuas, bentuk pelampung, dan ketinggian potos model terhadap permukaan air maka dapat diketahui konfigurasi yang paling optimal.

## 3.2.10. Penyusunan Laporan Akhir dan Finalisasi Tesis

Tahap ini merupakan tahap akhir dari penelitian yang dilakukan. Pada tahap ini dilakukan penyusunan laporan akhir tesis magister sebagai dokumen tertulis baik berupa *softfile* maupun *hardfile* untuk menjelaskan hasil eksperimen kinerja *DMDS–Oscillating Buoy* WEC yang telah didesain. Tahap pengembangan selanjutnya adalah berupa publikasi hasil penelitian untuk kebermanfaatan penelitian terkait di masa depan. "Halaman ini sengaja dikosongkan"
# BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini dijelaskan tentang hasil eksperimen DMDS-Oscillating Buoy WEC yang ditekankan pada beberapa aspek, yaitu: pemilihan konfigurasi sistem mekanik yang tepat dari variasi uji yang ditentukan, performa kinerja sistem mekanik dalam menghasilkan daya listrik pada periode gelombang minimum kurang dari 3 sekon untuk skala prototipenya, dan parameter hidrodinamik yang berpengaruh pada daya yang dihasilkan. Eksperimen dilakukan dengan mengacu pada prototipe APR WEC yang merupakan WEC berbasis *Power Take–Off* (PTO) direct mechanical drive system dan telah diujikan di Selat Taiwan (Yang et al, 2019). Pada eksperimen ini, komponen pelampung DMDS-Oscillating Buoy WEC diskala terhadap pelampung APR WEC agar diperoleh gambaran yang sama untuk skala prototipe. Namun, pada DMDS-Oscillating Buoy WEC didesain dengan konfigurasi sistem mekanik yang berbeda dengan APR WEC dimana rasio putaran gear dibuat 1:61 dan inersia flywheel dibuat 1/17 kali dari APR WEC. Desain ini ditujukan agar DMDS-Oscillating Buoy WEC mampu bekerja pada periode gelombang kurang dari 3 sekon. Kemudian pada DMDS-Oscillating Buoy WEC menggunakan bentuk tuas lurus yang mengacu pada sistem tuas yang dipakai oleh Wavestar, Denmark. Untuk sistem elektrik, pada DMDS-Oscillating Buoy WEC menggunakan Permanent Magnet DC Motor yang dioperasikan sebagai generator dan menghasilkan listrik DC. Hal ini dikarenakan keterbatasan untuk mendapatkan generator AC yang dapat digunakan dalam skala laboratorium, sehingga konversi listrik DC ke listrik AC dilakukan dengan penjelasan umum yaitu sistem yang menggunakan DC to DC boost converter – baterai (accumulator) – inverter.

Selanjutnya pada eksperimen *DMDS–Oscillating Buoy* WEC dilakukan dengan memvariasikan komponen seperti panjang lengan, bentuk pelampung, dan ketinggian poros terhadap permukaan air dengan nilai variasi yang ditunjukkan sebelumnya pada Tabel 3.6. Sebagai kajian awal, maka dalam eksperimen dilakukan menggunakan input gelombang reguler agar diperoleh hasil dalam batasan yang ideal. Sistem *direct mechanical drive system* menggunakan

konfigurasi gearbox dan flywheel untuk mentransmisikan gerakan translasi akibat gelombang yang menghasilkan putaran rendah menjadi putaran yang lebih tinggi agar menambah energi tersimpan pada *flywheel*. Putaran yang dihasilkan akan menghasilkan tegangan listrik yang nilainya diketahui melalui data logger sehingga dapat dihitung daya listrik yang dihasilkan. Nilai daya tersebut selanjutnya dikorelasikan dengan data gerakan *heave* pelampung dari sensor accelerometer. Korelasi ini bertujuan untuk mendapatkan parameter hidrodinamik pada setiap variasi sehingga dapat diketahui besar daya gelombang yang diserap. Kemudian dapat dihitung efisiensi DMDS-Oscillating Buoy WEC pada tiap konfigurasi sehingga diperoleh rekomendasi sistem yang paling optimal. Oleh karena itu, agar dalam analisa perhitungan diperoleh data yang valid maka terlebih dahulu dilakukan simulasi parameter hidrodinamik berbasis metode Ursell - Tasai dan divalidasi dengan grafik konstanta Lewis form yang dimuat di handbook "Dynamics of Marine Vehicles" karangan Bhattacharyya (1978). Selain itu, untuk mendapatkan konfigurasi sistem yang optimal juga dilakukan perbandingan daya output dengan parameter yang berpengaruh dalam eksperimen.

## 4.1. Pemodelan Sistem

Pada pemodelan sistem dilakukan secara numerik dan eksperimen khususnya untuk mendapatakan respon pelampung sebagai komponen pertama dalam menyerap daya gelombang yang dimunculkan dalam bentuk nilai massa tambah, redaman, kekakuan, dan RAO. Parameter hidrodinamik tersebut berguna sebagai parameter utama dalam menghitung efisiensi mekanis dari *DMDS–Oscillating Buoy* WEC. Parameter hidrodinamik tersebut diperoleh dari pemodelan karena saat eksperimen tidak dilakukan *decay test* karena keterbatasan instrumen dan durasi eksperimen.

# 4.1.1. Pemodelan Numerik dan Validasi

Pemodelan numerik dilakukan dengan sebuah program berbasis metode Ursell – Tasai yang dijalankan menggunakan *software* MATLAB 7.0. Parameter yang dimodelkan khususnya berupa respon pelampung pada *DMDS–Oscillating Buoy* WEC. Respon pelampung ini dijabarkan berupa nilai konstanta untuk mendapatkan nilai koefisien massa tambah, redaman, kekakuan, dan RAO yang dalam hal ini divalidasi dengan konstanta Lewis *form*. Tolak ukur keberhasilan program adalah jika galatnya kurang dari 10% sehingga menghasilkan grafik kurang lebih sama dengan grafik Lewis *form*. Jika program sudah berhasil maka akan dicoba dengan memasukkan input yang sesuai dengan eksperimen *DMDS– Oscillating Buoy* WEC untuk mendapatkan nilai koefisien massa tambah, redaman, kekakuan, dan RAO. Untuk nilai koefisien redaman dan RAO dapat digunakan untuk menghitung daya yang mampu diserap oleh pelampung *DMDS–Oscillating Buoy* WEC. Adapun pada Gambar 4.1 – 4.4 ditampilkan salah satu hasil validasi antara metode Ursell – Tasai dan konstanta Lewis *form*. Perbandingan yang dilakukan hanya konstanta massa tambah dan *amplitude ratio* pada  $\beta = 0.5 - 1$  dan  $\Psi = 0.4 - 4.4$ , karena hanya itu konstanta Lewis *form* yang tercantum di referensi *handbook Dynamics of Marine Vehicles* karya Rameswar Bhattacharyya (1978). Untuk grafik perbandingan lainnya dapat dilihat di Lampiran 3.



Gambar 4.1. Hasil Konstanta Massa Tambah "C" Berbasis Metode Ursell –
Tasai yang Dijalankan dengan MATLAB 7.0 dan Grafik Konstanta Lewis *Form*Tabel 4.1. Tabel MAPE Konstanta Massa Tambah di Beberapa Nilai Ψ

		1	,			
$\omega^2 B_n/2g$	<b>\Psi = 0.8</b>	$\Psi = 1.2$	Ψ=1.6	$\Psi = 2.8$	Ψ=3.6	Ψ=4.4
0.2	4.34%	1.51%	0.32%	0.48%	0.52%	0.68%
0.3	2.44%	5.72%	1.41%	2.05%	0.65%	0.18%
0.4	6.60%	6.38%	2.08%	1.94%	0.58%	0.70%
0.5	6.06%	7.02%	3.09%	2.06%	0.88%	0.37%
0.6	3.74%	5.77%	4.00%	2.68%	2.90%	1.51%
0.7	2.79%	6.23%	4.47%	2.24%	2.26%	0.32%
0.8	1.34%	3.84%	4.42%	2.17%	2.45%	0.45%

pada  $\beta = 0.8$ 

$\omega^2 B_n/2g$	<b>\Psi = 0.8</b>	Ψ=1.2	Ψ=1.6	$\Psi = 2.8$	Ψ=3.6	Ψ=4.4
0.9	0.80%	3.44%	4.93%	2.22%	2.62%	0.72%
1.0	1.05%	3.77%	4.94%	2.97%	1.87%	0.73%
1.1	1.13%	3.35%	4.63%	2.73%	1.83%	0.87%
1.2	0.80%	2.56%	3.80%	3.06%	1.84%	0.90%
1.3	1.01%	2.26%	2.63%	2.54%	2.37%	1.11%
1.4	0.84%	1.73%	2.26%	0.78%	2.30%	1.71%



**Gambar 4.2.** Komparasi Grafik Konstanta Massa Tambah "C" di Beberapa Nilai  $\Psi$  pada  $\beta = 0.8$ 

Kemudian untuk konstanta *amplitude ratio* dinotasikan dalam variabel  $\overline{A}$  ditunjukkan pada Gambar 4.3 sedangkan hasil komparasinya ditunjukkan pada Gambar 4.4.



**Gambar 4.3.** Hasil *Amplitude Ratio* (*Ā*) Berbasis Metode Ursell – Tasai yang Dijalankan dengan MATLAB 7.0 dan Grafik Konstanta Lewis *Form* 

$\omega^2 B_n/2g$	$\Psi = 0.8$	Ψ=1.2	Ψ=1.6	$\Psi = 2.8$	$\Psi = 3.6$	<b>Ψ</b> = 4.4
0	0.98%	1.47%	1.70%	1.96%	2.03%	2.06%
0.1	1.32%	0.21%	0.12%	0.36%	2.11%	3.47%
0.2	0.72%	3.84%	3.55%	2.01%	1.80%	3.42%
0.3	0.36%	2.02%	1.97%	2.68%	1.32%	2.22%
0.4	2.94%	0.94%	1.77%	0.94%	0.75%	1.11%
0.5	1.85%	0.92%	0.78%	2.86%	1.86%	1.25%
0.6	1.84%	0.80%	0.99%	2.68%	3.48%	2.58%
0.7	1.02%	1.00%	1.44%	0.82%	0.74%	0.75%
0.8	0.83%	0.17%	0.82%	1.24%	0.54%	0.86%
0.9	0.80%	0.08%	0.04%	1.24%	0.04%	0.75%
1.0	0.51%	0.37%	0.00%	0.17%	1.73%	0.96%
1.1	1.45%	0.38%	0.18%	0.31%	1.15%	0.71%
1.2	1.39%	1.41%	0.09%	0.53%	0.95%	0.70%
1.3	3.53%	2.79%	1.09%	0.11%	0.30%	0.18%
1.4	5.18%	4.05%	1.68%	0.85%	0.73%	0.83%

**Tabel 4.2.** Tabel MAPE  $\overline{A}$  di Beberapa Nilai  $\Psi$  pada  $\beta = 0.8$ 





Beberapa parameter dapat dijelaskan sebagai berikut:  $\beta$  merupakan rasio antara luasan tercelup ( $A_d$ ) dengan perpanjangan luasan total tercelup ( $A_t$ ). Sedangkan  $\Psi$  merupakan rasio antara panjang garis air pada bidang 2D ( $B_n$ ) dengan *draft* ( $h_0$ ). Area yang dianalisa ini merupakan area tampak samping dari bentuk pelampung yang digunakan. Secara lebih jelas, notasi parameter-parameter tersebut diilustrasikan seperti pada Gambar 4.5



**Gambar 4.5.** Ilustrasi Parameter  $\beta = A_d/A_t \operatorname{dan} \Psi = B_n/h_0$ 

Berdasarkan grafik antara metode Ursell – Tasai dan konstanta Lewis *form* baik untuk konstanta massa tambah maupun *amplitude ratio* menunjukkan hasil validasi dengan akurasi sangat tinggi menurut klasifikasi *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.3. Hal ini diartikan bahwa metode Ursell – Tasai yang dijalankan dengan MATLAB 7.0 dapat digunakan untuk mendapatkan grafik lain dengan nilai input  $\beta$  dan  $\Psi$  berbeda sesuai dengan kebutuhan.

No	Nilai MAPE	Akurasi
1	MAPE $\leq 10\%$	Tinggi
2	$10\% < MAPE \le 20\%$	Baik
3	$20\% < MAPE \le 50\%$	Dapat diterima
4	MAPE > 50%	Rendah

 Tabel 4.3. Tabel MAPE (Heizer dan Render, 2015)

## 4.1.2 Pemodelan Eksperimen

Dalam pemodelan eksperimen, parameter utama yang diskala adalah bentuk pelampung beserta dimensinya dan gelombang uji dengan skala 1:3.7. Skala tersebut mengacu pada pelampung APR WEC yang ditujukan agar diperoleh gambaran implementasi *DMDS–Oscillating Buoy* WEC dalam skala prototipe. Data gelombang uji juga mengacu pada *sea state* ketika *testing* APR WEC dan diambil dua *sea state* saja dikarenakan keterbatasan waktu eksperimen. Untuk gelombang uji diambil pada periode kurang dari 3 sekon dan dipilih periode uji 1.9 s dan 2.3 s. Nilai periode tersebut kemudian diskala sehingga diperoleh periode gelombang uji di laboratorium adalah 1 s dan 1.2 s. Untuk tinggi gelombang dipilih 0.85 m dan 0.9 m pada skala prototipe dimana nilai ini masih berada pada *range sea state* APR WEC. Jika nilai tersebut dikonversi ke skala laboratorium, maka menjadi 0.23 cm dan 0.25 cm. Namun berdasarkan hasil eksperimen, ternyata periode gelombang

tercatat adalah 0.93 s dan 1.12 s (dalam skala prototipenya adalah 1.8 s dan 2.2 s). Nilai tersebut masih dapat diterima karena dalam *range* periode kurang dari 3 sekon untuk skala prototipenya. Kemudian untuk tinggi gelombang tercatat adalah 0.135 m dan 0.145 m (dalam skala prototipenya adalah 0.5 m dan 0.55 m). Nilai ini juga masih dalam *range* tinggi gelombang pada *sea state* APR WEC. Untuk parameter massa pelampung tidak diketahui secara pasti dari data APR WEC, karena hanya menjelaskan massa total antara pelampung dan tuas yaitu sebesar 250 kg. Oleh karena itu, dilakukan asumsi bahwa lengan (tuas) pada APR WEC memiliki massa sekitar 1/5 dari massa total sehingga massa pelampung dapat dihitung sekitar 200 kg. Hasil skala massa pelampung tersebut secara realisasi juga mendekati perhitungan. Hasil penskalaan dan realisasi secara lengkap ditunjukkan pada Tabel 4.4.

Parameter	APR WEC	Faktor Skala	Kalkulasi	Realisasi (Eksperimen)	
Massa Pelampung (kg)	200	$\lambda^3$	3.948	3.815	
Diameter (m)	1.2	λ	0.324	0.325	
Lebar (m)	1.7	λ	0.46	0.45	
Periode (s)	1.9 dan 2.3	$\lambda^{1/2}$	1 dan 1.2	0.93 dan 1.12	
Tinggi Gelombang (m)	0.85 dan 0.9	λ	0.23 dan 0.25	0.135 dan 0.145	

Tabel 4.4. Hasil Penskalaan dan Realisasi Uji DMDS-Oscillating Buoy WEC

#### 4.2. Hasil Kalibrasi Instrumen Pengukuran

#### **4.2.1 Gelombang Tercatat**

Pada eksperimen, gelombang input sangat penting diperhatikan karena berpengaruh terhadap *available power*, sehingga kalibrasi *probe* penting dilakukan untuk mendapatkan data gelombang yang representatif. Gelombang yang terbentuk di kolam uji merupakan hasil input gelombang pada komputer. Sistem perekaman data menggunakan frekuensi 50 Hz sehingga dalam satu detik akan merekam 25 data titik gelombang yang tercatat di *probe*. Jika periode yang diinputkan sebesar 1 detik, maka pada 25 data titik gelombang yang tercatat akan menghasilkan 1 buah gelombang. Kalibrasi *probe* dilakukan menggunakan metode Weintrit (2017) yang memiliki prosedur yaitu:

- Menginputkan nilai tinggi dan periode gelombang
- Menentukan nilai target terukur
- Mencatat tinggi gelombang terukur
- Menghitung nilai error yang terjadi
- Perulangan pada input yang berbeda-beda

Hasil perekaman gelombang pada beberapa nilai kecuraman gelombang selama eksperimen pada tiap variasi ditunjukkan pada Tabel 4.5.

No		Inpu	t	Pembacaan Probe			
INU	H	Т	$H/gT^2$	H	Т	$H/gT^2$	
1	0.20	1.2	0.014	0.12	1.1	0.010	
2	0.23	1.2	0.016	0.13	1.1	0.011	
3	0.25	1.2	0.018	0.14	1.1	0.012	
4	0.20	1	0.020	0.13	0.9	0.016	
5	0.23	1	0.023	0.15	0.9	0.018	
6	0.25	1	0.025	0.16	0.9	0.019	
7	0.20	0.8	0.032	0.11	0.7	0.021	
8	0.23	0.8	0.037	0.12	0.7	0.022	
9	0.25	0.8	0.040	0.12	0.7	0.023	

 Tabel 4.5. Hasil Perekaman Gelombang Eksperimen

Berdasarkan Tabel 4.5 dapat ditunjukkan bahwa antara input gelombang dengan gelombang tercatat memiliki perbedaan yang cukup signifikan khususnya pada hasil tinggi gelombang terukur. *Error* rata-rata untuk nilai tinggi gelombang adalah sekitar 41% sedangkan untuk periode gelombang sekitar 7%. Kondisi ini disebabkan oleh *wave maker* yang digunakan sudah mengalami penurunan *rating*. Jika diteliti lebih jauh terlihat bahwa *wave maker* lebih optimal untuk pembangkitan gelombang dengan ketinggian gelombang yang rendah. Hal ini dapat ditunjukkan pada pembangkitan tinggi gelombang 0.2 m memiliki selisih yang lebih kecil terhadap nilai output dibandingkan tinggi gelombang 0.23 m dan 0.25 m. Selain itu, pembangkitan pada frekuensi yang terlalu tinggi (*T* kecil), maka hasil pengukuran gelombang menjadi semakin tidak akurat. Hal ini dikarenakan motor *wave maker* akan bekerja sesuai input frekuensi yang diberikan, dengan kondisi motor *wave maker* yang sudah tua, maka untuk membangkitkan gelombang dengan frekuensi tinggi akan menjadikan motor kurang stabil. Namun dari data yang diperoleh tersebut, untuk nilai kecuraman gelombang yang diperoleh telah sesuai mengikuti

*trend* dari input *wave maker* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.6. Terkait hasil ini maka pada analisa selanjutnya dilakukan menggunakan data *real* gelombang hasil pembacaan *probe*.



Gambar 4.6. Trend Kecuraman Gelombang antara Input dan Pembacaan Probe

Kemudian untuk gelombang yang diujikan pada model, diperoleh rata-rata tinggi gelombang 0.135 m pada input 0.23 m dan 0.145 pada input 0.25 m. Sedangkan pada periode gelombang diperoleh 0.93 s pada input 1 s dan 1.12 s pada input 1.2 s.

## 4.2.2 Kalibrasi Data Logger

Pada kalibrasi *data logger* ini bertujuan untuk mendapatkan nilai tegangan yang akurat sesuai dengan kondisi yang terjadi. Metode kalibrasi *data logger* ini yaitu:

- Memberi suplai *data logger* dengan tegangan DC
- Menggunakan modul STML100 dan Voltmeter dengan output tegangan 5
   V sebagai referensi output dengan konfigurasi seperti Gambar 4.7.



Gambar 4.7. Konfigurasi Rangkaian untuk Kalibrasi Data Logger

- Melihat tegangan output di *board* Arduino
- Mencari faktor skala pembacaan dan diinputkan ke *coding* Arduino *data logger* yaitu dengan rumus:

$$V_s = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \times V_{ADC} \times \text{Skala}$$
 (Nilai  $R_1 = 33 \text{ ohm}, R_2 = 100 \text{ ohm})$ 

Menggunakan cara *trial and error* maka diperoleh faktor skala yang sesuai adalah 0.56. Proses kalibrasi dilakukan dengan statis dan dinamis. Kalibrasi statis dilakukan dengan cara memberikan beberapa nilai tegangan input tertentu dan mengecek nilai tegangan output yang seharusnya muncul pada *data logger*. Pemberian tegangan ini dilakukan dari input tegangan rendah kemudian ditingkatkan bertahap hingga tegangan yang tinggi. Sedangkan kalibrasi dinamis dilakukan dengan cara memberikan suplai tegangan tertentu dari sumber non linier berupa motor DC yang dioperasikan sebagai generator kemudian dibandingkan hasilnya dengan sensor INA219 I2C.

Ketepatan pengukuran pada kalibrasi dinamik sangat penting dicapai pada tingkat akurasi yang tinggi dikarenakan eksperimen *DMDS–Oscillating Buoy* WEC memiliki karakteristik yang sangat dinamis sebagai dampak dari input gelombang. Selain itu, output yang diukur merupakan tegangan generator yang dihasilkan melalui mekanisme rotasi sehingga dapat dipastikan bahwa nilai tegangan yang dihasilkan sangat fluktuatif. Adapun hasil kalibrasi *data logger* ditunjukkan pada Gambar 4.8 dan 4.9.



Gambar 4.8. Hasil Kalibrasi Statis



Gambar 4.9. Hasil Kalibrasi Dinamis

Berdasarkan kalibrasi statis dan dinamis, *trend* grafik menunjukkan tingkat akurasi yang sangat baik. Hal ini diperkuat oleh perhitungan *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) dimana untuk kalibrasi statis memiliki nilai MAPE 2.2% dan kalibrasi dinamis sebesar 4.6%.

## 4.2.3 Kalibrasi Sensor Accelerometer

Komponen selanjutnya yang dikalibrasi adalah sensor accelerometer dengan tipe MPU6050 GY 521. Sensor ini penting untuk mengukur sudut yang terbentuk antara tuas dan muka air sehingga dapat diketahui perubahan sudut yang terjadi selama eksperimen. Perubahan sudut ini dapat dikonversi menjadi jarak yang ditempuh selama pelampung berosilasi (*displacement*) sehingga berguna untuk menentukan parameter hidrodinamik. Sudut yang dikonversi utamanya adalah sudut *pitch*, yaitu gerak rotasi pada sumbu *y* yang merepresentasikan gerakan naik turun pelampung. Secara umum sensor accelerometer dapat dikalibrasi melalui *code* Arduino Uno dengan langkah-langkah berikut:

- Kalibrasi berbasis *coding* di *library* Arduino sehingga untuk memulai kalibrasi, harus membuka *library* yang bernama IMU\_Zero
- Mengupload *code* ke *hardware* Arduino Uno yang terhubung dengan sensor MPU6050 (tunggu hingga proses upload selesai)
- Menyalin nilai offset yang dihasilkan
- Memasukkan nilai offset ke library lain yang bernama MPU6050\_DMP6

- Mengupload kembali code ke hardware Arduino
- Setelah selesai, membuka serial number Arduino
- Muncul tampilan pengukuran secara *realtime*
- Sensor telah terkalibrasi

Setelah *setting* kalibrasi sensor *accelerometer* di Arduino Uno, selanjutnya sensor diuji dan dikalibrasi secara manual dengan acuan kemiringan tertentu. Kemiringan ini diatur sesuai dengan perkiraan sudut yang dibentuk antara tuas terhadap MWL. Perkiraan ini dilakukan menggunakan perhitungan trigonometri. Adapun hasil pengujian dan kalibrasi manual sensor *accelerometer* ditunjukkan pada Tabel 4.6.

Konfigurasi	Panjang Tuas	Jarak Poros	Sudut Perhitungan	Sudut Terbaca Sensor	Error (%)
A1	1.00	0.485	29.01	28.68	1.14
B1	1.15	0.495	25.50	25.32	0.71
C1	0.90	0.475	31.86	31.85	0.03
D1	0.90	0.205	13.17	14.06	6.76
E1	1.00	0.215	12.42	12.67	2.01
F1	1.15	0.225	11.28	11.17	0.98
		MAP	Ē		1.94

 Tabel 4.6. Pengujian dan Kalibrasi Manual Sensor Accelerometer

Berdasarkan hasil pengujian dan kalibrasi manual, sensor juga menunjukkan akurasi yang tinggi karena memiliki nilai MAPE sebesar 1.94%. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa sensor *accelerometer* ini dapat digunakan dalam eksperimen.

## 4.3 Analisa Hidrodinamik

Analisa secara hidrodinamik bertujuan untuk mendapatkan karakteristik gerakan pelampung ketika diberi gaya gelombang eksitasi sehingga dapat diperoleh parameter hidrodinamik yang berguna dalam perhitungan daya yang diserap oleh mekanisme awal *DMDS–Oscillating Buoy* WEC. Hasil daya terserap dapat digunakan untuk menentukan efisiensi sistem mekanik dari sisi input. Parameter hidrodinamik berupa koefisien massa tambah, redaman, dan kekakuan umumnya

diperoleh dari *decay test* sedangkan untuk *heave amplitude* diperoleh dari data osilasi pelampung yang tercatat oleh sensor *accelerometer*. Data osilasi ini berupa data sudut pada derajat kebebasan *pitch* yang kemudian diolah menjadi data *displacement* pelampung menggunakan persamaan matematis dan selanjutnya dapat diperoleh nilai *heave amplitude* pelampung. Analisa tersebut dilakukan pada setiap variasi eksperimen dengan membandingkan antara pelampung berbentuk silinder dan pelampung berbentuk balok. Penambahan pembanding dari pelampung balok bertujuan untuk melihat efisiensi sistem mekanik jika diberikan dimensi dan bentuk pelampung yang berbeda. Parameter hidrodinamik yang dihasilkan dari eksperimen juga dibandingkan dengan parameter hidrodinamik hasil simulasi MATLAB 7.0 yang sebelumnya telah divalidasi. Selanjutnya, perbandingan antara pelampung silinder (A1, B1, C1, D1, E1, dan F1) dan balok (A2, B2, C2, D2, E2, dan F2) dilakukan dengan membandingkan beberapa aspek seperti perubahan *displacement*, parameter hidrodinamik, daya terserap, efisiensi penyerapan pelampung, dan pengaruh parameter eksperimen.

### 4.3.1 Perbandingan Perubahan Sudut dan Amplitudo Gerakan Heave

Pelampung yang bergerak naik turun akibat gelombang, akan menghasilkan perubahan sudut antara panjang tuas dan ketinggian poros. Perubahan sudut tersebut merepresentasikan perubahan gerakan *heave* pelampung dalam bentuk *displacement* pelampung. Adapun karakter perubahan sudut hasil eksperimen ditunjukkan pada Gambar 4.10 dan 4.11.



Gambar 4.10. Perubahan Sudut pada Pelampung Silinder



Gambar 4.11. Perubahan Sudut pada Pelampung Balok

Berdasarkan Gambar 4.10 dan 4.11, secara umum baik pelampung silinder maupun balok memberikan urutan perubahan sudut yang sama dengan urutan sudut terbesar hingga terkecil pada variasi C-A-B-D-E-F. Urutan ini sesuai dengan perhitungan secara trigonometri yang dipengaruhi variabel panjang tuas dan jarak poros model terhadap MWL. Nilai perubahan sudut tersebut juga sebagian besar hampir sama pada semua inputan kecuraman gelombang yang diberikan, namun yang membedakan adalah panjang osilasi dalam satu periode yang bergantung input periode gelombang. Semakin besar periode gelombang yang diinputkan, maka semakin lebar rentang antara satu puncak ke puncak lain. Pada pelampung silinder, nilai sudut rata-rata terhadap MWL yang terbentuk ( $\theta$ ) adalah 28.74° (A1), 25.49° (B1), 31.94° (C1), 14.19° (D1), 12.71° (E1), dan 11.20° (F1). Sedangkan pada pelampung balok, nilai sudut rata-rata yang terbentuk adalah 37.40° (A2), 33.02° (B2), 39.10° (C2), 18.94° (D2), 17.77° (E2), dan 16.33° (F2). Besar sudut yang terbentuk ini dipengaruhi oleh panjang tuas dan tinggi model ( $H_{TOT}$ ). Panjang tuas yang diberikan yaitu 1 m (A dan E), 1.15 m (B dan F), dan 0.9 m (C dan D). Tinggi model yang digunakan yaitu 1.3 m (A, B, C) dan 1 m (E, D, F).

Pada tinggi model yang sama, semakin panjang tuas yang digunakan, maka sudut yang terbentuk akan semakin kecil. Kemudian dapat dilihat pula bahwa pada tinggi model 1.3 m (jarak poros ke MWL,  $H_{SF} = 0.67$  m), diperoleh sudut yang lebih besar dibandingkan tinggi model 1 m (jarak poros ke MWL,  $H_{SF} = 0.37$  m) dengan

tuas terpanjang pada tinggi model 1.3 m masih memiliki sudut yang lebih besar dibandingkan tuas terpendek pada tinggi model 1 m.

Selain itu dapat dilihat juga bahwa pada variasi yang sama, pelampung balok memberikan sudut yang lebih besar dibandingkan pelampung silinder. Hal ini dipengaruhi oleh perbedaan nilai tinggi permukaan yang berbeda ( $H_{NET}$ ) seperti yang diilustrasikan pada Gambar 4.12. Nilai  $H_{NET}$  yang besar akan menghasilkan sudut yang besar pula. Perbedaan nilai  $H_{NET}$  ini utamanya disebabkan oleh perbedaan tinggi pelampung dimana pada pelampung silinder (D) sama dengan nilai diameter, sedangkan pada balok sama dengan tinggi balok ( $t_b$ ). Untuk nilai draft ( $h_0$ ) cukup terdapat perbedaan karena meskipun massa pelampung yang digunakan sama, namun karena *centre of gravity* (CoG) yang berbeda, maka draft yang dihasilkan juga berbeda. Nilai CoG pelampung balok lebih merata dikarenakan distribusi massa pada permukaan yang sama dibandingkan pelampung silinder. Nilai draft juga akan bertambah seiring pertambahan panjang dan massa tuas yang memperbesar volume air yang dipindahkan.



Gambar 4.12. Sudut yang Dihasilkan pada Variasi Pelampung Silinder dan Balok

Dari grafik osilasi yang diperoleh pada semua variasi, selanjutnya dapat dihitung amplitudo gerakan *heave* ( $z_a$ ) pada pelampung. Metode perhitungannya adalah berbasis persamaan trigonometri dari nilai panjang lengan, ketinggian poros terhadap muka air dan sudut yang terbentuk. Adapun hasil perhitungannya ditunjukkan pada Tabel 4.7 dan Gambar 4.13.

**Tabel 4.7.** Hasil Perhitungan Nilai Amplitudo Gerakan Heave (dalam meter)

$H/gT^2$	A1	<b>B1</b>	C1	D1	E1	F1	A2	B2	C2	D2	E2	F2
0.011	0.0559	0.0549	0.0569	0.0560	0.0551	0.0542	0.0627	0.0622	0.0634	0.0627	0.0621	0.0616
0.012	0.0600	0.0590	0.0611	0.0602	0.0591	0.0582	0.0674	0.0668	0.0681	0.0673	0.0667	0.0662
0.016	0.0477	0.0468	0.0489	0.0479	0.0469	0.0461	0.0512	0.0489	0.0530	0.0522	0.0502	0.0477
0.017	0.0512	0.0502	0.0525	0.0515	0.0504	0.0495	0.0577	0.0555	0.0595	0.0586	0.0567	0.0542



Gambar 4.13. Amplitudo Gerakan Heave (za) pada Semua Variasi

Berdasarkan Gambar 4.13 terlihat jelas bahwa amplitudo gerakan *heave* memiliki nilai yang besar pada frekuensi gelombang yang lebih kecil ( $H/gT^2 =$ 0.011 dan 0.012). Hal ini dapat diartikan bahwa pelampung dapat bergerak dengan simpangan yang lebih besar akibat cukup banyaknya waktu untuk mencapai simpangan tersebut. Pada frekuensi gelombang yang semakin besar (periodenya semakin kecil), ketika pelampung berosilasi dengan simpangan tertentu akibat gelombang maka osilasi tersebut cenderung cepat sehingga tidak mampu mencapai simpangan maksimalnya.

Kemudian, tinggi gelombang juga berpengaruh pada besarnya amplitudo gerakan *heave*. Seperti pada kecuraman gelombang 0.012 (tinggi gelombang 0.145 m) memiliki nilai amplitudo gerakan *heave* yang lebih besar dibandingkan kecuraman gelombang 0.011 (tinggi gelombang 0.135 m) pada frekuensi gelombang yang sama dan hal ini berlaku juga untuk kecuraman gelombang 0.016 dan 0.017. Hal yang menarik adalah perbandingan antara kecuraman gelombang 0.011 dengan tinggi gelombang 0.135 m memiliki amplitudo gerakan *heave* lebih besar dibandingkan kecuraman gelombang 0.016 yang memiliki tinggi gelombang 0.145 m. Fenomena ini dapat diartikan bahwa periode gelombang memiliki pengaruh yang lebih dominan terhadap amplitudo gerakan *heave* dibandingkan tinggi gelombang. Dominasi ini diperkirakan karena pengaruh parameter hidrodinamik pelampung seperti koefisien massa tambah, koefisien redaman, dan koefisien kekakuan.

## 4.3.2 Parameter Hidrodinamik

Gelombang yang diinputkan akan menjalar dan memberikan gaya ke pelampung *DMDS–Oscillating Buoy* WEC, sehingga pelampung akan mengalami pergerakan dinamis. Mekanisme ini diasumsikan linier, sehingga gerakan dinamis pelampung dianggap sebagai hasil superposisi antara gaya gerakan osilasi harmonik pelampung pada kondisi air tenang dan gaya eksitasi gelombang pada *restrained body*. Gaya gerakan osilasi harmonik pelampung pada kondisi air tenang ini disebut dengan gaya hidromekanik, sedangkan gaya eksitasi gelombang pada *restrained body* disebut dengan gaya beban gelombang (*wave load*). Total gaya yang dihasilkan ini kemudian dikonversi menjadi daya input pada *DMDS–Oscillating Buoy* WEC. Secara sederhana, ilustrasi gerakan pelampung akibat gelombang ditunjukkan pada Gambar 4.14.



Gambar 4.14. Dinamika Struktur Akibat Gerakan Fluida

Gaya hidromekanik akan memberikan pengaruh seperti *mass-springdamper system* atau sistem osilasi orde 1. Sistem ini berupa rangkaian sistem pegas sederhana dalam satu derajat kebebasan dengan terdapat suatu gaya eksternal yang mengenainya. Sistem ini sangat dipengaruhi oleh parameter berupa koefisien massa tambah (*added mass coefficient*), koefisien redaman (*damping coefficient*), dan koefisien kekakuan/pengembali (*stiffness/restoring coefficient*). Untuk mendapatkan parameter tersebut pada umumnya dilakukan *decay test*. Namun dikarenakan keterbatasan waktu dalam eksperimen penelitian ini, maka *decay test* tidak dilakukan, sehingga parameter hidrodinamik diperoleh dari simulasi yang telah tervalidasi. Pada simulasi ditekankan pada nilai konstanta *C* (untuk menghitung massa tambah) dan  $\overline{A}$  (untuk menghitung redaman) yang diperoleh. Konstanta tersebut digunakan sebagai faktor pengali nilai parameter hidrodinamik sesungguhnya melalui perhitungan yang melibatkan beberapa variabel. Perhitungan ini dilakukan menggunakan metode tabel *strip theory* seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.8 dan 4.9.

Variasi	р	<b>1</b>	4 .	$\omega^2 \mathbf{P}/2\sigma$	Ψ	βn	C	р	$a = 0.125C_0 = P P^2$
variasi	Dn	no	Ad	<i>w</i> <sup>-</sup> <i>Dn</i> /2g	$(B_n/h_0)$	$(A_d / (B_n \ge h_0))$	L	D	$a = 0.125 C \rho \pi B B n^{-1}$
A1	0.318	0.13	0.0310	0.5108	2.449	0.7485	1.081	0.45	19.37
B1	0.322	0.14	0.0342	0.5163	2.299	0.7587	1.049	0.45	19.21
C1	0.314	0.12	0.0278	0.5032	2.614	0.7392	1.118	0.45	19.44
D1	0.316	0.125	0.0294	0.5073	2.530	0.7438	1.099	0.45	19.42
E1	0.320	0.135	0.0326	0.5138	2.373	0.7535	1.065	0.45	19.30
F1	0.323	0.145	0.0358	0.5183	2.228	0.7642	1.036	0.45	19.11
A2	0.34	0.085	0.0289	0.5454	4.000	1	1.395	0.45	28.50
B2	0.34	0.095	0.0323	0.5454	3.579	1	1.390	0.45	28.39
C2	0.34	0.075	0.0255	0.5454	4.533	1	1.407	0.45	28.75
D2	0.34	0.08	0.0272	0.5454	4.250	1	1.400	0.45	28.60
E2	0.34	0.09	0.0306	0.5454	3.778	1	1.392	0.45	28.43
F2	0.34	0.1	0.034	0.5454	3.400	1	1.389	0.45	28.38
A1	0.318	0.13	0.0310	0.7392	2.449	0.7485	0.968	0.45	17.34
B1	0.322	0.14	0.0342	0.7472	2.299	0.7587	0.950	0.45	17.39
C1	0.314	0.12	0.0278	0.7282	2.614	0.7392	0.991	0.45	17.24
D1	0.316	0.125	0.0294	0.7341	2.530	0.7438	0.979	0.45	17.30
E1	0.320	0.135	0.0326	0.7436	2.373	0.7535	0.958	0.45	17.37
F1	0.323	0.145	0.0358	0.7501	2.228	0.7642	0.944	0.45	17.41
A2	0.34	0.085	0.0289	0.7893	4.000	1	1.320	0.45	26.97
B2	0.34	0.095	0.0323	0.7893	3.579	1	1.336	0.45	27.30
C2	0.34	0.075	0.0255	0.7893	4.533	1	1.312	0.45	26.80
D2	0.34	0.08	0.0272	0.7893	4.250	1	1.315	0.45	26.87
E2	0.34	0.09	0.0306	0.7893	3.778	1	1.327	0.45	27.12
F2	0.34	0.1	0.034	0.7893	3.400	1	1.347	0.45	27.51

Tabel 4.8. Parameter Hidrodinamik Simulasi untuk Koefsien Massa Tambah

Tabel 4.9. Parameter Hidrodinami	k Simulasi untuk	Koefisien	Redaman
----------------------------------	------------------	-----------	---------

Variaci	R	ha	Δ.	$\omega^2 R /2a$	Ψ	βn	Ā	R	$h = \alpha a^2 \overline{A}^2 R / \omega^3$
v al lasi	$D_n$	110	Ald	$U D_n/2g$	$(\boldsymbol{B}_n/\boldsymbol{h}_0)$	$(A_d / (B_n \ge h_0))$	А	Б	<i>v – pg A B/w</i>
A1	0.318	0.13	0.0310	0.5108	2.449	0.7485	0.6090	0.45	90.97
B1	0.322	0.14	0.0342	0.5163	2.299	0.7587	0.6034	0.45	89.31
C1	0.314	0.12	0.0278	0.5032	2.614	0.7392	0.6114	0.45	91.68
D1	0.316	0.125	0.0294	0.5073	2.530	0.7438	0.6106	0.45	91.44
E1	0.320	0.135	0.0326	0.5138	2.373	0.7535	0.6066	0.45	90.25
F1	0.323	0.145	0.0358	0.5183	2.228	0.7642	0.5994	0.45	88.13
A2	0.34	0.085	0.0289	0.5454	4.000	1	0.610	0.45	91.38
B2	0.34	0.095	0.0323	0.5454	3.579	1	0.593	0.45	86.31
C2	0.34	0.075	0.0255	0.5454	4.533	1	0.627	0.45	96.51
D2	0.34	0.08	0.0272	0.5454	4.250	1	0.619	0.45	93.94
E2	0.34	0.09	0.0306	0.5454	3.778	1	0.602	0.45	88.83
F2	0.34	0.1	0.034	0.5454	3.400	1	0.585	0.45	83.81

Variasi	B <sub>n</sub>	$h_0$	$A_d$	$\omega^2 B_n/2g$	$\frac{\Psi}{(B_n/h_0)}$	$\frac{\beta_n}{(A_d/(B_n \ge h_0))}$	Ā	B	$b = \rho g^2 \bar{A}^2 B / \omega^3$
A1	0.318	0.13	0.0310	0.7392	2.449	0.7485	0.7680	0.45	83.11
B1	0.322	0.14	0.0342	0.7472	2.299	0.7587	0.7538	0.45	80.06
C1	0.314	0.12	0.0278	0.7282	2.614	0.7392	0.7777	0.45	85.22
D1	0.316	0.125	0.0294	0.7341	2.530	0.7438	0.7735	0.45	84.28
E1	0.320	0.135	0.0326	0.7436	2.373	0.7535	0.7615	0.45	81.70
F1	0.323	0.145	0.0358	0.7501	2.228	0.7642	0.7450	0.45	78.19
A2	0.34	0.085	0.0289	0.5454	4.000	1	0.744	0.45	77.91
B2	0.34	0.095	0.0323	0.5454	3.579	1	0.711	0.45	71.24
C2	0.34	0.075	0.0255	0.5454	4.533	1	0.776	0.45	84.88
D2	0.34	0.08	0.0272	0.5454	4.250	1	0.760	0.45	81.36
E2	0.34	0.09	0.0306	0.5454	3.778	1	0.727	0.45	74.53
F2	0.34	0.1	0.034	0.5454	3.400	1	0.695	0.45	68.03

Jika Tabel 4.8 dibuat grafik maka menghasilkan Gambar 4.16.



Gambar 4.15. Nilai Koefisien Massa Tambah pada Semua Variasi

Berdasarkan Gambar 4.15, nilai koefisien massa tambah pada semua variasi mengalami penurunan seiring pertambahan frekuensi gelombang ( $\omega$ ). Pada semua kecuraman gelombang, koefisien massa tambah yang dihasilkan pelampung silinder berkisar antara 17.24 – 19.44 kg dan pelampung balok sebesar 26.8 – 28.75 kg. Pertambahan kecuraman gelombang ( $H/gT^2$ ) tidak terlalu berpengaruh pada massa tambah selama frekuensi gelombang tetap dan amplitudo gelombang yang besar. Namun, frekuensi gelombang lebih berpengaruh karena koefisien massa tambah berbanding terbalik dengan kuadrat frekuensi gelombang seperti yang ditunjukkan pada persamaan *force oscillation test* sebagai berikut:

$$a = \frac{c - \frac{F_a}{z_a} \cos \varepsilon_{F_z}}{\omega^2} - m \tag{4.1}$$

Selain frekuensi gelombang, variabel yang sangat berpengaruh pada massa tambah adalah massa dari benda itu sendiri (m) yang dipengaruhi oleh massa jenis dan volume benda tersebut.

Pada kecuraman gelombang 0.011 (memiliki nilai H = 0.135 m) dan 0.012 (memiliki nilai H = 0.145 m) frekuensi gelombang memiliki nilai yang sama yaitu 5.61 rad/s (T = 1.12 s) sedangkan pada kecuraman gelombang 0.016 (memiliki nilai H = 0.135 m) dan 0.017 (memiliki nilai H = 0.145 m) memiliki frekuensi gelombang 6.76 rad/s (T = 0.93 s). Dari nilai frekuensi gelombang tersebut dengan massa yang tetap, dapat dilihat bahwa pada frekuensi gelombang yang kecil cenderung menghasilkan massa tambah yang besar. Namun hubungan ini terdapat batasan tertentu utamanya terkait pengaruh konstanta massa tambah. Sebagai contoh grafik massa tambah silinder horizontal dengan rasio  $B_n/h_0 = 2$  seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.16. Pada grafik tersebut terdapat konstanta massa tambah C yang dibandingkan dengan konstanta frekuensi ( $\omega^2 B_n/2g$ ). Pada konstanta frekuensi yang kecil, konstanta massa tambah akan semakin besar, namun pada konstanta frekuensi 1, konstanta massa tambah mengalami peningkatan yang mempengaruhi besar massa tambah.



Gambar 4.16. Konstanta Massa Tambah pada Silinder Horizontal (Chen and Christensen, 2016)

Selain faktor frekuensi, nilai koefisien massa tambah juga dipengaruhi oleh *draft*. Hal ini dikarenakan pada setiap variasi memiliki nilai *draft* yang berbeda

meskipun perbedaannya kecil. Perbedaan nilai draft antar variasi ini disebabkan oleh pertambahan massa lengan dimana pada variasi dengan lengan terpanjang akan memberikan nilai draft yang lebih besar dibandingkan variasi dengan lengan terpendek. Namun, karena perbedaan draft yang tidak signifikan maka nilai massa tambah antar variasi juga tidak berbeda signifikan. Perbedaan draft yang kecil akan menghasilkan nilai  $A_d$  yang kecil pula sehingga nilai C untuk semua variasi tidak berbeda signifikan. Namun perbedaan yang signifikan terjadi ketika berbeda pada bentuk pelampung dimana pelampung balok menghasilkan massa tambah yang lebih besar di bandingkan pelampung silinder. Hal ini dikarenakan pertama adalah pada pelampung balok memiliki draft yang lebih kecil dibandingkan pelampung silinder dimana *draft* yang kecil cenderung memberikan C yang besar. Meskipun memiliki massa yang sama namun nilai draft yang dihasilkan berbeda dikarenakan perbedaan distribusi massa dan centre of gravity (CoG). Kedua adalah karakteristik yang unik antara bentuk pelampung ini adalah, pada pelampung silinder jika draft semakin kecil maka nilai massa tambah terkadang lebih besar dan terkadang lebih kecil antar variasi. Hal ini dikarenakan kombinasi perkalian antara C dan kuadrat  $B_n$  yang berbeda-beda maka menghasilkan massa tambah yang berbeda-beda pula. Sedangkan pada pelampung balok, semakin kecil nilai draft maka massa tambah semakin besar. Hal ini dikarenakan nilai draft kecil menghasilkan nilai C yang besar dan didukung oleh nilai kuadrat  $B_n$  yang sama untuk semua variasi.

Selanjutnya, bentuk pelampung ini juga sangat berpengaruh pada *water plane area*. Baik pada pelampung balok maupun silinder memiliki bentuk *water plane area* yang sama, yaitu persegi panjang. *Water plane area* ini sangat menentukan nilai koefisien kekakuan yang dihasilkan. Pada pelampung balok, *water plane area* akan tetap pada semua variasi dengan luas  $0.153 \text{ m}^2$  (p = 0.45 m, l = 0.18 m). Hal ini dikarenakan panjang dan lebar balok tetap sesuai bentuk benda sehingga tidak terpengaruh oleh perubahan *draft*. Luas tersebut akan memberikan koefisien kekakuan yang konstan sebesar 1500.93 kg/s<sup>2</sup>. Di sisi lain, pada pelampung silinder luas *water plane area* akan berubah seiring perubahan *draft*. Hal ini dikarenakan nilai *draft* berpengaruh pada lebar tembereng lingkaran sehingga dihasilkan koefisien kekakuan sebesar 1384.77 – 1426.37 kg/s<sup>2</sup>. Jika nilai lebar tembereng sama dengan diameter lingkaran, maka akan menghasilkan luas

*water plane* area maksimum dengan nilai sebesar 0.1425 m<sup>2</sup>. Luas ini akan memberikan koefisien kekakuan maksimum sebesar 1435 kg/s<sup>2</sup>. Secara jelas, koefisien kekakuan baik pada pelampung balok maupun pelampung silinder ditunjukkan pada Gambar 4.17.





Parameter hidrodinamik berupa koefisien massa tambah dan koefisien kekakuan dapat digunakan untuk mencari koefisien redaman kritis ( $b_{cr}$ ) dan frekuensi natural ( $\omega_n$ ) dari pelampung dengan persamaan:

$$b_{cr} = 2\sqrt{(m+a)c}$$
  $\omega_n = \sqrt{\frac{c}{m+a}}$  (m = massa pelampung) (4.2)

Selain itu dengan nilai koefisien redaman yang telah dihitung pada Tabel 4.9 juga dihasilkan rasio redaman ( $\kappa$ ) yang menentukan karakteristik redaman yang dialami pelampung. Berdasarkan perhitungan, diperoleh bahwa nilai rasio redaman ini memiliki harga kurang dari 1 ( $\kappa < 1$ ). Berdasarkan kriteria sistem osilasi, hasil ini dapat dikategorikan sebagai sistem kurang teredam (*under damped*). Karakteristik sistem ini juga ditandai dengan adanya lonjakan amplitudo saat gelombang pertama kali berpropagasi melewati pelampung kemudian amplitudo tersebut semakin mengecil hingga pada fase *steady state* akibat adanya redaman (Gambar 4.18). Fase lonjakan tersebut merupakan kondisi transien. Hal ini sesuai dengan eksperimen fisik yang dilakukan dimana diketahui pula bahwa dalam pengamatan, pelampung mengalami lonjakan amplitudo saat gelombang pertama kali mengenai pelampung kemudian berangsur-angsur bergerak mengikuti gelombang.



**Gambar 4.18.** Sistem Osilasi *Underdamped* pada Semua Variasi pada  $H/gT^2 = 0.012$ 

Kondisi transien pada semua variasi baik pada pelampung silinder maupun pelampung balok memiliki nilai yang berdekatan. Hal ini dikarenakan massa kedua pelampung sama dan perbedaan *draft* yang diberikan pada tiap variasi juga memiliki selisih yang kecil. Selanjutnya, untuk koefisien redaman yang dihitung pada Tabel 4.9 ditampilkan dalam bentuk grafik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.19.



Gambar 4.19. Koefisien Redaman pada Semua Variasi

Koefisien redaman ini merupakan koefisien hidrodinamik yang sangat menentukan perolehan daya yang mampu diserap pelampung dalam mekanisme *Power Take-Off* (PTO). Besar koefisien redaman yang dihasilkan adalah 78.19 –

91.68 kg/s untuk pelampung silinder dan 68.03 - 96.51 kg/s untuk pelampung balok. Pada perhitungan ini, koefisien redaman *Power Take-Off* (*b<sub>PTO</sub>*) akibat komponen *DMDS–Oscillating Buoy* WEC diabaikan sehingga diasumsikan bahwa koefisien redaman untuk PTO sama dengan koefisien redaman hidrodinamik. Pada frekuensi gelombang 5.61 rad/s (T = 1.12 s) koefisien redaman memiliki nilai tertinggi pada tiap variasi yang sama. Hal ini diartikan bahwa pelampung menyerap daya dengan baik pada frekuensi gelombang tersebut yang terbukti sesuai dengan persamaan *forced oscillation test*:

$$b = \frac{\frac{F_a}{z_a} \sin \varepsilon_{F_z}}{\omega}$$
(4.3)

Koefisien redaman berbanding terbalik dengan frekuensi gelombang sehingga semakin besar frekuensi maka koefisien redaman yang dihasilkan akan menurun. Selain itu terlihat bahwa pada kode variasi yang sama, koefisien redaman yang dihasilkan pelampung balok lebih besar dibandingkan pelampung silinder. Hal ini dikarenakan koefisien redaman berbanding lurus dengan koefisien massa tambah dan koefisien kekakuan. Pada analisa sebelumnya telah dihasilkan bahwa koefisien massa tambah dan koefisien kekakuan dari pelampung balok lebih besar dibandingkan pelampung silinder sehingga sesuai persamaan sistem osilasi orde 1, maka koefisien redaman pada pelampung balok juga lebih besar dibandingkan pelampung silinder.

Selanjutnya, nilai parameter hidrodinamik dapat digunakan untuk karakterisasi hasil eksperimen secara analitis. Parameter ini sangat berpengaruh pada karakteristik hubungan antara elevasi gelombang dan perpindahan gerakan *heave*, khususnya untuk mendapatkan perbedaan sudut fasa antara keduanya yang cukup sulit diperoleh dari data grafik eksperimen secara langsung. Sudut fasa ini dapat diartikan bahwa pada saat gelombang pertama kali berpropagasi, pelampung masih dalam keadaan diam dan beberapa saat kemudian pelampung akan bergerak mengikuti gelombang. Karena gerakan terjadi setelah gelombang lewat, maka sudut fasenya disebut sudut fase lebih lambat atau *lagging phase angle* (Djatmiko, 2012). Adapun hasil perhitungan analitis sudut fasa pada pelampung direpresentasikan oleh Gambar 4.20.



**Gambar 4.20.** Karakteristik Elevasi Gelombang dan Gerakan *Heave* pada Frekuensi Gelombang 5.61 rad/s

Dapat dilihat pada Gambar 4.20 bahwa karakteristik gerakan *heave* baik pada pelampung silinder maupun balok sama-sama mengalami *lagging phase angle* terhadap elevasi gelombang untuk kode variasi C1 dan C2 (hal ini sama untuk variasi lainnya). Jika diperhatikan lebih detail, *lagging phase angle* dari pelampung balok lebih lebar dibandingkan pelampung silinder. Hal ini dikarenakan pada pelampung balok memiliki amplitudo *heave* ( $z_a$ ) yang lebih besar dibandingkan pelampung silinder, sehingga pada pelampung balok membutuhkan waktu yang lebih lama untuk kembali ke titik awalnya. Meskipun demikian, diperkirakan pelampung balok akan menghasilkan daya yang besar sebagai akibat besarnya nilai amplitudo *heave* yang dihasilkan. Besarnya amplitudo *heave* yang sebelumnya disajikan pada Tabel 4.7, juga mengindikasikan besarnya daya yang mampu diserap oleh pelampung yang menghasilkan daya *Power Take-Off* (PTO) seperti yang ditunjukkan pada persamaan 2.49.

Selanjutnya, dari nilai amplitudo *heave* yang diperoleh sebelumnya maka dapat digunakan untuk menentukan karakteristik gerakan *heave* yang terjadi. Melalui karakteristik gerakan yang terjadi, maka akan diketahui parameter hidrodinamik yang dominan bekerja pada pelampung. Karakteristik ini direpresentasikan oleh *Response Amplitude Operator* (RAO) yang merupakan perbandingan antara amplitudo gerakan *heave* ( $z_a$ ) dengan elevasi gelombang ( $\zeta_a$ ). Adapun hasilnya ditunjukkan pada Gambar 4.21.



Gambar 4.21. *Response Amplitude Operator* (RAO) pada Kecuraman Gelombang 0.012

Berdasarkan Gambar 4.21 karakteristik RAO menunjukkan bahwa pelampung balok memiliki amplitudo *heave* yang lebih besar dibandingkan pelampung silinder. Hal ini berkaitan dengan koefisien redaman pada pelampung balok lebih besar dibandingkan pelampung silinder pada kode variasi yang sama. Selanjutnya, untuk mengetahui karakteristik sistem yang bekerja dapat dilakukan dengan penjabaran karakteristik RAO yang dijelaskan pada Tabel 4.10.

$\omega^2$		<i>c/(m+a)</i>											
	A1	B1	C1	D1	E1	F1	A2	B2	C2	D2	E2	F2	
31.47	54.24	54.36	54.09	54.57	54.71	54.79	42.83	42.50	42.99	43.17	42.91	42.51	
31.47	54.24	54.36	54.09	54.57	54.71	54.79	42.83	42.50	42.99	43.17	42.91	42.51	
45.55	58.86	58.43	59.17	59.50	59.13	58.60	44.78	43.86	45.53	45.44	44.59	43.58	
45.55	58.86	58.43	59.17	59.50	59.13	58.60	44.78	43.86	45.53	45.44	44.59	43.58	

 Tabel 4.10. Uraian Karakteristik RAO pada Semua Variasi

Berdasarkan Tabel 4.10, secara umum pada semua variasi model bahwa nilai frekuensi gelombang yang diaplikasikan pada *DMDS–Oscillating Buoy* WEC lebih kecil dibandingkan karakteristik komponen frekuensi naturalnya (tabel hijau). Karakteristik gerakan *heave* pada kondisi ini didominasi oleh koefisien kekakuan yang bekerja (Gambar 4.23). Dampaknya adalah akan dihasilkan gerakan pelampung yang cenderung mengikuti gerakan gelombang (Gambar 4.23), dengan nilai RAO cenderung bernilai 1 dan *lagging phase angle* memiliki nilai yang kecil (Tabel 4.11). Namun, pada pelampung balok dengan frekuensi gelombang 6.75 rad/s, karakteristik frekuensi natural sama dengan frekuensi gelombang (tabel oranye). Hal ini diartikan bahwa pada kondisi tersebut terjadi resonansi antara gelombang dan frekuensi natural pelampung dimana gerakan *heave* didominasi oleh koefisien redaman.



Gambar 4.22. Area Frekuensi Sehubungan dengan Karakteristik Gerakan

$H/gT^2$	Silinder							Balok						
	A1	<b>B1</b>	C1	D1	E1	F1	A2	B2	C2	D2	E2	F2		
0.011	8.19	8.40	7.98	7.80	8.01	8.23	11.85	12.63	11.15	11.08	11.81	12.62		
0.012	8.19	8.40	7.98	7.80	8.01	8.23	11.85	12.63	11.15	11.08	11.81	12.62		
0.016	18.14	19.22	17.19	16.99	17.99	19.14	30.18	35.04	26.13	27.16	31.53	36.73		
0.017	18.14	19.22	17.19	16.99	17.99	19.14	30.18	35.04	26.13	27.16	31.53	36.73		

 Tabel 4.11.
 Perbedaan Sudut Fase (dalam Derajat)



Gambar 4.23. Dokumentasi Pelampung Cenderung mengikuti Gerakan Gelombang saat Naik (kiri) dan Turun (kanan)

## 4.4. Analisa Daya

Setelah mendapatkan karakteristik dan nilai parameter hidrodinamik pada semua variasi, selanjutnya adalah analisa daya yang dihasilkan oleh mekanisme *DMDS–Oscillating Buoy* WEC. Analisa daya merupakan bagian terpenting untuk mengetahui kemampuan model dalam mengonversi daya gelombang. Analisa ini bertujuan untuk mendapatkan nilai daya gelombang yang mampu diserap oleh *DMDS–Oscillating Buoy* WEC, efisiensi penyerapan pelampung (*absorptivity*), dan efisiensi sistem mekanik. Untuk mendapatkan daya, terlebih dahulu dilakukan *running* program Simulink pada *mass-spring-damper system* orde 1 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.24. Parameter hidrodinamik yang diperoleh sebelumnya digunakan sebagai input sehingga diperoleh data gaya total, *displacement*, kecepatan, dan percepatan gerakan *heave*. Nilai daya diperoleh dari perkalian antara koefisien redaman dengan kuadrat kecepatan gerakan *heave* dalam satu periode tertentu seperti yang ditunjukkan pada persamaan 2.49.



Gambar 4.24. Diagram Blok Simulink Mass-Spring-Damper System

Untuk nilai parameter hidrodinamik yang diinputkan mengacu pada hasil *running* program Ursell – Tasai kemudian dikombinasikan menjadi persamaan sistem osilasi orde 1 dengan menambahkan unsur massa sehingga menjadi persamaan lengkap (2.44). Nilai massa merupakan massa total yang berpengaruh pada *draft* dimana terdiri atas massa pelampung, massa tuas utama, dan massa tuas sambungan (tergantung variasi). Adapun rincian massa pada semua variasi ditunjukkan pada Tabel 4.12.

Silinder							Balok					
A1	<b>B</b> 1	C1	D1	<b>E</b> 1	F1	A2	B2	C2	D2	E2	F2	
6.545	6.925	6.165	6.165	6.545	6.925	6.545	6.925	6.165	6.165	6.545	6.925	

**Tabel 4.12.** Nilai Massa pada Setiap Variasi Eksperimen

## 4.4.1 Daya Terserap (Absorbed Power)

Pelampung merupakan komponen utama pada tahap awal untuk menyerap daya gelombang dan mengubahnya ke daya mekanik melalui sistem *Power Take-Off* (PTO) tertentu. Dalam penelitian ini sistem PTO yang digunakan adalah *direct drive mechanical system*. Semua parameter hidrodinamik yang diperoleh sebelumnya digunakan sebagai data input untuk mendapatkan daya yang diserap oleh pelampung. Secara teori, daya yang terserap atau daya *Power Take-Off* ( $P_{PTO}$ ) berasal dari perkalian antara koefisien redaman (b) dengan kecepatan gerakan *heave* ( $\dot{z}$ ) dalam satu periode sesuai persamaan (2.49). Adapun hasilnya ditunjukkan pada Gambar 4.25.



Gambar 4.25. Daya yang Terserap oleh Mekanisme *Power Take-Off* pada Kecuraman Gelombang 0.012

Secara detail pada semua nilai kecuraman gelombang, daya gelombang yang dapat diserap oleh *DMDS–Oscillating Buoy* WEC ditunjukkan oleh Tabel 4.13.

H/gT <sup>2</sup>	Silinder							Balok						
	A1	<b>B1</b>	C1	D1	<b>E1</b>	F1	A2	B2	C2	D2	E2	F2		
0.011	4.46	4.23	4.66	4.51	4.30	4.06	5.65	5.25	6.09	5.80	5.39	5.00		
0.012	5.15	4.88	5.38	5.21	4.96	4.69	6.52	6.06	7.02	6.69	6.21	5.77		
0.016	4.29	4.00	4.64	4.40	4.09	3.79	4.65	3.88	5.44	5.05	4.28	3.53		
0.017	4.97	4.61	5.35	5.10	4.72	4.37	5.91	5.00	6.84	6.38	5.47	4.56		

 Tabel 4.13. Daya Gelombang Terserap pada Semua Variasi (dalam Watt)

Pada daya terserap ini, hampir di semua kode variasi yang sama pelampung balok mampu menyerap daya gelombang yang lebih besar dibandingkan pelampung silinder. Hal ini dipengaruhi oleh nilai koefisien redaman (b) pelampung balok cenderung lebih besar pada beberapa variasi dibandingkan pelampung silinder. Nilai koefisien redaman antara pelampung balok dan silinder sebenarnya memiliki perbedaan yang tidak terlalu jauh, namun selisih daya yang dihasilkan cukup besar. Mengacu pada persamaan (2.49) bahwa selain koefisien redaman, besar daya yang dihasilkan juga dipengaruhi oleh amplitudo gerakan heave  $(z_a)$ . Seperti yang dijelaskan pada Gambar 4.13 sebelumnya, bahwa amplitudo gerakan heave mempunyai nilai tertinggi pada kecuraman gelombang 0.012 dan hal ini selaras dengan hasil pada Tabel 4.13 dimana pada kecuraman gelombang tersebut dihasilkan daya terbesar. Hal ini dikarenakan amplitudo gerakan heave memberikan nilai kuadrat pada persamaan daya sehingga, dengan selisih amplitudo yang kecil akan menghasilkan daya yang besar. Nilai kuadrat pada amplitudo gerakan heave tersebut diperoleh dari persamaan integral kuadrat kecepatan. Perubahan kecepatan yang semakin besar akan menghasilkan daya yang besar. Perubahan kecepatan heave ditunjukkan pada Gambar 4.26. Karakteristik kecepatan gerakan heave berbanding lurus dengan daya yang diperoleh. Kecepatan rata-rata yang diperoleh berkisar antara 0.208 m/s (F1) hingga 0.243 m/s (C2). Karakteristik ini juga sesuai dengan analisa parameter awal dimana pelampung balok memberikan respon kecepatan yang lebih tinggi dibandingkan pelampung silinder untuk semua variasi dan berlaku pada semua kecuraman gelombang yang diinputkan. Selain dalam segi nilai, karakteristik ini secara umum juga sama dalam segi urutan variasi dimana baik pada pelampung balok maupun pelampung silinder urutan variasi yang menghasilkan kecepatan tertinggi hingga terendah adalah C-D-A-E-B-F yang sama dengan urutan draft dari terkecil ke terbesar. Secara umum, baik pada pelampung balok maupun pelampung silinder, kode variasi C menghasilkan parameter hidrodinamik yang baik dan berimplikasi pada besarnya daya terserap.

Hal yang menarik adalah seperti yang dijelaskan sebelumnya bahwa nilai koefisien redaman dan amplitudo gerakan *heave* pada kecuraman gelombang 0.011 ( $\omega = 5.61$  rad/s) selalu lebih besar dibandingkan kecuraman gelombang 0.017 ( $\omega = 6.75$  rad/s). Namun nilai daya yang dihasilkan hampir di semua kode variasi

menunjukkan hasil bahwa pada kecuraman gelombang 0.017 menghasilkan daya yang lebih besar dibandingkan kecuraman gelombang 0.011. Hal ini dikarenakan persamaan daya (2.49) juga terdapat faktor kuadrat frekuensi sehingga mampu memperbesar nilai daya meskipun hanya memiliki koefisien redaman dan amplitudo gerakan *heave* yang kecil. Hal ini terbukti pada variasi B2 dan F2 dimana pada kecuraman gelombang 0.011 memiliki daya yang lebih besar dibandingkan kecuraman gelombang 0.017 yang diartikan bahwa pada kode variasi tersebut kombinasi koefisien redaman dan amplitudo gerakan *heave* memiliki pengaruh yang lebih besar dibandingkan frekuensi pada persamaan daya yang ada meskipun komponen ini saling berkaitan satu sama lain.



Gambar 4.26. Kecepatan Gerakan Heave pada Kecuraman Gelombang 0.012

#### 4.4.2. Analisa *Flywheel*

Daya terserap pada Gambar 4.25 merupakan perkiraan daya yang berhasil dikonversi oleh mekanisme mekanik *DMDS–Oscillating Buoy* WEC jika tanpa menggunakan *flywheel* dan dengan asumsi koefisien redaman pada sistem *Power Take-Off* sama dengan koefisien redaman hidrodinamik ( $b_{PTO} = b$ ). Hal ini bertujuan agar model dapat menghasilkan penyerapan daya yang paling optimal (Vantorre, 2004). Pada saat eksperimen, model dilengkapi dengan *flywheel* yang mampu menyimpan energi rotasi untuk ditambahkan menjadi energi total di sisi output. Energi total dalam satu periode akan menghasilkan daya total yang berhasil dikonversi model ( $P_{TOT}$ ). Adapun total daya lengkap yang dihasilkan model ditunjukkan pada Gambar 4.27.



Gambar 4.27. Daya Output Total dengan Flywheel pada Semua Variasi

Dapat dilihat perbandingan antara Gambar 4.25 dan 4.27 bahwa jika tanpa flywheel seperti Gambar 4.25 maka terdapat kondisi daya mencapai 0 Watt. Hal ini diartikan bahwa pada waktu tertentu model tidak menghasilkan listrik. Namun dengan penambahan *flywheel*, daya tidak mencapai nol yang artinya energi yang tersimpan oleh *flywheel* digunakan untuk kontinyuitas model agar selalu menghasilkan listrik di setiap waktu. Meskipun daya yang dihasilkan flywheel kecil namun cukup untuk menjaga sistem mekanik model tetap bekerja. Flywheel menyimpan energi rotasi dari kecepatan gerakan heave yang dihasilkan oleh pelampung. Rotasi *flywheel* disebabkan oleh kecepatan translasi pelampung akibat gelombang, sehingga semakin besar kecepatan pelampung maka energi rotasi yang tersimpan dalam *flywheel* akan semakin besar. Untuk dikonversi ke daya, maka kecepatan diturunkan terhadap waktu sehingga menghasilkan percepatan pelampung yang sebelumnya diperoleh dari simulasi Simulink. Percepatan ini kemudian dikonversi menjadi percepatan angular sesuai dengan persamaan (2.96) dan dikalikan dengan torsi flywheel sesuai persamaan (2.95) sehingga menghasilkan persamaan daya sebagai berikut:

$$P_{fly} = \tau_{fly} \alpha$$
  
=  $J \frac{\ddot{z}(t)}{L_t} = \left(\frac{1}{2}m_{fly}R_{fly}^2\right) \frac{\ddot{z}(t)}{L_t}$  (4.4)

J merupakan inersia *flywheel* yang merupakan silinder pejal dan  $L_t$  merupakan panjang tuas yang digunakan. Nilai percepatan anguler terjadi pada *stage* sistem

mekanik awal (*stage* 0) dari *DMDS–Oscillating Buoy* WEC. Oleh karena itu, pada nilai  $\ddot{z}(t)$  yang sama variasi dengan tuas terpendek akan memberikan percepatan angular yang lebih besar. Selain itu, percepatan angular tersebut menjadi lebih besar akibat adanya peningkatan pada *gear stage ratio* (*stage* 1 dan 2) dan *gearbox* (*stage* 3) yang menghasilkan putaran sekitar 61 kali. Peningkatan putaran ini bertujuan agar gerakan *heave* gelombang yang kecil dapat memutar generator dengan putaran yang besar sehingga lebih kontinyu dalam menghasilkan listrik. Di sisi lain, peningkatan putaran ini memberikan dampak pada semakin besarnya energi rotasi yang disimpan oleh *flywheel* yang berdampak pada semakin besarnya daya yang mampu dikonversi oleh sistem secara keseluruhan.

Jika dilakukan analisa matematis, daya *flywheel* juga dapat dimodifikasi dari persamaan (2.93), dimana nilai inersia *flywheel* dikalikan dengan kuadrat kecepatan angular akan menyimpan energi kinetik rotasi, dan jika diukur dalam satu periode gelombang maka menghasilkan daya tambahan dari mekanisme *flywheel*. Dapat dianalisa pula bahwa kecepatan translasi pelampung yang dikonversi menjadi kecepatan sudut *flywheel* memberikan nilai kuadrat, sehingga perbedaan kecepatan translasi pelampung yang kecil akan memberikan pengaruh energi rotasi *flywheel* yang besar antar variasi eksperimen. Secara ringkas, pengaruh penambahan daya *flywheel* terhadap daya total yang dihasilkan sistem secara jelas ditunjukkan pada Gambar 4.28.



Gambar 4.28. Persentase Penambahan Daya dengan *Flywheel* 

Berdasarkan Gambar 4.28 bahwa persentase penambahan daya berkisar antara 10.2 – 18.5% dengan *trend* pada kecuraman gelombang yang semakin tinggi maka penambahan juga semakin besar. Hal ini terjadi karena daya penambahan merupakan energi rotasi *flywheel* per satu periode gelombang, sehingga dengan periode yang semakin kecil akan memberikan daya *flywheel* yang besar seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.29. Kemudian panjang tuas terpendek akan menghasilkan daya *flywheel* yang semakin besar sebagai akibat besarnya percepatan sudut yang dihasilkan. Secara umum, nilai penambahan daya cukup variatif karena merupakan kombinasi dari pengaruh parameter hidrodinamik, kecepatan *heave* pelampung, panjang tuas, dan perbedaan periode input gelombang pada eksperimen.



Gambar 4.29. Daya Flywheel yang Dihasilkan pada Semua Variasi

## 4.5.3. Captured Width Ratio (CWR)

Daya yang mampu dihasilkan sistem tidak lepas dari kemampuan pelampung dalam menyerap daya gelombang. Penyerapan daya oleh pelampung menghasilkan daya elektrik rata-rata ( $P_{elec}$ ) yang diperoleh dari eksperimen *DMDS–Oscillating Buoy* WEC. Penyerapan daya ini akan selalu di bawah nilai daya *resource* ( $P_{res}$ ) yang ada. Kemampuan penyerapan daya pelampung dari daya yang tersedia ini disebut dengan *Captured Width* (CW) (Babarit, 2015). Nilai CW jika dibagi dengan lebar pelampung (B) menghasilkan *Captured Width Ratio* (CWR) yang dirumuskan dengan:

$$CWR = \frac{P_{elec}}{P_{res}B}$$
(4.5)

CWR ini merepresentasikan efisiensi hidrodinamik dari sebuah WEC. Sebelum menghitung secara elektris, perlu diketahui terlebih dahulu tentang keterserapan daya oleh pelampung dari potensi daya yang ada. Dengan kata lain keterserapan ini menyatakan efisiensi dari pelampung itu sendiri dalam mengonversi energi gelombang yang tersedia. Nilai keterserapan ini diperoleh dari daya terserap dibagi dengan potensi daya yang dikonversi oleh pelampung dan ditunjukkan pada Gambar 4.30.



Gambar 4.30. Keterserapan Daya oleh Pelampung

Keterserapan pelampung pada Gambar 4.30 menjelaskan bahwa pelampung balok memiliki keterserapan yang baik dibandingkan pelampung silinder dengan rata-rata keterserapan sebesar 63.7% untuk pelampung balok dan 53.7% untuk pelampung silinder. Secara umum, keterserapan terbesar cenderung berada pada kecuraman gelombang yang tinggi, hal ini dikarenakan pada persamaan daya terserap ( $P_{abs}$ ) memuat faktor frekuensi yang bernilai kuadrat, sedangkan daya potensi ( $P_{res}$ ) periode tidak dalam fungsi kuadrat seperti pada persamaan berikut:

$$P_{abs} = \frac{1}{2} b \,\omega^2 z_a^2 \,\,\mathrm{dan} \,\,P_{res} = \frac{1}{32\pi} \rho g^2 H^2 T \,B \tag{4.6}$$

Pengaruh tinggi gelombang yang bernilai kuadrat hanya memiliki pengaruh yang lebih kecil dikarenakan selisihnya yang kecil untuk semua variasi. Keadaan normal ini terjadi untuk semua variasi pelampung silinder. Namun, hal berbeda terjadi pada variasi pelampung balok dimana pada beberapa variasi nilai keterserapan daya justru menurun kemudian berangsur naik. Hal ini terjadi karena nilai koefisien redaman pada pelampung balok yang cenderung eksponensial pada setiap variasi. Koefisien redaman ini juga dipengaruhi frekuensi gelombang dan mampu mempengaruhi nilai amplitudo gerak *heave* yang dihasilkan. Dari grafik juga terlihat bahwa kode variasi C memiliki keterserapan daya yang besar dibandingkan kode variasi lainnya dan sejalan dengan analisa sebelumnya bahwa daya terbesar juga pada kode variasi C.

Selanjutnya adalah mencari nilai sistem mekanik dari data eksperimen daya elektrik yang diperoleh. Data elektrik berupa data tegangan sehingga perlu dikonversi terlebih dahulu dalam bentuk daya listrik menggunakan persamaan Hukum Ohm yaitu:

$$P_{elec} = V I = V \left(\frac{V}{R}\right) = \frac{V^2}{R}$$
(4.7)

V merupakan tegangan tercatat dan *R* merupakan hambatan sistem elektrik (nilai hambatan diasumsikan sekitar 0.5  $\Omega$ ). Data tegangan diperoleh dari pembacaan *data logger* tiap variasi yang dirata-rata kemudian dibagi hambatan sistem elektrik untuk menghasilkan daya listrik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.31. Selanjutnya, daya listrik ini dibagi dengan efisiensi generator yang diasumsikan sekitar 75% sehingga diperoleh daya mekanik. Efisiensi generator ini diasumsikan karena keterbatasan *datasheet* generator yang digunakan.



Gambar 4.31. Daya Elektrik Rata-Rata Hasil Eksperimen
Sesuai dengan analisa sebelumnya bahwa pelampung balok menghasilkan daya elektris yang lebih besar dibandingkan pelampung silinder sebagai akibat dari nilai koefisien redaman dan amplitudo gerak *heave* pada pelampung balok yang lebih besar dibandingkan pelampung silinder. Rata-rata perbedaan daya antara pelampung balok dan pelampung silinder adalah sebesar 19.4% dengan nilai daya elektrik tertinggi dicapai sebesar 2.53 W pada variasi C2 untuk kecuraman gelombang 0.012. Nilai daya elektrik yang lebih sedikit dari perhitungan mengindikasikan terjadinya *losses* daya yang terjadi baik pada komponen sistem mekanik berupa kombinasi *gear* maupun komponen sistem elektrik berupa efisiensi generator. Kode ariasi C baik pada pelampung silinder maupun balok tetap memberikan daya yang lebih besar dibandingkan kode variasi lainnya. Dengan hasil daya elektrik ini maka secara mudah dapat ditentukan nilai CWR pada keseluruhan sistem *DMDS–Oscillating Buoy* WEC ini. Secara ringkas nilai CWR pada semua variasi ditunjukkan pada Gambar 4.32.





Berdasarkan Gambar 4.32 pada semua variasi nilai CWR bervariasi mulai dari 6 – 30% dan semua variasi hampir menunjukkan CWR pada *range* yang konstan. Kode variasi C menunjukkan hasil CWR yang tertinggi dibandingkan kode variasi lain. Hal ini menandakan bahwa, keterserapan pelampung yang efektif akan menghasilkan nilai CWR yang semakin besar dan berdampak pada nilai daya listrik yang semakin besar.

#### 4.4.4 Efisiensi Sistem DMDS–Oscillating Buoy WEC

Daya mekanik yang dihasilkan dari sisi output dibandingkan dengan daya mekanik dari perhitungan input maka akan diperoleh efisiensi sistem mekanik pada *DMDS–Oscillating Buoy* WEC. Untuk semua variasi tentu menghasilkan efisiensi mekanik yang berbeda dikarenakan konfigurasinya yang berbeda. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada skema yang ditunjukkan oleh Gambar 4.33.



**Gambar 4.33.** Skema Aliran Daya pada *DMDS–Oscillating Buoy* WEC Secara ringkas, dari analisa sebelumnya diperoleh efisiensi sistem mekanik di semua variasi ditunjukkan pada Gambar 4.34.





Berdasarkan hasil yang diperoleh, efisiensi sistem mekanik cenderung konstan untuk setiap variasi pada berbagai nilai kecuraman gelombang. Hal ini menandakan bahwa sistem mekanik bekerja secara linier terhadap input yang diberikan. Jika input semakin besar, maka output juga semakin besar karena nilai efisiensi sistem mekanik yang konstan. Efisiensi ini cenderung tetap pada berbagai

kondisi dimana hal ini dibuktikan dengan penelitian dari Ásgeirsson (2013) yang menyatakan bahwa pada sistem mekanik yang bergerak *oscillatory* akan menghasilkan gaya gesek yang besarnya setara dengan koefisien gesekan dinamik ( $\mu$ ) dikalikan dengan kecepatan *heave* ( $\dot{z}$ ). Jika diperhatikan, gaya gesek ini setara dengan nilai gaya redaman. Kemudian jika gaya gesek ini dibagi dengan gaya transmisi maka menghasilkan nilai  $\sigma$  yang memiliki pengaruh terhadap daya serap pelampung seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.35. Gaya transmisi merupakan gaya yang bekerja ketika terjadi pergerakan naik turun pelampung sehingga menggerakkan sistem mekanik yang ada. Gaya ini merupakan kombinasi dari yang ditimbulkan oleh *flywheel* dan generator (Ásgeirsson, 2013). Dapat dilihat pada Gambar 4.35, bahwa antara efisiensi penyerapan pelampung dengan  $\sigma$  memiliki hubungan yang linier. Hal ini mengindikasikan bahwa sistem mekanik yang digunakan memiliki efisiensi yang tetap pada berbagai nilai gaya gesek dinamik.





Kemudian terlihat bahwa efisiensi sistem mekanik terbesar berada pada kode variasi C1 yaitu sebesar 45%. Sedangkan untuk rata-rata efisiensi sistem mekanik secara umum pada semua variasi adalah antara 15 – 40% dengan rata-rata terbaik pada kode variasi C. Hasil ini juga sesuai dengan analisa sebelumnya bahwa kode variasi C selalu lebih unggul dibandingkan kode variasi lainnya, sehingga konfigurasi yang disarankan untuk pengembangan *DMDS–Oscillating Buoy* WEC selanjutnya adalah menggunakan kode variasi C yang memiliki panjang tuas 0.9 m dan tinggi poros terhadap permukaan air sebesar 0.67 m. Untuk pemilihan bentuk pelampung, diperoleh bahwa pelampung balok menghasilkan daya yang lebih besar

dibandingkan pelampung silinder sehingga direkomendasikan bentuk pelampung adalah balok.

Efisiensi yang kecil pada *DMDS–Oscillating Buoy* WEC disebabkan oleh adanya faktor *spelling* sebagai akibat penggunaan sistem rantai dan *freewheel*. Fenomena *spelling* ini terjadi akibat gesekan mekanis *freewheel* ketika pelampung sudah bergerak pada simpangan tertentu, dimana energi yang dihasilkan akibat simpangan tersebut digunakan *freewheel* untuk mulai bergerak (*starting*). Kemudian setelah simpangan yang lebih jauh, barulah *freewheel* bergerak untuk mengonversi gerakan translasi menjadi rotasi. Oleh karena itu, fenomena *spelling* ini lebih berdampak pada *losses* nilai simpangan gerakan *heave* pelampung ketika memasuki sistem mekanik, sehingga yang dikonversi dari simpangan tersebut nilainya menjadi lebih kecil. Hasil konversi simpangan yang lebih kecil pula.

Meskipun demikian, secara umum dapat dikatakan bahwa desain sistem mekanik DMDS-Oscillating Buoy WEC cukup berhasil dalam mengonversi daya gelombang karena mampu menghasilkan daya pada periode gelombang yang diskala terhadap periode gelombang kurang dari 3 sekon. Sebagai gambaran, APR WEC dengan memiliki mekanisme mirip dengan DMDS-Oscillating Buoy WEC tidak mampu menghasilkan listrik pada periode gelombang kurang dari 3 sekon. Namun, pada APR WEC sistem mekaniknya sudah teruji untuk gelombang laut sebenarnya, sedangkan DMDS-Oscillating Buoy WEC masih berupa studi awal karena hanya teruji untuk gelombang reguler. Berkaitan dengan hal tersebut, maka perlu dilakukan penelitian berikutnya dengan input gelombang ireguler sehingga hasil komparasi sistem mekanik antara DMDS-Oscillating Buoy WEC dan APR WEC lebih komprehensif. Sebagai gambaran, Ásgeirsson (2013) melakukan penelitian terhadap model point absorber WEC pada gelombang reguler dan ireguler seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.36. Penelitian tersebut diperoleh hasil bahwa pada input gelombang yang hampir sama nilai efisiensi penyerapan yang dihasilkan tidak jauh berbeda. Ketika efisiensi penyerapan tidak jauh berbeda, maka daya elektrik yang dihasilkan juga tidak jauh berbeda. Penelitian tersebut dapat digunakan sebagai analisa sementara untuk memprediksi hasil ketika DMDS-Oscillating Buoy WEC diuji pada gelombang ireguler, dimana efisiensi penyerapan

yang dihasilkan pada gelombang reguler diperkirakan mendekati hasil ketika diuji menggunakan gelombang reguler.



Gambar 4.36. Penelitian *Point Absorber* WEC pada Gelombang Reguler dan Ireguler

#### 4.4.5. Analisa Hubungan Daya Output dengan Parameter Uji

Setelah diperoleh karakteristik sistem mekanik pada model, perlu diketahui juga variasi yang menghasilkan daya output (dalam bentuk daya listrik) paling optimal. Analisa hubungan ini memiliki variabel terikat yaitu koefisien daya ( $C_P$ ) dan parameter uji seperti kecuraman gelombang ( $H/gT^2$ ), rasio tinggi poros– panjang tuas ( $Y/L_t$ ), rasio garis air– $draft (B_n/h_0)$ , rasio kedalaman air –  $draft (h_0/d)$ , dan besar sudut tuas terhadap *Mean Water Level* ( $\theta$ ). Parameter-parameter tersebut merupakan parameter yang paling berpengaruh terhadap variabel terikat yang ditentukan, sehingga dapat diperoleh hubungan tertentu untuk penguatan rekomendasi konfigurasi model yang paling optimal. Parameter uji tersebut disajikan dalam bentuk analisa dimensi yang sebelumnya telah dikonfigurasikan pada Bab 3.2.7.3. Selanjutnya akan dianalisa pengaruh setiap parameter uji terhadap daya output yang dihasilkan.

#### 4.4.5.1 Hubungan Daya Output dengan Kecuraman Gelombang



Hubungan daya output dengan kecuraman gelombang ditunjukkan pada Gambar 4.37.

Gambar 4.37. Hubungan Daya Output dengan Kecuraman Gelombang

Berdasarkan Gambar 4.37, terlihat bahwa semakin besar kecuraman gelombang  $(H/gT^2)$  maka koefisien daya yang dihasilkan cenderung menurun. Kecuraman gelombang pada eksperimen dalam *range* 0.011 – 0.017. Penurunan koefisien daya seiring kenaikan kecuraman gelombang ini dikarenakan pengaruh koefisien redaman dan amplitudo gerakan *heave* yang memiliki karakteristik serupa di pembahasan sebelumnya. Bahkan pada amplitudo gerakan *heave* juga mengandung unsur kuadrat pada persamaannya sehingga semakin memperbesar daya pada kecuraman gelombang 0.011 dan 0.012. Koefisien daya pada  $H/gT^2$  = 0.012 lebih besar dibandingkan pada  $H/gT^2$  = 0.011. Hal ini karena adanya pengaruh ketinggian gelombang input dimana pada  $H/gT^2$  = 0.012 memiliki H = 0.145 m, sedangkan pada  $H/gT^2$  = 0.011 memiliki H = 0.135 m.

Pada mekanisme DMDS–Oscillating Buoy WEC pengaruh periode gelombang (T) lebih dominan dibandingkan ketinggian gelombang (H). Meskipun secara potensi sesuai persamaan potensi gelombang laut (persamaan 2.42), memang tinggi gelombang yang semakin besar akan menambah potensi daya yang semakin besar pula sebagai akibat fungsi kuadrat pada persamaannya. Namun dari segi keterserapan daya oleh pelampung, sesuai persamaan (2.49) maka frekuensi gelombang lebih memberikan pengaruh secara langsung karena merupakan variabel dalam persamaan, bahkan memberikan nilai kuadrat yang dapat menghasilkan daya yang semakin besar. Namun pengaruh frekuensi gelombang ini ada batasan tertentu. Karena kondisinya adalah ketika frekuensi gelombang semakin tinggi akan cenderung menghasilkan nilai koefisien redaman (*b*) dan amplitudo gerakan *heave* ( $z_a$ ) yang semakin kecil sesuai persamaan *forced oscillation test*, sehingga kombinasi antara nilai frekuensi, koefisien redaman, dan amplitudo gerakan *heave* yang tepat akan menghasilkan daya yang optimal. Kemudian pada kode variasi yang sama, pelampung balok mampu menyerap daya gelombang yang lebih besar dibandingkan pelampung silinder. Hal ini dipengaruhi oleh nilai koefisien redaman (*b*) dan amplitudo gerakan *heave* yang tepat akan koefisien daya pelampung silinder. Secara umum, kode variasi C2 menghasilkan koefisien daya optimal pada kecuraman gelombang 0.012.

#### 4.4.5.2 Hubungan Daya Output dengan Rasio Tinggi Poros–Panjang Tuas

Hubungan daya output dengan rasio tinggi poros - panjang tuas ditunjukkan pada Gambar 4.38. Berdasarkan Gambar 4.38 terlihat bahwa tidak selalu rasio tinggi poros dan panjang tuas yang semakin besar menghasilkan koefisien daya yang besar pula. Terlihat rasio terbaik yang mampu menghasilkan daya terbesar berturut-turut adalah C-D-A-E-F-B baik pada pelampung silinder maupun balok. Konfigurasi  $Y/L_T$  baik untuk pelampung silinder maupun balok adalah sama pada kode variasi yang sejenis. Nilai terbesar adalah pada variasi C2 dengan nilai rasio  $Y/L_T$  sebesar 0.74 yang menghasilkan koefisien daya sebesar 0.071. Rasio ini memiliki nilai jarak poros terhadap MWL (Y) sebesar 0.67 m yang sama pada variasi A dan B. Untuk variasi D, E, F memiliki nilai Y sebesar 0.37 m. Untuk panjang tuas  $(L_T)$  kode variasi A = E = 1 m, B = F = 1.15 m, dan C = D = 0.9 m. Dapat dilihat bahwa pada  $L_T$  yang sama, koefisien daya terbesar secara umum terjadi di setiap Y = 0.67 m. Kemudian untuk variasi  $L_T$ , variasi C dan D yang memiliki tuas terpendek yaitu 0.9 m menghasilkan daya terbesar pada nilai Y yang sama. Hal ini terjadi karena rasio  $Y/L_T$  yang terbaik akan menghasilkan sudut tuas yang optimal sehingga pelampung memiliki amplitudo gerakan heave yang optimal dan berimplikasi pada besarnya daya yang dihasilkan. Kemudian dapat dianalisa bahwa tuas terpendek akan menghasilkan percepatan angular yang lebih besar sehingga akan memperbesar nilai torsi pada *flywheel*. Semakin besar nilai torsi yang dihasilkan *flywheel* akan berimplikasi pada daya total yang semakin besar. Oleh karena itu dapat disimpulkan pada eksperimen ini kombinasi panjang tuas terbaik adalah 0.9 m dan jarak antara poros terhadap MWL sebesar 0.67 m dimana kombinasi ini adalah pada kode variasi C.



**Gambar 4.38.** Hubungan Daya Output dengan Rasio Tinggi Poros–Panjang Tuas

#### 4.4.5.3 Hubungan Daya Output dengan Rasio Garis Air - Draft

Hubungan daya output dengan rasio garis air – *draft* ditunjukkan pada Gambar 4.39. Berdasarkan Gambar 4.39 terlihat bahwa pelampung balok memiliki rasio  $B_n/h_0$  yang lebih besar dibandingkan pelampung silinder. Hal ini dikarenakan perbedaan lebar dimensi dari pelampung dimana pada pelampung silinder memiliki lebar setara diameternya yaitu 0.325 m sedangkan pada pelampung balok memiliki lebar sebesar 0.34 m. Kemudian untuk nilai *draft* pada kedua pelampung juga berbeda meskipun memiliki massa yang sama. Hal ini dipengaruhi oleh nilai *centre of gravity* (CoG) yang berbeda sehingga pada pelampung silinder cenderung memiliki nilai *draft* yang lebih besar dibandingkan pelampung balok pada kode variasi yang sama. Selanjutnya, pada pelampung silinder jika *draft* semakin kecil maka panjang garis air juga semakin kecil mengikuti panjang tembereng lingkaran hingga panjang maksimal sama dengan diameter lingkaran. Sedangkan pada pelampung balok, jika *draft* semakin kecil maka tidak berpengaruh pada lebar garis air karena memiliki lebar yang sama di setiap perubahan *draft*.





Rasio  $B_n/h_0$  ini sangat berpengaruh dalam penentuan nilai koefisien massa tambah dan koefisien redaman seperti yang sebelumnya dijelaskan pada Tabel 4.8 dan 4.9. Pada eksperimen ini, baik pada pelampung silinder maupun pelampung balok *trend* rasio  $B_n/h_0$  yang semakin besar akan menghasilkan koefisien massa tambah dan koefisien redaman yang semakin besar sehingga berimplikasi pada besarnya koefisien daya output yang dihasilkan. Pada setiap eksperimen, kesimpulan untuk rasio  $B_n/h_0$  tidak selalu memiliki *trend* tersebut karena karakteristik kurva Ursell–Tasai untuk menentukan konstanta hidrodinamik ( $C \, \text{dan} \, \overline{A}$ ) yang tidak linier. Ketidakliniearan ini disebabkan oleh banyak faktor seperti bentuk pelampung, potensial kecepatan gelombang, dan *boundary condition*. Selain itu, rasio tersebut juga saling berkaitan dengan frekuensi gelombang yang berupa koefisien frekuensi tak berdimensi ( $\omega^2 B_n/2g$ ). Secara umum, rasio  $B_n/h_0$  terbaik berada pada kode variasi C pada masingmasing pelampung dan nilai koefisien daya paling besar dari kedua pelampung tersebut dicapai pada  $B_n/h_0 = 4.533$  yaitu pada kode C2.

#### 4.4.5.4 Hubungan Daya Output dengan Rasio Kedalaman Air - Draft

Hubungan daya output dengan rasio kedalaman air – *draft* ditunjukkan pada Gambar 4.40. Berdasarkan Gambar 4.40 diketahui bahwa pelampung balok

memiliki rasio *d/h*<sup>0</sup> yang lebih besar dibandingkan pelampung silinder pada kode variasi yang sama sehingga menghasilkan koefisien daya yang semakin besar pula. Kemudian dapat dilihat pula bahwa koefisien daya tertinggi terlihat pada pada variasi C2. Analisanya adalah dengan kedalaman air yang sama yaitu 0.63 m, nilai *draft* yang semakin kecil akan menghasilkan koefisien massa tambah dan koefisien redaman yang semakin besar (sesuai batasan frekuensi gelombang tertentu) sehingga diperoleh koefisien daya yang besar pula. Kesimpulan ini merujuk pada penelitian Bai (1977) yang meneliti nilai konstanta massa tambah (untuk menghitung koefisien massa tambah) dan konstanta redaman (untuk menghitung koefisien redaman) akibat pengaruh rasio kedalaman air–*draft*. Penelitian tersebut khusus pada bentuk sebuah benda yang memiliki bentuk berupa silinder dan balok. Adapun hasil penelitian tersebut ditunjukkan pada Gambar 4.41 dan 4.42.

Berdasarkan penelitian Bai (1977) tersebut, seiring meningkatnya v yang merupakan koefisien frekuensi tak berdimensi (setara dengan  $\omega^2 B_n/2g$ ), untuk konstanta massa tambah ( $\mu$ ) cenderung semakin meningkat, sedangkan pada konstanta redaman ( $\lambda$ ) semakin menurun. Namun, untuk setiap nilai rasio kedalaman–*draft* (h/a untuk silinder atau h/b untuk balok) yang semakin kecil cenderung menghasilkan  $\mu$  dan  $\lambda$  yang semakin besar pada v yang sama. Variabel h merupakan kedalaman air sedangkan a atau b merupakan draft. Namun jika mengacu pada hasil eksperimen, sesuai Tabel 4.8 dan 4.9 sebelumnya bahwa nilai  $\omega^2 B_n/2g$  berada pada rentang 0.5032 - 0.5183 dan 0.7282 - 0.7501 untuk pelampung silinder (T = 1.12 s dan T = 0.931 s), sedangkan untuk pelampung balok memiliki nilai  $\omega^2 B_n/2g$  sebesar 0.5454 (T = 1.12 s) dan 0.7893 (T = 0.931s). Untuk rentang rasio  $d/h_0$  pada pelampung silinder yaitu antara 4.345 - 5.25dengan urutan F1–B1–E1–A1–D1–C1, sedangkan pada pelampung balok yaitu 6.3 – 8.4 dengan urutan yang sama F2–B2–E2–A2–D2– C2. Dari semua rentang di atas, jika disesuaikan dengan grafik penelitian Bai (1977) maka akan diperoleh kesimpulan bahwa pada nilai  $d/h_0$  yang semakin besar akan menghasilkan konstanta massa tambah dan konstanta redaman yang besar pula dimana hal ini berimplikasi pada semakin besarnya nilai koefisien daya output yang dihasilkan.



Gambar 4.40. Hubungan Daya Output dengan Rasio Kedalaman Air – Draft



**Gambar 4.41.** Grafik Konstanta Hidrodinamik untuk Silinder pada Beberapa Rasio *h/a*: (a) Massa Tambah, (b) Redaman (Bai, 1977)



Gambar 4.42. Grafik Konstanta Hidrodinamik untuk Balok pada Beberapa Rasio *h/a*: (a) Massa Tambah, (b) Redaman (Bai, 1977)

## 4.4.5.5 Hubungan Daya Output dengan Sudut Tuas Terhadap MWL

Hubungan daya output dengan rasio sudut tuas terhadap MWL ditunjukkan pada Gambar 4.43. Nilai  $\theta$  bervariasi namun memiliki urutan yang sama pada setiap pelampung. Urutan  $\theta$  dari yang terbesar hingga terkecil yaitu C–A–B–D–E–F dengan rentang 31.94° (C1) – 11.20° (F1) untuk pelampung silinder dan 37.40° (C2) – 16.33° (F2) untuk pelampung balok. Sudut yang terbentuk antara tuas dengan MWL yaitu  $\theta$  dipengaruhi oleh panjang tuas dan jarak poros terhadap MWL seperti yang dijelaskan pada Bab 4.5.5.2. Terlihat pada Gambar 4.43 bahwa pada kode variasi yang sama,  $\theta$  yang dibentuk pelampung balok lebih besar dibandingkan pelampung silinder. Semakin besar  $\theta$  yang dibentuk, maka koefisien daya yang dihasilkan juga semakin yang besar.

Hal ini dikarenakan sudut yang besar pada pelampung yang sama akan menghasilkan torsi yang besar sebagai akibat perkalian fungsi gaya gelombang dan sin  $\theta$ . Selain itu torsi yang dihasilkan juga dipengaruhi oleh panjang tuas yang digunakan. Pada penelitian ini, jarak poros terhadap MWL pertama yang digunakan sebesar 0.67 m sehingga sudut optimal akan dibentuk oleh variasi C yang memiliki panjang tuas 0.9 m. Sedangkan, jarak poros terhadap MWL kedua sebesar 0.37 m sehingga sudut optimal akan dibentuk oleh variasi D yang juga memiliki panjang tuas 0.9 m. Artinya, pada setiap variasi jarak poros terhadap MWL, tuas terpendek cenderung menghasilkan sudut yang besar. Hal yang menarik adalah, torsi juga berbanding lurus dengan panjang lengan namun konfigurasi lengan terpendek mampu menghasilkan daya yang lebih besar. Hal ini disebabkan oleh selisih sudut antar variasi cukup besar sehingga nilai perkalian gaya gelombang dengan sin  $\theta$  memiliki selisih yang cukup besar. Di sisi lain, selisih panjang tuas antar variasi cukup kecil sehingga menyebabkan nilai torsi lebih mengikuti variasi yang menghasilkan sudut besar. Nilai torsi yang besar akan memperbesar daya output yang dihasilkan. Secara umum, pada eksperimen ini dihasilkan  $\theta$  terbaik untuk pelampung balok





Dari hubungan antara daya output model dengan parameter uji yang berpengaruh pada eksperimen diperoleh kesimpulan antara lain:

• Daya terbesar dihasilkan pada kecuraman gelombang 0.012

- Konfigurasi pelampung balok lebih baik dibandingkan pelampung silinder pada kode variasi yang sama
- Variasi C2 yang memiliki konfigurasi panjang tuas 0.9 m, jarak poros model terhadap MWL 0.67 m, serta *draft* 0.075 m menghasilkan daya paling optimal.

#### 4.5 Estimasi Batasan Kinerja Model

Berdasarkan hasil eksperimen pada semua periode gelombang yang diujikan yaitu 1.12 s dan 0.931 s, semua variasi baik pada pelampung balok maupun silinder mampu menghasilkan daya dengan daya terbesar pada kode variasi C. Periode tersebut mewakili nilai periode kurang dari 3 sekon pada skala prototipenya. Pada saat eksperimen sempat dilakukan dengan mencoba gelombang yang lebih tinggi lagi dengan input periode 0.8 s (tercatat sekitar 0.75 s) namun hanya untuk pelampung silinder karena tidak cukupnya waktu eksperimen. Eksperimen ini tercatat dilakukan pada kecuraman gelombang antara 0.021 - 0.023 dengan hasil yang diperoleh ditunjukkan pada Gambar 4.44.



Gambar 4.44. Daya Output Eksperimen pada Kecuraman Gelombang 0.021 –

0.023

Berdasarkan Gambar 4.44 terlihat bahwa daya yang dihasilkan sangat kecil sehingga pada periode gelombang ini tidak signifikan. Daya tertinggi yang mampu dicapai adalah sekitar 0.0293 W atau 2.85 W dalam skala prototipe. Jika diestimasikan untuk pelampung balok, maka dengan selisih daya sekitar 19.4%

maka diperoleh daya sekitar 0.035 W atau 3.4 W dalam skala prototipe. Ketika dilakukan eksperimen ini model hampir tidak menghasilkan putaran selama durasi gelombang input. Kondisi ini dapat diartikan bahwa model memiliki batasan untuk kondisi gelombang tertentu dimana pada eksperimen dengan periode antara 0.931 - 1.12 s, model masih mampu bekerja dengan baik. Sedangkan pada periode batasa bawah yaitu 0.75 s, model tidak mampu bekerja menghasilkan daya dengan optimal. Kemudian terkait batas atas periode gelombang maka perlu dilakukan eksperimen selanjutnya agar diperoleh *range* periode yang sesuai untuk kinerja model DMDS – Oscillating Buoy WEC. Batas atas periode ini harus ditentukan karena semakin besar periode gelombang tidak selalu menghasilkan koefisien redaman dan amplitudo gerakan *heave* yang besar pula, namun yang pasti semakin besar periode gelombang maka frekuensi gelombang yang terbentuk akan semakin kecil sehingga daya yang dihasilkan juga kecil. Sebagai gambaran pada penelitian APR WEC, ketika terjadi periode gelombang kurang dari 3 sekon, daya yang dihasilkan mendekati 0, kemudian mencapai daya tertinggi pada periode 4.5 - 5 s, dan daya mulai turun lagi pada periode lebih dari 5.5 s.

#### 4.6. Analisa Umum Implementasi

Tahap implementasi merupakan output akhir pada penelitian sebuah desain WEC. Pada model *DMDS–Oscillating Buoy* WEC ini memang masih jauh hingga tahap aplikasi di lapangan karena masih berupa studi awal dan bahkan menggunakan gelombang reguler. Padahal kondisi nyata di lautan adalah berupa gelombang ireguler. Namun, sebagai gambaran implementasi maka dapat dilakukan analisa secara umum berdasarkan penelitian yang dilakukan sejauh ini. Data daya listrik yang diperoleh dari eksperimen diskala terhadap nilai prototipenya dengan faktor skala  $\lambda^{3.5}$  yang merupakan Froude *scale factor* untuk besaran daya. Dari data eksperimen, daya yang diskala hanyalah daya yang dihasilkan pada konfigurasi paling optimal yaitu pada pelampung balok dengan konfigurasi C2. Adapun hasil penyekalaan tersebut disajikan pada Tabel 4.14.

Berdasarkan Tabel 4.14 dapat dilihat bahwa pada variasi C2 dengan kecuraman gelombang yang diberikan diestimasikan *DMDS–Oscillating Buoy* WEC mampu menghasilkan daya sekitar 175.18 – 246.5 Watt. Dengan estimasi

daya yang diperoleh pada skala prototipe tersebut, maka dapat disimpulkan bahwa *DMDS–Oscillating Buoy* WEC mampu mengonversi daya ketika terjadi gelombang pada periode kurang dari 3 sekon. Gelombang dengan periode ini sangat mungkin muncul pada kondisi tertentu mengingat laut merupakan gelombang polikromatik yang merupakan campuran gelombang dengan berbagai kondisi. Sebagai contoh pengujian APR WEC dimana berdasarkan pengukuran terdapat kemunculan gelombang yang memiliki *seat state* periode 3 sekon ke bawah dengan nilai tinggi gelombang tertentu (lihat Tabel 1.1). Namun pada *seat state* ini APR WEC tidak mampu menghasilkan daya seperti yang ditampilkan pada Gambar 1.4 sebelumnya. Jika pada *sea state* tersebut APR WEC mampu mengonversi potensi yang ada tentu akan memperbesar jumlah energi yang dihasilkan. Masalah inilah yang coba dijawab pada *DMDS–Oscillating Buoy* WEC agar desainnya mampu mengonversi daya gelombang dengan *range* yang lebih lebar sehingga akan meningkatkan perolehan energi gelombang dalam skala implementasi.

Eksperimen	$H/gT^2$	C2
	0.011	1.95
	0.012	2.53
	0.016	1.80
	0.017	2.39
Estimasi Daya Prototipe	$H/gT^2$	C2
	0.011	190.21
	0.012	246.50
	0.016	175.18
	0.017	232.78

**Tabel 4.14.** Daya Elektrik Hasil untuk Skala Prototipe (dalam Watt)

Terkait daya yang dihasilkan, pada eksperimen menggunakan generator DC. Sedangkan dalam realitanya, generator yang digunakan pada sebuah konverter energi gelombang berbasis konversi energi putar adalah berupa generator AC. Sebagai contoh APR WEC yang menggunakan generator AC tipe *permanent magnet generator* (PMG). Ketidaksesuaian penggunaan generator ini dikarenakan jika menggunakan generator AC maka perlu didesain hasil putaran pada *DMDS–Oscillating Buoy* WEC dengan putaran yang sangat tinggi (minimal diatas 1500 rpm) yang sesuai dengan *rating* generator dan itu di luar batas kemampuan dalam skala eksperimen. Keterbatasan ini mencakup keterbatasan komponen untuk

mendesain sistem mekanik dan keterbatasan *flume tank* untuk membangkitkan gelombang dengan amplitudo yang tinggi. Oleh karena itu, pada penelitian selanjutnya jika tetap menggunakan generator DC, maka listrik yang dihasilkan dapat disimpan terlebih dahulu ke baterai. Untuk membantu penyimpanan ke baterai maka dibantu oleh *DC to DC boost converter* agar tegangan yang dihasilkan generator DC dinaikkan sehingga sama dengan tegangan baterai. Setelah dari baterai perlu ada mekanisme inverter untuk mengubah tegangan DC dari baterai menjadi tegangan AC sehingga listrik dapat digunakan. Secara ringkas mekanisme ini diilustrasikan pada Gambar 4.45. Dalam implementasinya, penggunaan komponen elektronika daya akan menambah biaya yang cukup besar karena komponen yang digunakan semakin banyak sehingga pada eksperimen *DMDS–Oscillating Buoy* WEC selanjutnya direkomendasikan menggunakan dengan skala prototipenya.



Gambar 4.45. Mekanisme Konversi Listrik DC ke Listrik AC

Selanjutnya, gambaran implementasi teknis penempatan *DMDS– Oscillating Buoy* WEC adalah mengacu pada implementasi APR WEC yang menggunakan sebuah kapal yang ditambatkan pada pelampung tambat (*mooring float*) di lokasi laut tertentu kemudian listriknya disalurkan dan didistribusikan ke daratan melalui kabel bawah laut. Penggunaan kapal ini agar sistem lebih *portable* sehingga lebih mudah dipindahkan pada lokasi yang lebih tepat. Selain itu, penggunaan kapal ini juga lebih mempermudah baik untuk proses *maintenance* ketika terdapat gangguan maupun proses pengecekan performa secara berkala. Adapun gambaran ilustrasi implementasi *DMDS–Oscillating Buoy* WEC secara nyata ditunjukkan pada Gambar 4.46.



Gambar 4.46. Ilustrasi Implementasi *DMDS–Oscillating Buoy* WEC di Lautan (Modifikasi dari Desain Yang *et al*, 2019)

Selain gambaran umum tentang mekanisme implementasi, perlu juga dijelaskan tentang beberapa kriteria umum yang dapat digunakan sebagai acuan atau pertimbangan awal dalam implementasi *DMDS–Oscillating Buoy* WEC. Adapun beberapa kriteria umum tersebut antara lain:

- Implementasi dilakukan di daerah yang memiliki potensi energi gelombang laut bagus namun tidak termasuk jalur pelayaran dan kawasan untuk mata pencaharian nelayan secara umum. Kawasan ini dapat berupa selat, teluk, atau laut lepas.
- Implementasi dilakukan di daerah yang memiliki potensi energi gelombang laut bagus dan mengalami kelangkaan energi listrik atau elektrifikasinya rendah.
- Jika diasumsikan batas kecuraman gelombang di eksperimen dengan gelombang reguler sama dengan suatu lokasi di Indonesia, maka daerah yang sesuai ada salah satunya adalah di kawasan Laut Arafuru yang memiliki kecuraman gelombang 0.011946 (Akhwady, 2012). Selain itu kawasan ini juga dekat dengan daerah dengan elektrifikasi rendah seperti Kepulauan Maluku dan Papua.

Selanjutnya, tahap implementasi sangat bergantung juga dengan data-data pendukung agar proses pengerjaan proyek implementasi *DMDS–Oscillating Buoy* WEC dapat berjalan dengan baik. Adapun beberapa hal yang perlu dilakukan, yaitu:

- Memastikan bahwa data-data pendukung secara teknis valid seperti data angin, gelombang, pasut, batimetri dan peta jalur lalu lintas kapal.
- Memastikan regulasi, undang-undang dan kebijakan lainnya baik di tingkat pusat maupun daerah terkait implementasi energi terbarukan dan kemaritiman.
- Memastikan data kondisi sosial masyarakat di daerah perencanaan apakah ada potensi terjadi gesekan sosial dan keamanan baik dalam tahap pembangunan maupun tahap operasional ketika pembangkit sudah dijalankan.
- Memastikan data kontraktor untuk mengerjakan proyek dengan melihat *track record* pembangungan di bidang yang relevan dengan tujuan.

Kemudian yang tidak kalah pentingnya adalah kalkulasi kelayakan harga jual listrik untuk implementasi konverter energi gelombang ini. Mengacu pada penelitian dari Luhur dkk (2013) yang diterbitkan di Jurnal Sosial Ekonomi Vol. 8 No. 1 Tahun 2013 yang berjudul "Analisis Finansial Pengembangan Energi Laut Di Indonesia". Hasil penelitian menunjukkan bahwa beberapa harga jual energi laut cukup bersaing dengan biaya produksi dari listrik konvensional yang dihasilkan PT (Persero) PLN. Untuk PLN memiliki harga jual Rp. 1.163/kWh di tahun 2013 (dari analisa Luhur dkk, 2013) sedangkan sekarang memiliki tarif Rp. 1352/kWh. Sedangkan untuk energi laut memiliki harga jual Rp. 1.268/kWh untuk energi arus laut, Rp1.709/kWh untuk energi gelombang laut, Rp. 2.048/kWh untuk energi pasang surut air laut, dan Rp. 4.030/kWh untuk OTEC. Oleh karena itu, harga jual untuk energi gelombang laut masih cukup bersaing dengan kondisi yang ada. Meskipun demikian, dengan minimnya studi tentang pemanfaatan energi gelombang laut dan masih stagnannya pengembangan energi terbarukan dari sumber yang lain, maka implementasi energi gelombang masih belum terlalu prioritas untuk kondisi sekarang. Namun, untuk proyeksi beberapa tahun ke depan, seiring cadangan sumber energi non terbarukan semakin habis maka semakin besar peluang implementasi pembangkit energi gelombang ini dilakukan.

"Halaman ini sengaja dikosongkan"

# BAB V PENUTUP

## 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan tujuan yang disusun dan mengacu pada analisa penelitian, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

- 4. Konfigurasi sistem yang tepat agar model mampu bekerja pada periode gelombang minimal kurang dari 3 sekon adalah dengan menaikkan rasio putaran menjadi 1:61 dan memperkecil inersia *flywheel* menjadi 1/17 dari APR WEC yang merupakan acuan adopsi teknologi. Konfigurasi ini mampu menghasilkan rata-rata efisiensi sistem mekanik pada semua variasi adalah antara 15 40% dengan rata-rata terbaik pada kode variasi C sebesar 40%. Kemudian dari eksperimen diperoleh hasil bahwa bentuk pelampung balok lebih baik dibandingkan pelampung silinder pada kode variasi yang sama dengan konfigurasi optimal adalah C2 yang memiliki panjang tuas 0.9 m, jarak poros terhadap MWL 0.67 m, dan *draft* 0.075 m.
- 5. Berdasarkan hasil eksperimen, model *DMDS–Oscillating Buoy* WEC berhasil bekerja secara kontinyu dan mampu menghasilkan daya listrik pada kondisi gelombang dengan periode 1.12 s dan 0.931 s yang merupakan hasil skala minimum untuk periode gelombang 3 sekon. Jika diskala pada prototipenya diestimasikan *DMDS–Oscillating Buoy* WEC mampu menghasilkan daya listrik maksimal sebesar 246.5 Watt.
- 6. Konstanta hidrodinamik yang diperoleh dari simulasi berbasis metode Ursell – Tasai menunjukkan hasil yang valid. Nilai konstanta tersebut digunakan untuk mendapatkan parameter hidrodinamik berupa koefisien massa tambah, redaman, dan kekakuan yang lebih dominan dipengaruhi oleh frekuensi gelombang serta sangat berpengaruh dalam menghasilkan daya output. Untuk pelampung silinder, nilai koefisien massa tambah sebesar 17.24 – 19.44 kg, koefisien redaman 78.19 – 91.68 kg/s, dan koefisien kekakuan 1384.77 – 1426.37 kg/s<sup>2</sup>. Sedangkan untuk pelampung balok, nilai koefisien massa tambah sebesar 26.8 – 28.75 kg, koefisien redaman 68.03 – 96.51 kg/s, dan koefisien kekakuan 1500.93 kg/s<sup>2</sup>.

## 5.2 Saran

Berikut ini adalah beberapa saran yang diharapkan dapat menjadi masukan dan bahan pertimbangan dalam inovasi untuk penelitian selanjutnya adalah:

- 1. Melakukan eksperimen menggunakan input gelombang ireguler sesuai *sea state* tertentu khususnya untuk perairan Indonesia.
- 2. Peningkatan desain sistem mekanik agar mampu menghasilkan efisiensi yang lebih tinggi. Peningkatan ini dapat dilakukan dengan penggunaan sistem *full-set gear* sehingga menghindari penggunaan sistem rantai dan *freewheel* yang menyebabkan adanya efek *spelling*.
- 3. Melakukan *decay test* terhadap komponen pelampung sehingga nilai koefisien massa tambah, redaman, dan kekakuan lebih realistis digunakan dalam analisa.
- Melakukan penelitian untuk sistem elektrik pada DMDS–Oscillating Buoy WEC agar kualitas listrik yang dihasilkan lebih bagus, stabil, dan applicable melalui konfigurasi desain komponen elektronika daya seperti baterai, konverter, dan inverter.

## **DAFTAR PUSTAKA**

- Adiputra, R., Utsunomiya, T., Koto, J., Yasunaga, T., & Ikegami, Y. (2019).
  Preliminary design of a 100 MW-net ocean thermal energy conversion (OTEC) power plant study case: Mentawai island, Indonesia. *Journal of Marine Science and Technology*. https://doi.org/10.1007/s00773-019-00630-7.
- Alifdini, I., Iskandar, N. A. P., Nugraha, A. W., Sugianto, D. N., Wirasatriya, A., & Widodo, A. B. (2018). Analysis of ocean waves in 3 sites potential areas for renewable energy development in Indonesia. *Ocean Engineering*. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.07.013.
- Albert, A., Berselli, G., Bruzzone, L. and Fanghella, P. (2017) 'Mechanical design and simulation of an onshore four-bar wave energy converter', *Renewable Energy*. Elsevier Ltd, 114, pp. 766–774. doi: 10.1016/j.renene.2017.07.089.
- Atlar, M., Lai, P.S.K. and McGregor, R.C. (1987), "On the Hydrodynamic Aspects of a Two-Dimensional Prediction of Loads and Motions of a Twin-Hull Semi Submersible", *Proceedings of IMAEM 4th International Congress*, Paper No. 25, Varna, Bulgaria, May.
- Babarit, A. (2015). A database of capture width ratio of wave energy converters. *Renewable Energy*, 80, Elsevier Ltd 610–628. https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.02.049.
- Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi. (2018). Indonesia Energy Outlook 2018: Energi Berkelanjutan untuk Transportasi Darat. ISBN 978–602– 1328–05–7.
- Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi. (2019). Indonesia Energy Outlook 2019. Dewan Energi Nasional. ISSN 2527–3000.
- Bjarte-Larsson, T. and Falnes, J. (2006) 'Laboratory experiment on heaving body with hydraulic power take-off and latching control', *Ocean Engineering*, 33(7), pp. 847–877. doi: 10.1016/j.oceaneng.2005.07.007.

- Bhattacharyya, R. (1978). *Dynamics of Marine Vehicles*. New York: John Wiley & Sons.
- Cahyadi, J. A., dan Hendrowati, W. 'Studi Ekperimental Pengaruh Bentuk Pelampung pada Mekanisme PLTGL Metode Pelampung Terhadap Energi Listrik yang Dihasilkan'. *Jurnal Teknik POMITS* Vol. 3, No. 2, (2014) ISSN: 2301–9271.
- Chakrabarti, S. K. 1994. *Offshore structure modeling*. Advanced series on ocean engineering. Volume 9. Singapore and River Edge, NJ: World Scientific.
- Chen, F., Duan, D., Han, Q., Yang, X. and Zhao, F. (2019) 'Study on force and wave energy conversion efficiency of buoys in low wave energy density seas', *Energy Conversion and Management*. Elsevier Ltd, 182, pp. 191– 200. doi: 10.1016/j.enconman.2018.12.074.
- Choi, K. S., Yang, D. S., Park, S. Y. and Cho, B. H. (2012) 'Design and performance test of hydraulic PTO for wave energy converter', *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 13(5), pp. 795–801. doi: 10.1007/s12541-012-0105-4.
- Chozas, J. F., Kramer, M. M., Sørensen, H. C. and Kofoed, J. P. (2012) 'Combined Production of a full-scale Wave Converter and a full-scale Wind Turbine – a Real Case Study', *International Conference on Ocean Energy 2012*, pp. 1–7.
- Close, C. M., Frederick, D. K., and Newell, J. C. (2002). '*Modeling and Analysis* of Dynamic Systems Third Edition', John Wiley and Sons, Inc.
- Comstock, J.P. (1977), *Principles of Naval Architecture*, SNAME Publication, New York.
- Dean, R. G. and Dalrymple, R. A. (1991) 'Water wave mechanics for engineers and scientists, Advance series on Ocean Engineering, 2', Singapore: World Scientific Publishing Co, Pte, Ltd.
- Dettmer, R. (2008) 'Push and pull', *International Engineering and Technology* (*E&T*), pp. 26–9.
- Djatmiko, E. B. (2012). 'Perilaku dan Operabilitas Bangunan Laut di Atas Gelombang Acak', ITS Press, Surabaya.

- ESDM. (2016). Materi Presentasi ISOE 2016. *International Seminar Ocean Energy*. Bandung: 7–9 Desember 2016.
- Falcão, A. F. d. O. (2008) 'Phase control through load control of oscillating-body wave energy converters with hydraulic PTO system', *Ocean Engineering*, 35(3–4), pp. 358–366. doi: 10.1016/j.oceaneng.2007.10.005.
- Falcão, A. F. d. O. (2010). Wave energy utilization: a review of the technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*; 14:899–918.
- Falnes, J. and Perlin, M. (2003) 'Ocean Waves and Oscillating Systems: Linear Interactions Including Wave-Energy Extraction', *Applied Mechanics Reviews*. ASME International, 56(1), pp. B3–B3. doi: 10.1115/1.1523355.
- Fenton, J. D. (1990). Nonlinear Wave Theories Introduction Steady Waves: the effects of current and the governing equations. *The Sea: Ocean Engineering Science*, 9, 3–20.
- Finnigan, T., and Auld, D. Model testing of a variable-pitch aerodynamic turbine. International offshore and polar engineering conference, 2003. p. 357–60.
- Firman, Beny. (2016). Implementasi Sensor IMU MPU6050 Berbasis Serial I2C pada Self-Balancing Robot, Artikel Ilmiah, Jurusan Teknik Elektro, Institut Sains & Teknologi AKPRIND Yogyakarta.
- Folley, M. (2017). 'The Wave Energy Resource'. in book: Handbook of Ocean Wave Energy 7. Springer Open, pp 43 – 79.
- Gareev A. Analysis of variable pitch air turbines for oscillating water column (OWC) wave energy converters. Technical Report, University of Wollongong. School of Mechanical, Material and Mechatronic Engineering; 2011.
- Garrison, T. S. (2010). *Oceanography: An Invitation to Marine Science*, 7th edn. Brooks/Cole, Belmont, USA.
- Ginting, N. B. (2002). Penggerak antena modem USB tiga dimensi berbasis mikrokomputer menggunakan Arduino UNO. *Jurnal Fisika*. 2(1): 17-18.
- Goda, Y., and Suzuki, Y. (1976). Estimation of Incident and Reflected Waves in Random Wave Experiments. Proceedings of the 15th Coastal Engineering Conference, Vol. 1, pp. 828 – 845.

- Goda, Y. 1985. *Random sea and design of maritime structures*. University of Tokyo Press.
- Hartono, R. (2013). Perancangan Sistem Data Logger Temperatur Baterai Berbasis Arduino Duemilanove. Proyek Akhir. Program Studi Diploma III, Teknik Elektro, Universitas Jember, Jember.
- Hazra, S., Bhattacharya, S., Uppalapati, K. K., & Bird, J. (2012). Ocean energy power take-off using oscillating paddle. In 2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2012 (pp. 407–413). https://doi.org/10.1109/ECCE.2012.6342793.
- Heizer J. dan B. Render, (2015), Manajemen Operasi ed. 11. Salemba Empat, Jakarta.

https://components101.com/sensors/mpu6050-module, Diakses pada 14 April 2020 https://create.arduino.cc/projecthub/MisterBotBreak/how-to-use-a-datalogger-

ffd5f4, Diakses pada 14 April 2020.

- https://www.arduino.cc/en/products/counterfeit, Diakses pada 14 April 2020.
- Hughes, S. A. 1993. "Physical Models and Laboratory Techniques in Coastal Engineering". Coastal Engineering Research Center, USA.
- Hunt, J. N. (1979), "Direct Solution of Wave Dispersion Equation", J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., ASCE, Vol 105, WW4, pp 457-459.
- Ibrahim, S. (2014). *Moment of Inertia and Friction*, Lecture Handout, Shaqra University, Shaqra, doi: 10.13140/RG.2.2.18280.47367.
- Ichwan, M., Husada, M. G., dan Rasyid, M.I. (2013). 'Pembangunan prototipe sistem pengendalian peralatan listrik pada platform android'. Jurnal Informatika. No.1, Vol. 4, Januari – April 2013 ISSN: 2087-5266.
- IRENA. Renewable energy prospects: Indonesia, A renewable energy roadmap; 2017, pp. 1–108.
- Isaacson, M. (1991), Measurement of regular wave reflection, *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 117(6), pp. 553–569.
- Jahangir, M. H., Hosseini, S. S. and Mehrpooya, M. (2018) 'A detailed theoretical modeling and parametric investigation of potential power in heaving buoys', *Energy*. Elsevier Ltd, 154, pp. 201–209. doi: 10.1016/j.energy.2018.04.107.

- Jang, T. S., Baek, H., Kim, M. C. and Moon, B. Y. (2011) 'A new method for detecting the time-varying nonlinear damping in nonlinear oscillation systems: Nonparametric identification', *Mathematical Problems in Engineering*, 2011. doi: 10.1155/2011/749309.
- Journée, J.M.J. and Adegeest, L.J.M. (2003). Theoretical Manual of Strip Theory Program "SEAWAY for Windows", Report, Ship Hydromechanics Laboratory Delft University of Technology, Delft.
- Kamphuis, J. W. (2000). Introduction to coastal engineering and management. Advanced Series on Ocean Engineering, 16, Singapore: World Scientific Publishing Co, Pte, Ltd.
- Kementrian ESDM. (2019). Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) Nomor 143K/20/MEM/2019 tentang Rencana Umum Ketenagalistrikan Nasional Tahun 2019–2038. Jakarta.
- Kementrian ESDM. Permen ESDM No. 12 Tahun 2017 dan Peraturan Pemerintah No. 79 tahun 2014 tentang Ketahanan Energi.
- Koto, J. (2016). Potential of Ocean Thermal Energy Conversion in Indonesia. International Journal of Environmental Research & Clean Energy.
- Kurniawan, A., Pedersen, E. and Moan, T. (2012) 'Bond graph modelling of a wave energy conversion system with hydraulic power take-off', *Renewable Energy*, 38(1), pp. 234–244. doi: 10.1016/j.renene.2011.07.027.
- Lewis, F. M. *The Inertia of Water Surrounding a Vibrating Ship*, Transactions SNAME, Vol. 37, 1929.
- Liang, C., Ai, J., & Zuo, L. (2017). Design, fabrication, simulation and testing of an ocean wave energy converter with mechanical motion rectifier. *Ocean Engineering*, *136*, Elsevier Ltd, 190–200. <u>https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.03.024</u>.
- Lin, Y., Bao, J. B., Liu, H. Review of hydraulic transmission technologies for wave power generation, *Renew. Sustain. Energy* Rev. 50 (2015) 194–203.
- Lisboa, R. C., Teixeira, P. R. F. and Fortes, C. J. (2017) 'Numerical evaluation of wave energy potential in the south of Brazil', *Energy*. Elsevier Ltd, 121, pp. 176–184. doi: 10.1016/j.energy.2017.01.001.

- Luhur, E.S., Muhartono, R., dan Suryawati, S.H., (2013). Analisis finansial pengembangan energi laut di Indonesia. Jurnal Sosial Ekonomi Kelautan dan Perikanan. Hal 25–37.
- López, I., Andreu, J., Ceballos, S., Martínez De Alegría, I. and Kortabarria, I. (2013) 'Review of wave energy technologies and the necessary powerequipment', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 413–434. doi: 10.1016/j.rser.2013.07.009.
- Maris, A. P. (2015). Studi Eksperimen dan Analisa Energi Listrik yang Dihasilkan oleh Mekanisme Prototipe Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut Tipe Pengungkit dengan Variasi Titik Tumpu Lengan Pengungkit dan Massa Pelampung. Skripsi. Jurusan Teknik Mesin FTI–ITS, Surabaya.
- Marquis, L., Kramer, M. M., Kringelum, J., Chozas, J. F. and Helstrup, N. E. (2012)
  'Introduction of Wavestar Wave Energy Converters at the Danish offshore wind power plant Horns Rev 2', 4<sup>th</sup> International Conference on Ocean Energy, 2(December), pp. 2–7.
- Masjono. (2012). 'Desain dan simulasi konverter energi gelombang laut sebagai pembangkit tenaga listrik', *Jurnal Ilmiah Elite Elektro*, 3(2), pp. 113–118.
- Masjono., Manjang, S., Suriamiharja, D. A., and Thahaa, M. A. Modelling of One-Way Gears Wave Energy Converter for Irregular Ocean Waves to Generate Electricity. *Jurnal Teknologi*. 78: 5–7 (2016) 37–41. ISSN 2180– 3722
- Morris-Thomas, M. T., Irvin, R. J. and Thiagarajan, K. P. (2007) 'An investigation into the hydrodynamic efficiency of an oscillating water column', *Journal* of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 129(4), pp. 273–278. doi: 10.1115/1.2426992.
- Mukhtasor. 2012. Pengembangan Energi Laut di Indonesia. Jakarta: Asosiasi Energi Laut Indonesia (ASELI).
- Mukhtasor, Susilohadi, Erwandi, Pandoe, W., Iswadi, A., Firdaus, A. M., Prabowo,
  H., Sudjono, E., Prasetyo, E. dan Iluhade, D. 2014. *Potensi Energi Laut Indonesia*. Badan Litbang Kementrian Energi dan Sumberdaya Mineral (ESDM) dan Asosiasi Energi Laut Indonesia (ASELI).

- Mueller, M. A., & Baker, N. J. (2005). Direct drive electrical power take-off for offshore marine energy converters. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, *Part A: Journal of Power and Energy*, 219(3), 223–234. doi:10.1243/095765005x7574.
- Muetze, A., and Vining, J.G. Ocean Wave Energy Conversion A Survey, Conference Paper in Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society November 2006 doi: 10.1109/IAS.2006.256715.
- Mutsuda, H., Rahmawati, S., Taniguchi, N., Nakashima, T., & Doi, Y. (2019).
  Harvesting ocean energy with a small-scale tidal-current turbine and fish aggregating device in the Indonesian Archipelagos. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 35, 160–171. https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.07.001.
- Mustapa, M. A., Yaakob, O. B., Ahmed, Y. M., Rheem, C. K., Koh, K. K. and Adnan, F. A. (2017) 'Wave energy device and breakwater integration: A review', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier Ltd, pp. 43–58. doi: 10.1016/j.rser.2017.03.110.
- Neill, S. P., & Hashemi, M. R. (2018). Wave Energy. Fundamentals of Ocean Renewable Energy, 107–140. doi:10.1016/b978-0-12-810448-4.00005-7.
- Nuh, A. F., dan Hendrowati W. Studi Eksperimental Energi Listrik yang Dihasilkan oleh Mekanisme Ocean Wave Energy Harvester Tipe Pelampung Bola dengan Metode Cantilever Piezoelectric. *Jurnal Teknik ITS*. Vol. 5 No. 2 (2016) ISSN: 2337–3539.
- O'Sullivan, D., Mollaghan, D., Blavette, A., Alcorn, R. (2010). Dynamic characteristics of wave and tidal energy converters & a recommended structure for development of a generic model for grid connection. Technical Report, International Energy Agency Implementing Agreement on Ocean Energy Systems.
- Pamungkas, Y., Ulum, M., Noerpamoengkas, A. Study Eksperimental Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut Metode Mekanis Apung Menggunakan Sistem Transmisi Sproket dan Variasi Panjang Lengan. Seminar Nasional

*Sains dan Teknologi Terapan VII*. Institut Teknologi Adhi Tama, Surabaya 2019 ISSN (print): 2686–0023.

- Pecher, A., and Kofoed, J. P. (2017), Handbook of Ocean Wave Energy, Ocean Engineering & Oceanography 7, doi 10.1007/978-3-319-39889-1\_6.
- PT PLN (Persero). Diseminasi RUPTL 2019-2028 melalui Keputusan Menteri ESDM No. 39K/20/MEM/2019 Tanggal 20 Februari 2019. Materi presentasi dan disajikan pada Tanggal 18 Maret 2019.
- Pratikto, W. A., Suntoyo., Solikhin., dan Kriyo, S. 2013. *Struktur Pelindung Pantai*. Surabaya: ITS Press, 234 hlm.
- Previsic, M., Bedard, R., Hagerman, G., Siddiqui, O. (2004). System level design, Performance and costs for San Francisco California Pelamis offshore wave power plant, E2I EPRI Global— 006A—SF report.
- Purba, N., Kelvin, J., Annisaa, M., and Teliandi, D. Preliminary research of using ocean currents and wind energy to support lighthouse in small island, Indonesia. *Energy Procedia* 2014; 47:204–10.
- Purba, N., Kelvin, J., Sandro, R., Gibran, S., Permata R. A., Maulida, F., Martasuganda, M. K. Suitable locations of ocean renewable energy (ORE) in Indonesia region GIS approached. *Energy Procedia* 2015; 65:230–8.
- Quirapas, M. A. J. R., Lin, H., Abundo, M. L. S., Brahim, S., and Santos, D. (2015).
  "Ocean renewable energy in Southeast Asia: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 799–817.
- Rahmawati, S., Matsuda, H., & Doi, Y. (2016). Numerical Estimation for Tidal-Current Energy Resources in Indonesia. Proceedings of the Twenty-Sixth (2016) International Ocean and Polar Engineering Conference, 1, 519– 527.
- Rahmawati, S., Mutsuda, H., Doi, Y., & Moriyama, Y. (2018). Characteristics of a fish aggregating device with ocean energy harvester. *Journal of Marine Science and Technology (Japan)*, 23(3), 435–452. https://doi.org/10.1007/s00773-017-0482-6.
- Rao, S. S. (2011). 'Mechanical Vibrations Fifth Edition', Prentice Hall.

- Reeve, D., Chadwick, A., & Fleming, C. (2018). 'Wave Theory', in *Coastal* engineering: Processes, theory and design practice, 3rd edition. (pp. 21– 72). Taylor & Francis Group.
- Rodríguez, C.A., Rosa-Santos, P., and Taveira-Pinto, F. (2018). 'Assessment of damping coefficients of power take-off systems of wave energy converters: a hybrid approach'. *Journal of Energy*. S0360– 5442(18)32447–2.
- Salmon, R. (2002) Introduction to ocean waves, San Diego, California, Scripps Institution of Oceanography University of California. doi: 10.1146/annurev.fl.11.010179.002153.
- Sanada, M., Inoue, Y., and Morimoto, S. (2012). Generator Design and Characteristics in Direct-Link Wave Power Generating System Considering Appearance Probability of Waves. Dept. of Electrical and Information Systems, College of Engineering, Osaka Prefecture University.
- Santoso, Muhammad. 2015. Studi Eksperimen dan Analisa Energi Listrik yang Dihasilkan oleh Mekanisme PLTGL Tipe Pelampung Silinder dengan Variasi Inersia Lengan dan Ketinggian Prototipe terhadap Permukaan Air. Skripsi. Jurusan Teknik Mesin FTI–ITS.
- Saputri, Z. N. (2014). Aplikasi Pengenalan Suara Pengendali Peralatan Listrik Berbasis Arduino UNO. *Skripsi*. Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya.
- Sheng, W. and Lewis, A. (2012) 'Assessment of Wave Energy Extraction From Seas: Numerical Validation', *Journal of Energy Resources Technology*. ASME International, 134(4). doi: 10.1115/1.4007193.
- Shi, H., Cao, F., Liu, Z. and Qu, N. (2016) 'Theoretical study on the power takeoff estimation of heaving buoy wave energy converter', *Renewable Energy*. Elsevier Ltd, 86, pp. 441–448. doi: 10.1016/j.renene.2015.08.027.
- Shi, H., Liu, Z. and Gao, R. (2012) 'Numerical investigation on combined Oscillating Body Wave Energy Convertor', in Program Book - OCEANS 2012 MTS/IEEE Yeosu: The Living Ocean and Coast - Diversity of Resources and Sustainable Activities. doi: 10.1109/OCEANS-Yeosu.2012.6263630.

- Sorensen, R. M. (2006). '*Basic Coastal Engineering 3th Edition*'. New York: Springer Science + Business Media, Inc.
- Sorensen, R. M. (1997) 'Two-Dimensional Wave Equations and Wave Characteristics', in *Basic Coastal Engineering*. Springer US, pp. 9–52. doi: 10.1007/978-1-4757-2665-7\_2.
- Suarga. (2012). Algoritma dan Pemrograman. Yoyakarta (ID): Andi Offset.
- Sugianto, D. N., Kunarso, Helmi, M., Alifdini, I., Maslukah, L., Saputro, S., ... Endrawati, H. (2017). Wave energy reviews in Indonesia. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*.
- Susanto, I. M., 2015. Studi Karakteristik Energi Listrik yang Dihasilkan Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut (PLTGL) Metode Pelampung dengan Variasi Dimensi Pelampung dan Panjang Lengan. Thesis. Jurusan Teknik Mesin FTI–ITS.
- Tasai, F. Formula for Calculating Hydrodynamic Force on a Cylinder Heaving in the Free Surface, (N-Parameter Family), Technical Report, Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Japan, 1960, Vol. VIII, No 31.
- Tasai, F. Hydrodynamic Force and Moment Produced by Swaying and Rolling Oscillation of Cylinders on the Free Surface, Technical Report, Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Japan, 1961, Vol. IX, No 35.
- Têtu, A. (2017). 'Power Take-Off Systems for WECs', in book: Handbook of Ocean Wave Energy 7. Springer Open, pp 203 – 220. doi: 10.1007/978-3-319-39889-1\_8.
- Todalshaug, J. H. (2016). 'Hydrodynamic of WECs'. *in book: Handbook of Ocean Wave Energy 7.* Springer Open, pp 139 – 158.
- Toffoli, A., Elzbieta., & Bitner-Gregersen, M. (2017). Types of Ocean Surface Waves, Wave Classifiation. *Encyclopedia of Maritime and Offshore Engineering*, John Wiley & Sons, Ltd. doi: 10.1002/9781118476406.emoe077.

Triatmodjo, Bambang. 1999. Teknik Pantai. Yogyakarta: Betta Offset.

- Urdhwareshe, R., Bakshi, Z., Naiknavare, P., & Naik, S. (2014). Design and Implementation of IMU Sensor Fusion and PID Control in Quadrotor. *IPASJ International Journal of Electronics & Communication (IIJEC)*, 2(9), 56–63.
- Ursell, F. *On the Heaving Motion of a Circular Cylinder on the Surface of a Fluid,* Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics, Vol. II, 1949.
- Weintrit, A. 2017. Advances in Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. London: Taylor & Francis Ltd.
- Winarto, Aris. (2017). Pengaruh Konfigurasi Terumbu Buatan Bentuk Hexagonal
   Pada Transmisi Gelombang. Skripsi. Departemen Teknik Kelautan, FTK
   ITS, Surabaya.
- Yang, L. and Moan, T. (2011) 'Dynamic analysis of wave energy converter by incorporating the effect of hydraulic transmission lines', *Ocean Engineering*, 38(16), pp. 1849–1860. doi: 10.1016/j.oceaneng.2011.09.010.
- Yang, C., and Zhang, Y. (2018). Numerical study of hydrodynamic behavior and conversion efficiency of a two-buoy wave energy converter. *Springer.*, 30(2): 235–248.
- Yang, S., He, H., Chen, H., Wang, Y., Li, H., & Zheng, S. (2019). Experimental study on the performance of a floating array-point-raft wave energy converter under random wave conditions. *Renewable Energy*, 139, 538– 550. https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.02.093.
- Yoshida, T., Sanada, M., Morimoto, S., Inoue, Y. (2010). 'Study offlywheel energy storage system for power leveling of wave power generation system'. *In: Proceedings of the 15th International Conference on Electrical Machines and Systems*, pp. 1–5.
- Yue, H., Rafael, W., Cecilia, B. Review on electrical control strategies for wave energy converting system, *Renew. Sustain. Energy* Rev. 31 (2014) 329– 342.
- Yusnitasari, Y. dan Hendrowati, W. (2012). 'Studi eksperimen dan analisa energi listrik yang dihasilkan mekanisme PLTGL metode pelampung apung

dengan variasi pembebanan dan panjang lengan'. *Jurnal Teknik POMITS* Vol. 1, No. 2, ISSN: 2301–9271.

- Zang, Z., Zhang, Q., Qi, Y. and Fu, X. (2018) 'Hydrodynamic responses and efficiency analyses of a heaving-buoy wave energy converter with PTO damping in regular and irregular waves', *Renewable Energy*. Elsevier Ltd, 116, pp. 527–542. doi: 10.1016/j.renene.2017.09.057.
- Zhang, D. hai, Li, W., Zhao, H. tao, Bao, J. wei and Lin, Y. gang (2014) 'Design of a hydraulic power take-off system for the wave energy device with an inverse pendulum', *China Ocean Engineering*. Springer Verlag, 28(2), pp. 283–292. doi: 10.1007/s13344-014-0023-6.
- Zuo, J., Wang, Z. and Zhu, Y. (2017) 'Electrical power prediction based on oscillating buoy wave energy converter', in 2016 International Conference on Smart Grid and Clean Energy Technologies, ICSGCE 2016. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 226–229. doi: 10.1109/ICSGCE.2016.7876058.

## LAMPIRAN

LAMPIRAN A. Data Probe Eksperimen



**Gambar A1.** Plot Grafik Hasil Pembangkitan Gelombang yang Terbaca oleh *Wave Probe* untuk Input H = 23 cm, T = 1.2 s dan H = 25 cm, T = 1.2 s



**Gambar A2.** Plot Grafik Hasil Pembangkitan Gelombang yang Terbaca oleh *Wave Probe* untuk Input H = 23 cm, T = 1 s dan H = 25 cm, T = 1 s

"Halaman ini sengaja dikosongkan"

LAMPIRAN B. Program MATLAB untuk Mencari Rata-Rata Tinggi Gelombang dan Periode Dari Probe

%Program to Find Wave Data
close all
clear
clc
```
num = xlsread('Olah Wave.xlsx');
iwl = num(:,2);
w=iwl;
interval=0.04;
t=linspace(interval,length(w)*interval,length(w));
n=w-mean(w);
k=1: (length(n) - 1);
p=find(sign(n(k)) == -1 \& sign(n(k+1)) == 1);
% p=find(sign(n(k))==1 & sign(n(k+1))==-1); Zero-Down Crossing
for z=1:length(p)-1;
Periods(z)=interval*(p(z+1)-p(z));
maxpos(z) = max(n(p(z)+1:p(z+1)));
maxneg(z) = min(n(p(z)+1:p(z+1)));
Heights=maxpos-maxneg;
end
if sign(n(end))~=0
    Heights=Heights(1:end-1);
    Periods=Periods(1:end-1);
end
data=[Heights', Periods'];
[H,A]=(sort(data(:,1), 'descend'));
DAT=data(A,:);
T=DAT(:, 2);
SortedH=sort(Heights, 'descend');
%Calculate the Wave Parameter
Hz=mean(Heights)/10;
Tz=mean(Periods);
```

LAMPIRAN C. Program MATLAB untuk Mencari Konstanta Hidrodinamik

```
close all;
H0i = [0.2 0.4 0.6 1 1.2 1.4 1.8 2.2];
%H0i =1;
for i=1:length(H0i)
     H0 =H0i(i);%0.4*i;
```

```
SIG =0.5;%0.5*i;
    XIBU=1.5;
    XIBL=0.01;
    JJ =80;
    %XIBU=0.2; %XIBL=0.1; %JJ =2;
    ut2d2(H0,SIG,XIBU,XIBL,JJ);
             = fopen('test2.txt','r');
    fid
    [ttdat]=fscanf(fid, '%f\n', [5, inf]);
    ttk=ttdat';
    [b,c]=size(ttk);
    fclose(fid);
    KB2=ttk(2:3:end,1);
    CoAMHeave=ttk(2:3:end,3);
    CoABHeave=ttk(2:3:end,2);
    CoANHeave=ttk(2:3:end,4);
    plot(KB2,CoAMHeave/(1/8*pi*4),'r');axis([0 2 0.2 inf]);
    title(['Beta = ',num2str(SIG)],'Fontsize',13)
ylabel('Konstanta Massa Tambah "C"','FontSize',13)
    xlabel('Omega^2 Bn/2g', 'FontSize', 13)
    %plot(KB2,CoABHeave,'b');axis([0 2 0 inf]);
    %title(['Beta = ',num2str(SIG)],'Fontsize',13)
    %ylabel('RAO','FontSize',13)
    %xlabel('Omega^2 Bn/2g','FontSize',13)
    %plot(KB2,CoANHeave,'r');
    %title(['Beta = ',num2str(SIG)],'Fontsize',13)
    %ylabel('Konstanta Redaman', 'FontSize',13)
    %xlabel('Omega^2 Bn/2g','FontSize',13)
    CoAMSway=ttk(1:3:end,3);
    CoABSway=ttk(1:3:end,2);
    CoANSway=ttk(1:3:end,4);
    %plot(KB2,CoAMSway,'r');axis([0 2 0 inf]);
    %plot(KB2,CoANSway,'b');
    CoAMRoll=ttk(3:3:end,3);
    CoABRoll=ttk(3:3:end,2);
    CoANRoll=ttk(3:3:end,4);
    %plot(KB2,CoAMRoll,'b');
    hold on;
    %HeaveAM(:,i) = CoAMHeave/(1/8*pi*4);
    %HeaveAB(:,i) = CoABHeave;
    %HeaveAN(:,i) = CoANHeave;
end
grid;
```

LAMPIRAN D. Grafik Validasi MATLAB 7.0 dengan Konstanta Lewis Form





**Gambar D1.** Validasi Konstanta Massa Tambah "C" untuk  $\beta_n = 0.5$ 



2

1.8

1.2 1.4 1.6

0.8 1 1.2 Omega<sup>2</sup> Bn/2g

0 0.2 0.4

0.6 0.8

0

0.2 . 0.4 0.6

0.8 ω,"μ, 2g 1.0 1.2 1.4 1.6



**Gambar D3.** Validasi Konstanta Massa Tambah "C" untuk  $\beta_n = 0.7$ 







**Gambar D5.** Validasi Konstanta Massa Tambah "C" untuk  $\beta_n = 0.9$ 



**Gambar D6.** Validasi Konstanta Massa Tambah "C" untuk  $\beta_n = 1$ 





**Gambar D7.** Validasi Konstanta *Amplitude Ratio* " $\overline{A}$ " untuk  $\beta_n = 0.5$ 

**Gambar D8.** Validasi Konstanta *Amplitude Ratio* " $\overline{A}$ " untuk  $\beta_n = 0.6$ 



**Gambar D9.** Validasi Konstanta *Amplitude Ratio* " $\overline{A}$ " untuk  $\beta_n = 0.7$ 











**Gambar D12.** Validasi Konstanta *Amplitude Ratio* " $\overline{A}$ " untuk  $\beta_n = 1$ 



## LAMPIRAN E. Desain untuk Fabrikasi DMDS - Oscillating Buoy WEC

Gambar E1. Desain 2D DMDS – Oscillating Buoy WEC



Gambar E2. Desain Disc dan Gear Transmisi



Gambar E3. Desain Poros Transmisi



Gambar E4. Desain Gearbox 1:10.56



Gambar E5. Desain Rumah Seal dan Bearing Gearbox



Gambar E6. Desain Roda Gigi Gearbox



Gambar E7. Desain Poros Transmisi Gearbox



Gambar E8. Desain Casing Gearbox

## 

## LAMPIRAN F. Dokumentasi Eksperimen

Gambar F1. Dokumentasi Eksperimen

## **BIODATA PENULIS**



Penulis bernama **Rizki Mendung Ariefianto**, yang lahir di Lumajang, 27 September 1995. Penulis menempuh pendidikan formal dimulai dari SDN Sumbermujur 1 (lulus tahun 2007), kemudian melanjutkan sekolah menegah pertama di SMPN 1 Candipuro (lulus tahun 2010), kemudian lulus dari SMAN 2 Lumajang pada tahun 2013, dan lulus dari sarjana Teknik Elektro ITS Surabaya pada

tahun 2018 dengan bidang keahlian Teknik Sistem Tenaga Listrik khususnya Konversi Energi Terbarukan. Pada awal 2019 penulis melanjutkan pendidikan magister di Departemen Teknik Kelautan dengan mengambil konsentrasi Teknik Manajemen dan Energi Laut.

Di luar aktivitas sebagai mahasiswa, penulis lebih banyak menghabiskan waktu dengan keluarga, kegiatan pendidikan – keagamaan di pesantren, dan beraktivitas sebagai Kepala Madrasah di MTs Muhyiddin Qur'aniy sejak tahun 2019. Dalam bidang *research*, penulis juga ikut andil membantu dosen untuk mengerjakan penelitian tentang konverter energi gelombang laut dengan sistem mekanik dan terlibat dalam pengabdian masyarakat untuk studi potensi pembangkit listrik tenaga mikrohidro di Magetan. Untuk penelitian pribadi, penulis pernah menghasilkan karya baik dalam bentuk karya ilmiah maupun alat seperti distilator bertenaga *hybrid* matahari-angin, pendingin ikan bertenaga surya terkontrol, kapal tradisional *hybrid* matahari-angin-ombak-air laut, konverter energi gelombang laut tipe *buoy–piston*, konverter energi gelombang laut tipe *rack–buoy*, *Z-Source inverter* untuk aplikasi pembangkit listrik tenaga mikrohidro dan desain pembangkit listrik tenaga mikro hidro tipe turbin *crossflow*.

Dalam kesempatan ini, penulis bersyukur Alhamdulillah karena dapat menyelesaikan tesis yang berjudul "**Studi Eksperimen Konverter Gelombang Laut Tipe Pelampung Berbasis** *Direct Mechanical Drive System* (DMDS)" dengan baik. Semoga tesis ini dapat memberikan kontribusi positif terhadap ilmu pengetahuan tentang dunia kelautan. Akhir kata penulis mengucapkan terimakasih kepada semua pihak yang membantu selama ini. Jika ada saran dan kritik dapat menghubungi email cakmendung97@gmail.com atau WA 081228548237.