



TUGAS AKHIR - ME184834

**STUDI PERANCANGAN COMBINED MARINE POWER PLANT
BERBASIS KOMBINASI GORLOV HELICAL TURBINE DENGAN
LINEAR GENERATOR DI SELAT SUNDA**

Danar Adi Irfanto

NRP 04211640000065

Dosen Pembimbing

Indra Ranu Kusuma, S.T., M.Sc.

Juniarko Prananda, S.T., M.T

**DEPARTEMEN TEKNIK SISTEM PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2020**

“Halaman ini sengaja dikosongkan”



TUGAS AKHIR

STUDI PERANCANGAN *COMBINED MARINE POWER PLANT* BERBASIS KOMBINASI *GORLOV HELICAL TURBINE* DENGAN *LINEAR GENERATOR* DI SELAT SUNDA

DANAR ADI IRFANTO
NRP 04211640000065

DOSEN PEMBIMBING
Indra Ranu Kusuma, S.T., M.Sc.
Juniarko Prananda, S.T., M.T

DEPARTEMEN TEKNIK SISTEM PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2020

“Halaman ini sengaja dikosongkan”



BACHELOR THESIS - ME184834

**DESIGN STUDY OF COMBINED MARINE POWER PLANT BASED ON
GORLOV HELICAL TURBINE AND LINEAR GENERATOR
COMBINATION IN SUNDA STRAIT**

**DANAR ADI IRFANTO
NRP 04211640000065**

SUPERVISOR

**Indra Ranu Kusuma, S.T., M.Sc.
Juniarko Prananda, S.T., M.T**

**DEPARTMENT OF MARINE ENGINEERING
FACULTY OF MARINE TECHNOLOGY
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2020**

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LEMBAR PENGESAHAN

**STUDI PERANCANGAN COMBINED MARINE POWER
PLANT BERBASIS KOMBINASI *GORLOV HELICAL TURBINE*
DENGAN *LINEAR GENERATOR* DI SELAT SUNDA**

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar sarjana
teknik pada:

Bidang studi *Marine Electrical and Automation System* (MEAS)

Program Studi S-1 Departemen Teknik Sistem Perkapalan

Fakultas Teknologi Kelautan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Disusun oleh :

DANAR ADI IRFANTO

04211640000065

Mengetahui/menyetujui

Dosen Pembimbing

1. Indra Ranu Kusuma, S.T., M.Sc

NIP. 1979 0327 2003 121001



2. Juniarko Prananda, S.T., M.T

NIP: 1990 0605 2015 041001



Agustus 2020

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LEMBAR PENGESAHAN

**STUDI PERANCANGAN *COMBINED MARINE POWER PLANT*
BERBASIS KOMBINASI *GORLOV HELICAL TURBINE* DENGAN
LINEAR GENERATOR DI SELAT SUNDA**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Marine Electrical and Automation System (MEAS)
Program Studi S-1 Departemen Teknik Sistem Perkapalan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Penulis:

Danar Adi Irfanto

NRP. 0421164000065

Disetujui Oleh,
Kepala Departemen Teknik Sistem Perkapalan



Beny Cahyono, S.T., M.T., Ph.D
NIP. 197903192008011008

**SURABAYA
AGUSTUS, 2020**

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

Studi Perancangan *Combined Marine Power Plant* Berbasis Kombinasi *Gorlov Helical Turbine* dengan *Linear Generator* di Selat Sunda

Nama Mahasiswa : Dinar Adi Irfanto
NRP : 04211640000065
Dosen Pembimbing : Indra Ranu Kusuma, S.T., M.Sc
Juniarko Prananda, S.T., M.T

ABSTRAK

Permintaan listrik diperkirakan meningkat dengan laju pertumbuhan 8,8% per tahun. Pertumbuhan ini akan mendorong peningkatan permintaan listrik dari 160 TWh pada tahun 2011 menjadi 792 TWh pada tahun 2030. Umumnya energi listrik dihasilkan dari tenaga diesel, air dan energi panas bumi. Namun, dalam pengembangannya masih terdapat banyak kendala [1]. Disisi lain, Indonesia memiliki potensi energi yang besar di lautnya yaitu sebesar sebesar 41 gigawatt yang dapat menghasilkan energi listrik sebesar 240.000 megawatt [2]. Selain itu, pada banyak titik pantai di Indonesia memiliki gelombang laut yang relatif tinggi sehingga berpotensi untuk dimanfaatkan sebagai sumber tenaga listrik [3]. Oleh karenanya, dalam penelitian ini penulis merancang sebuah sistem pembangkit listrik mengapung yang memanfaatkan kombinasi arus laut dan gelombang laut untuk konversi energinya. Arus laut akan dikonversi menjadi listrik dengan memanfaatkan *Gorlov Helical Turbine* yang mampu menerima arus laut dengan minimal kecepatan 0,5 m/s [4]. Sementara itu, gelombang laut akan dikonversikan menjadi listrik menggunakan *linear generator* dengan memanfaatkan gerak dari bola yang dipasang. Dari hasil simulasi computational fluid dynamic dan analisis matematis didapatkan daya listrik yang dihasilkan oleh gorlov helical turbine yaitu sebesar 34,638 kW. Sedangkan daya yang dihasilkan oleh linear generator dapat mencapai 14,296 kW. Sehingga total daya listrik yang dapat dihasilkan oleh platform ini yaitu sebesar 48,934 kW.

Kata Kunci : Energi terbarukan, *Gorlov Helical Turbine*, *Linear Generator*, Selat Sunda

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

Design Study of Combined Marine Power Plant Based on Gorlov Helical Turbine and Linear Generator Combination in Sunda Strait

Student Name : Danar Adi Irfanto
NRP : 04211640000065
Supervisor : Indra Ranu Kusuma, S.T., M.Sc
Juniarko Prananda, S.T., M.T

ABSTRACT

The demand for electricity is increasing with a growth rate of 8.8% per year. This growth will boost the increase in electricity demand from 160 TWh in 2011 to 792 TWh in 2030. The use of electrical energy generated from diesel, air and geothermal energy. However, in its development there are still many features [1]. On the other hand, Indonesia has a large energy potential in its sea, which is 41 gigawatts which can produce 240,000 megawatts of electricity [2]. In addition, many coastal points in Indonesia have relatively high sea waves making it possible to use them as a source of electricity [3]. Therefore, in this study the authors designed a floating power generation system that utilizes ocean currents and ocean waves to convert its energy. Ocean currents will become electricity by utilizing the Gorlov Helical Turbine which is capable of receiving ocean currents with a minimum speed of 0.5 m / s [4]. Meanwhile, ocean waves will be converted into electricity using a linear generator by utilizing the means of the mounted ball. From the simulation results of computational fluid dynamics and mathematical analysis, the electric power generated by the Gorlov helical turbine is 34,638 kW. While the power generated by a linear generator can reach 14,296 kW. So that the total electrical power that can be generated by this platform is 48,934 kW.

Keywords : Gorlov Helical Turbine, Linear Generator, Renewable Energy, Sunda Strait

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya curahkan atas kehadiran Allah Subhanahu Wa Ta'ala karena atas segala limpahan rahmat, taufik dan hidayah-Nya maka penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul **“Studi Perancangan Combined Marine Power Plant Berbasis Kombinasi Gorlov Helical Turbine dengan Linear Generator di Selat Sunda”**.

Dalam proses penyusunan tugas akhir ini penulis mendapatkan banyak bantuan dan motivasi dari berbagai pihak dari awal pengerjaan hingga akhirnya terselesaikan. Maka dari itu penulis ingin mengucapkan rasa terima kasih kepada :

1. Iriyanto Ali Yusnani dan Naning Apriyanti selaku orangtua penulis yang selalu memberikan bantuan baik dalam bentuk do'a, materi, maupun motivasi.
2. Bapak Indra Ranu Kusuma, S.T., M.Sc dan Bapak Juniarko Prananda, S.T., M.T selaku dosen pembimbing Tugas Akhir penulis atas bimbingan ilmu dan arahannya kepada penulis.
3. Bapak Beny Cahyono, S.T., M.T., Ph.D selaku kepala Departemen Teknik Sistem Perkapalan, FTK, ITS.
4. Bapak A.A. Bagus Dinariyana Dwi P., S.T., MES., Ph.D selaku dosen wali selalu memberikan arahan dan motivasi selama penulis menempuh pendidikan dan perkuliahan.
5. Lilik Tri Wahyuni selaku sahabat penulis yang telah banyak memberikan dukungan moril selama masa perkuliahan dan penyelesaian tugas akhir ini.
6. Kepada keluarga besar Voyage'16, Trainer Keilmiah ITS *Batch 8*, Kemenristek “Argon” BEM ITS, *Marine Electrical and Automation System Laboratory*, Ikatan Mahasiswa Lumajang di Surabaya dan Kontrakan Anak Soleh yang telah menjadi keluarga yang selalu memberikan bantuan, dukungan serta semangat selama menempuh perkuliahan.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan tugas akhir ini masih jauh dari sempurna. Semoga tugas akhir ini dapat bermanfaat kepada para pembaca , bangsa dan negara.

Surabaya, Agustus 2020

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	i
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xix
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan.....	3
1.4 Manfaat Penelitian.....	3
1.5 Batasan Masalah	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Kondisi Terkini Pemenuhan Energi Baru Terbarukan di Indonesia.....	6
2.2 Energi Arus Laut	7
2.3 Energi Gelombang Laut.....	8
2.4 Gorlov Helical Turbine.....	9
2.5 <i>Linear Generator</i>	10
2.6 Generator Listrik.....	12
2.7 Jenis-jenis Generator AC.....	13
2.8 Gearbox	15
2.9 Penelitian Sebelumnya	16
2.9.1 <i>Power Generation from Sea Wave: An Approach to Create Renewable Energy</i>	16

2.9.2 <i>Design of a Gorlov Turbine for Marine Current Energy Extraction</i>	19
BAB 3 METODOLOGI PENULISAN	25
3.1 Diagram Alir.....	25
3.2 Penjelasan Detail Diagram Alir	26
3.2.1 Studi Literatur.....	26
3.2.2 Penentuan Dimensi Turbin dan Pembangkit Listrik.....	26
3.2.3 Perencanaan Desain.....	26
3.2.4 Simulasi <i>CFD</i> dan Analisis Matematis	27
3.2.5 Perhitungan Daya Listrik.....	28
3.2.6 Analisis data dan kesimpulan	29
BAB 4 ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN.....	32
4.1 Potensi Arus dan Gelombang Laut di Indonesia	32
4.2 Pemilihan Penempatan Aplikasi Pembangkit Listrik	35
4.3 Desain Pembangkit Listrik	36
4.3.1 Deskripsi Umum.....	36
4.3.2 Desain <i>Gorlov Helical Turbine</i>	38
4.3.3 Desain <i>Linear Generator</i>	38
4.3.4 Komponen Navigasi dan <i>Monitoring</i>	39
4.3.5 Analisis Stabilitas <i>Platform</i>	44
4.4 Alir Kerja Pembangkit Listrik	47
4.5 Simulasi <i>Computational Fluids Dynamic</i>	49
4.5.1 Simulasi <i>Gorlov Helical Turbine</i>	49
4.5.2 Simulasi <i>Linear Generator</i>	60
4.6 Perhitungan Daya Listrik.....	67
4.6.1 Perhitungan <i>Gorlov Helical Turbine</i>	67
4.6.2 Perhitungan <i>Linear Generator</i>	69
BAB 5 PENUTUP	73

5.1 Kesimpulan.....	73
5.2 Saran dan Rekomendasi.....	73
DAFTAR PUSTAKA	75
LAMPIRAN	82
Lampiran 1. Hasil Simulasi <i>Computational Fluids Dynamic</i>	82
Lampiran 2. Spesifikasi Detail Peralatan	86

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Properti Gelombang Laut.....	8
Gambar 2.2 Turbin Helix	9
Gambar 2.3 Efisiensi Turbin <i>Helix (Gorlov)</i>	9
Gambar 2.4 <i>Linear Generator</i> 3 Fasa	10
Gambar 2.5 Generator Listrik pada Pembangkit	12
Gambar 2.6 <i>Gearbox</i> pada mesin.....	15
Gambar 2.7 Tipe-tipe Energi Gelombang.....	16
Gambar 2.8 Desain Pembangkit Energi Gelombang	17
Gambar 2.9 Analisis Biaya dan Pendapatan Pembangkit Listrik.....	17
Gambar 2.10 Perbandingan Torsi Antara 2 Profil Blade.....	17
Gambar 2.11 Hasil Simulasi Turbin Heliks.....	19
Gambar 2.12 Pesebaran Tekanan pada Sudut 70° dengan Kecepatan Arus 1,2 m/s.....	20
Gambar 2.13 Turbin untuk Percobaan.....	21
Gambar 2.14 Perbandingan Antara Hasil Simulasi dengan Percobaan.....	22
Gambar 2.9 Analisis Biaya dan Pendapatan Pembangkit Listrik.....	22
Gambar 3.1 Flowchart Metodologi Penelitian.....	23
Gambar 3.2 Desain Pembangkit Listrik.....	25
Gambar 4.1 Prakiraan Gelombang Laut di Selat Sunda	33
Gambar 4.2 Desain Pembangkit Listrik.....	34
Gambar 4.3 (a) <i>Gorlov Helical Turbine</i> ; (b) <i>Linear Generator</i>	34
Gambar 4.4 (a) <i>Gorlov Helical Turbine</i> ; (b) <i>Mass Properties</i>	35
Gambar 4.5 (a) <i>Linear Generator</i> ; (b) <i>Mass Properties</i>	33
Gambar 4.6 Komponen Navigasi.....	36
Gambar 4.7 <i>Communication antena</i>	37

Gambar 4.8 Spesifikasi <i>Communication antena</i>	37
Gambar 4.9 Lampu Navigasi	38
Gambar 4.10 Antennas cellular satellite wifi.....	38
Gambar 4.11 Kamera	39
Gambar 4.12 Radar	40
Gambar 4.13 <i>Satellite Tracker</i>	40
Gambar 4.14 (a) <i>Platform</i> ; (b) <i>Mass Properties</i>	42
Gambar 4.15 (a) Ponton Atas; (b) <i>Volume Properties</i>	43
Gambar 4.16 (a) Ponton Bawah; (b) <i>Volume Properties</i>	43
Gambar 4.17 Alir Kerja Pembangkit Listrik.....	44
Gambar 4.18 <i>Linear Generator</i>	44
Gambar 4.19 <i>Air Reservoir</i>	45
Gambar 4.20 <i>Double Acting Cylinder</i>	45
Gambar 4.21 <i>Motor DC</i>	46
Gambar 4.22 Pesebaran Tekanan oleh Fluida pada Kecepatan 0,66 m/s	47
Gambar 4.23 Laju Aliran Fluida pada Kecepatan 0,66 m/s.....	48
Gambar 4.24 Grafik Hasil Simulasi pada Kecepatan 0,66 m/s.....	49
Gambar 4.25 Pesebaran Tekanan oleh Fluida pada Kecepatan 0,77 m/s	50
Gambar 4.26 Laju Aliran Fluida pada Kecepatan 0,77 m/s.....	50
Gambar 4.25 Grafik Hasil Simulasi pada Kecepatan 0,77m/s.....	51
Gambar 4.26 Pesebaran Tekanan oleh Fluida pada Kecepatan 0,88 m/s	51
Gambar 4.27 Laju Aliran Fluida pada Kecepatan 0,88 m/s.....	52
Gambar 4.28 Hasil Simulasi pada Kecepatan 0,88 m/s	53

Gambar 4.29 Pesebaran Tekanan oleh Fluida pada Kecepatan 0,99 m/s	53
Gambar 4.30 Laju Aliran Fluida pada Kecepatan 0,99 m/s.....	54
Gambar 4.31 Hasil Simulasi pada Kecepatan 0,99 m/s	55
Gambar 4.32 Pesebaran Tekanan oleh Fluida pada Kecepatan 1,11 m/s	55
Gambar 4.33 Laju Aliran Fluida pada Kecepatan 1,1 m/s.....	56
Gambar 4.34 Hasil Simulasi pada Kecepatan 1,1 m/s	57
Gambar 4.35 Tekanan pada Kecepatan 0,3 m/s.....	58
Gambar 4.36 Hasil Simulasi pada Kecepatan 0,3 m/s	59
Gambar 4.37 Tekanan pada Kecepatan 0,4 m/s.....	59
Gambar 4.38 Hasil Simulasi pada Kecepatan 0,4 m/s	60
Gambar 4.39 Tekanan pada Kecepatan 0,5 m/s.....	60
Gambar 4.40 Hasil Simulasi pada Kecepatan 0,5 m/s	61
Gambar 4.41 Tekanan pada Kecepatan 0,6 m/s.....	61
Gambar 4.42 Hasil Simulasi pada Kecepatan 0,6 m/s	62
Gambar 4.43 Tekanan pada Kecepatan 0,7 m/s.....	62
Gambar 4.44 Hasil Simulasi pada Kecepatan 0,7 m/s	63
Gambar 4.45 Spesifikasi Generator	60
Gambar 4.46 ENERSET PMG 100PV	64
Gambar 4.47 <i>Air Reservoir</i>	67
Gambar 4.48 Dimensi Air Reservoir	67
Gambar 4.49 Motor DC	68

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Variabel Simulasi CFD.....	28
Tabel 2. Perhitungan Daya Listrik GHT.....	28
Tabel 3. Data Arus dan Gelombang Laut Sejumlah Peraian di Indonesia.....	32
Tabel 4. Kecepatan Arus Laut per Bulan di Selat Sunda.....	35
Tabel 5. Hasil Simulasi pada Kecepatan 0,66 m/s.....	51
Tabel 6. Hasil Simulasi pada Kecepatan 0,77 m/s.....	53
Tabel 7. Hasil Simulasi pada Kecepatan 0,88 m/s.....	55
Tabel 8. Hasil Simulasi pada Kecepatan 0,99 m/s.....	57
Tabel 9. Hasil Simulasi pada Kecepatan 1,1 m/s.....	59
Tabel 10. Hasil Simulasi CFD.....	60
Tabel 11. Hasil Simulasi pada Kecepatan Gelombang 0,3 m/s.....	61
Tabel 12. Hasil Simulasi pada Kecepatan Gelombang 0,4 m/s.....	62
Tabel 13. Hasil Simulasi pada Kecepatan Gelombang 0,5 m/s.....	64
Tabel 14. Hasil Simulasi pada Kecepatan Gelombang 0,6 m/s.....	65
Tabel 15. Hasil Simulasi pada Kecepatan Gelombang 0,7 m/s.....	66
Tabel 16. Spesifikasi Generator yang Digunakan.....	68
Tabel 17. Hasil Perhitungan Daya Listrik Gorlov Helical Turbine.....	68
Tabel 18. Hasil Perhitungan Daya Listrik Linear Generator.....	68

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan energi listrik di Indonesia terus mengalami peningkatan sejalan dengan peningkatan pertumbuhan perekonomian di Indonesia. Permintaan listrik diperkirakan meningkat dengan laju pertumbuhan 8,8% per tahun. Pertumbuhan ini akan mendorong peningkatan permintaan listrik dari 160 TWh pada tahun 2011 menjadi 792 TWh pada tahun 2030. Permintaan listrik pada tahun 2011 terdistribusi pada berbagai sektor dengan bagian sebagai berikut, rumah tangga 43,6%, industri 32,0%, komersial 24,3% dan transportasi 0,06%. Umumnya energi listrik dihasilkan dari tenaga diesel, air dan energi panas bumi. Namun, dalam pengembangannya masih terdapat banyak kendala. Sehingga diperlukan alternatif lain untuk pengembangan sumber listrik yang terbarukan dengan memanfaatkan sumber daya alam yang tersedia [1]

Pada tahun 2030, bagian sektor komersial menjadi lebih tinggi dari sektor rumah tangga. Bagian sektor komersial 30,7% dan rumah tangga 27,4%, sedangkan bagian industri tetap yang tertinggi, sebesar 41,9%. Bagian transportasi turun menjadi 0,05% meskipun terjadi kenaikan 2 permintaan. Pemakaian energi listrik harus sesuai dengan kapasitas sumber energi listrik yang tersedia. Umumnya energi listrik dihasilkan dari tenaga diesel, air dan energi panas bumi. Namun, dalam pengembangannya masih terdapat banyak kendala. Sehingga diperlukan alternatif lain untuk pengembangan sumber listrik yang terbarukan dengan memanfaatkan sumber daya alam yang tersedia [1].

Nilai rata-rata rasio elektrifikasi provinsi di Indonesia pada tahun 2018 berada diatas 90%. Namun, dari sekian banyaknya provinsi di Indonesia, masih ada provinsi di bagian timur yang masih memiliki rasio elektrifikasi rendah dibawah 75%. Salah satu kendala dalam pengembangan pemenuhan energi listrik adalah kebanyakan pembangkit listrik masih bersifat konvensional menggunakan tenaga uap dan diesel yang kurang efisien dan juga menghasilkan emisi yang cukup tinggi. Oleh karenanya, pemerintah bersama dengan PT PLN mencanangkan

untuk lebih banyak mengembangkan dan memanfaatkan energi terbarukan. Pengembangan proyek energi terbarukan seperti panas bumi, angin, surya, biomass, sampah dan tenaga air didorong namun dengan tetap mempertimbangkan keekonomian (efisiensi harga) agar dapat mengurangi biaya pokok penyediaan (BPP) tenaga listrik. Diharapkan penggunaan energi terbarukan akan terpenuhi hingga 23% dari total kebutuhan listrik nasional pada tahun 2025 dan 31% pada tahun 2050 [5].

Disisi lain, Indonesia memiliki potensi energi yang besar di lautnya yaitu sebesar sebesar 41 gigawatt yang dapat menghasilkan energi listrik sebesar 240.000 megawatt [2]. Selain itu, pada banyak titik pantai di Indonesia memiliki gelombang laut yang relatif tinggi sehingga berpotensi untuk dimanfaatkan sebagai sumber tenaga listrik [3]. Oleh karenanya, dalam penelitian ini penulis merancang sebuah sistem pembangkit listrik mengapung yang memanfaatkan kombinasi arus laut dan gelombang laut untuk konversi energinya. Arus laut akan dikonversi menjadi listrik dengan memanfaatkan *Gorlov Helical Turbine* yang dipilih karena mampu menerima arus laut dengan minimal kecepatan 0,5 m/s [4]. Sementara itu, gelombang laut akan dikonversikan menjadi listrik menggunakan *Linear Generator* dengan memanfaatkan gerak dari bola yang dipasang. *Linear generator* dipilih karena memiliki struktur yang lebih sederhana daripada jenis pembangkit lain seperti *Oscillating Wave Column*. Sehingga kombinasi antara *Gorlov Helical Turbine* dengan *Linear Generator* akan cocok untuk digunakan pada *platform* pembangkit listrik ini.

Penelitian dari Chettiar, Narayan dan Goundar (2015) mengatakan bahwa dari hasil simulasi *Computational Fluids Dynamic*, dengan kecepatan arus laut sebesar 1,2 m/s maka *Gorlov Helical Turbine* menghasilkan torsi sebesar 2.9 Nm pada 40 rpm dan hasil simulasi tersebut mendekati hasil dari uji eksperimen. Sementara penelitian lain dari Niharman dan Sipahutar (2015) yang menggunakan *Gorlov Helical Turbine* sebagai pembangkit listrik untuk bendungan irigrasi, mendapatkan hasil bahwa turbin dapat menghasilkan daya hingga 13,699 watts dengan efisiensi sebesar 28,5% pada kecepatan arus air 0,85 m/s [7]. Sementara itu untuk pembangkit listrik *linear generator*,

penelitian dari Sekti dan Kusuma (2018) didapatkan rancangan generator linear magnet permanen dengan dimensi stroke 1,126 m dengan diameter stator 0,1209 m, menggunakan 4 silinder magnet permanen menghasilkan daya rata-rata sebesar 1510,8 Watt dan arus 2,7 A [8].

Pada penelitian ini akan dirancang desain dari pembangkit listrik tenaga arus dan gelombang laut beserta analisis konversinya. Pengaplikasian pembangkit listrik ini pada Selat Sunda dapat menjadi solusi efektif atas kebutuhan Energi Baru Terbarukan di Indonesia. Pengaplikasian pembangkit listrik ini juga merealisasikan program pemerintah yang sejalan dengan Sustainable Development Goals (SDGs) 2030 mengenai energi terbarukan .

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan di atas, penulis mengangkat rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana cara menciptakan desain pembangkit listrik terapung dengan memanfaatkan arus dan gelombang laut?
2. Bagaimana cara menghitung total kapasitas daya yang dihasilkan oleh pembangkit listrik?

1.3 Tujuan

Adapun tujuan yang ingin dicapai dari pembuatan gagasan tertulis ini adalah:

1. Menciptakan desain pembangkit listrik terapung dengan memanfaatkan arus dan gelombang laut.
2. Menghitung total daya listrik yang mampu dihasilkan oleh pembangkit listrik.

1.4 Manfaat Penelitian

1. Bagi Masyarakat :Memberikan solusi penanganan pemenuhan energi listrik yang ramah lingkungan melalui penerapan pembangkit listrik bagi masyarakat Indonesia.

2. Bagi Pemerintah : Memberikan solusi alternatif dalam pemenuhan energi listrik dengan konsep energi bersih yang sekaligus menjawab poin SDGs 2030 tentang energi terbarukan dan mandiri energi.

3. Bagi Akademisi : Memberikan informasi tentang potensi dan teknologi *combined renewable energy* pada pembangkit listrik alternatif untuk pemenuhan EBT di Indonesia.

1.5 Batasan Masalah

Untuk mencegah pembahasan yang meluas atau menyimpang dan memperjelas

pembahasan masalah, maka dibuat suatu batasan masalah. Ruang lingkup permasalahan yang akan dibahas dalam penulisan karya tulis ini, yaitu hanya kepada konsep dan desain *platform* pembangkit listrik yang memanfaatkan arus laut untuk mengkonversi energi. Maka ruang lingkup yang akan dibahas dalam tugas akhir ini adalah:

1. Pembangkit ini akan ditempatkan di Selat Sunda. Desain beserta simulasinya akan menyesuaikan keadaan dan data yang ada di lapangan. Untuk data arus laut, diambil nilai yang diambil yaitu 0,66 - 1,01 m/s serta dengan gelombang laut setinggi 0,3 - 1,7 sebagai asumsi nilai rata-rata selama satu tahun.
2. Desain 3D pembangkit listrik akan diciptakan dengan menggunakan *software Sketchup* dan *Lumion 4*. Sedangkan simulasi *Gorlov Helical Turbine* menggunakan metode *Computational Fluids Dynamic* menggunakan *Solidwork Flow Simulation*.
3. Penentuan jenis generator akan dilakukan setelah didapatkan torsi turbin hasil dari simulasi *CFD*.
4. Analisis hanya dilakukan mulai dari konversi energi dari turbin hingga penyimpanan daya pada baterai.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kondisi Terkini Pemenuhan Energi Baru Terbarukan di Indonesia

Pengembangan kapasitas pembangkit tenaga listrik diarahkan untuk memenuhi pertumbuhan beban, dan pada beberapa wilayah tertentu diutamakan untuk memenuhi kekurangan pasokan tenaga listrik. Pengembangan kapasitas pembangkit juga dimaksudkan untuk meningkatkan keandalan pasokan yang diinginkan, dengan mengutamakan pemanfaatan sumber energi setempat, terutama energi terbarukan. Pengembangan kapasitas pembangkit tenaga listrik dilaksanakan sesuai dengan kebijakan pemerintah, misalnya dalam pengembangan energi baru dan terbarukan (EBT), serta program 35.000 MW. Pengembangan pembangkit diupayakan secara optimal dengan prinsip biaya penyediaan listrik terendah (least cost), dengan tetap memenuhi kecukupan daya dan tingkat keandalan yang wajar dalam industri tenaga listrik [5].

Sejalan dengan kebijakan Pemerintah untuk lebih banyak mengembangkan dan memanfaatkan energi terbarukan, pengembangan proyek energi terbarukan seperti panas bumi, angin, surya, biomass, sampah dan tenaga air didorong namun dengan tetap mempertimbangkan keekonomian (efisiensi harga) agar dapat mengurangi biaya pokok penyediaan (BPP) tenaga listrik. Selain itu, pengembangan pembangkit energi terbarukan juga tetap memperhatikan keseimbangan supply-demand dan status kesiapan pengembangan pembangkit tersebut. Kebutuhan cadangan daya yang wajar dilihat dari kemampuan pembangkitpembangkit memasok tenaga listrik secara terus-menerus sesuai kriteria perencanaan. Dengan didorongnya pengembangan energi terbarukan oleh Pemerintah, maka pembangkit energi terbarukan sampai dengan 10 MW dapat tersambung langsung ke jaringan distribusi [5].

Selain itu, PLN juga mendorong penelitian dan pengembangan EBT lain seperti thermal solar power, arus laut, OTEC (ocean thermal energy conversion) dan fuel cell [5]. Hal itu juga didukung dengan potensi energi yang besar, terutama untuk energi yang tersimpan di laut

Indonesia [2]. Kebijakan Energi Nasional mempunyai sasaran bauran energi yang optimal sebagai berikut:

- Pada tahun 2025 peran energi baru dan energi terbarukan paling sedikit 23% sepanjang keekonomiannya terpenuhi, minyak bumi kurang dari 25%, batubara minimal 30%, dan gas bumi minimal 22%.
- Pada tahun 2050 peran energi baru dan energi terbarukan paling sedikit 31% sepanjang keekonomiannya terpenuhi, minyak bumi kurang dari 20%, batubara minimal 25%, dan gas bumi minimal 24%.

2.2 Energi Arus Laut

Pembangkit Listrik Tenaga Arus Laut (PLTAL) memanfaatkan energi arus laut sebagai sumber energi, arus laut yang merupakan energi kinetik dimanfaatkan untuk menggerakkan sudu turbin. Pengembangan teknologi konversi arus laut pada dasarnya mengadopsi prinsip kerja konversi energi angin yang telah berkembang. Secara garis besar teknologi yang dibutuhkan untuk membangkitkan listrik dari energi arus laut adalah turbin, *mooring*, sistem transmisi dan generator. Turbin diputar oleh arus laut, putaran turbin tersebut digunakan untuk membangkitkan energi listrik generator [9].

Arus permukaan merupakan gerakan mengalir suatu massa air yang dapat disebabkan oleh tiupan angin, perbedaan dalam densitas laut, maupun oleh gerakan bergelombang panjang, misalnya pasang surut. Di laut terbuka, arah dan kekuatan arus di lapisan permukaan sangat banyak ditentukan oleh angin. Arah arus permukaan memiliki hubungan yang erat dengan angin [10].

Oleh karena dibangkitkan angin, arah arus permukaan (atas) mengikuti arah angin yang ada. Khususnya di Asia Tenggara karena arah angin musim sangat terlihat perubahannya antara musim barat dan musim timur. Arus musim barat ditandai oleh adanya aliran air dari arah utara melalui laut Cina bagian atas, laut Jawa, dan laut Flores. Adapun musim timur sebaliknya mengalir dari arah selatan. Selain pergerakan arah arus mendatar, angin dapat menimbulkan arus air vertikal yang dikenal dengan upwelling dan

downwelling di daerah-daerah tertentu. Proses upwelling adalah suatu proses massa air yang didorong ke atas dari kedalaman sekitar 100 sampai 200 meter. Oleh karena air yang dari kedalaman lapisan belum berhubungan dengan atmosfer, maka kandungan oksigennya rendah dan suhunya lebih dingin dibandingkan dengan suhu air permukaan lainnya [10].

2.3 Energi Gelombang Laut

Gelombang laut adalah satu fenomena alam yang sering terjadi di laut. Gelombang laut merupakan peristiwa naik turunnya permukaan laut secara vertikal yang membentuk kurva/grafik sinusoidal [11]. Gelombang laut berbentuk gelombang transversal dengan membentuk lembah dan puncak yang berbeda dengan gelombang longitudinal yang mempunyai regangan dan rapatan. Gelombang sinusoidal atau gelombang transversal memiliki komponen tertentu. Besar kecilnya gelombang ditentukan oleh kecepatan angin, jarak antara angin yang merangsang terbentuknya gelombang dengan gelombang itu sendiri (fetch), kedalaman, serta topografi dari dasar laut. Jika gelombang berada jauh dari angin yang merangsangnya maka bentuknya akan sebagaimana gelombang reguler dan disebut sebagai swell [12].

Gelombang laut memiliki suatu energi (energi gelombang). Energi gelombang total adalah total energi kinetik dan energi potensial. Adapun energi potensial dapat dihitung menggunakan rumus sebagai berikut.

$$PE = m \cdot g \cdot \frac{y(x,t)}{2} \quad (1)$$

Dengan :

PE = energi potensial (J)

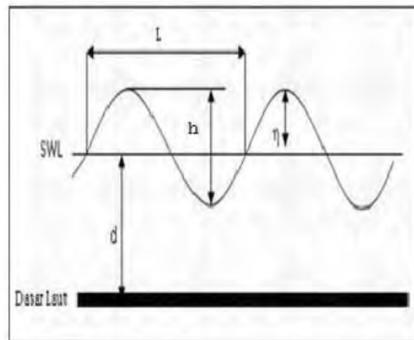
m = massa gelombang (kg)

g = gaya gravitasi (m/s²)

y = y(x,t) = tinggi dari dasar laut ke permukaan (d + η)

[13]

Gelombang laut memiliki properti seperti gelombang jenis lainnya, yaitu memiliki amplitudo, frekuensi, periode, dll. Hal tersebut ditunjukkan oleh gambar berikut ini.



Gambar 2.1 Properti Gelombang Laut

Keterangan gambar :

λ = panjang gelombang

h = tinggi gelombang

d = kedalaman

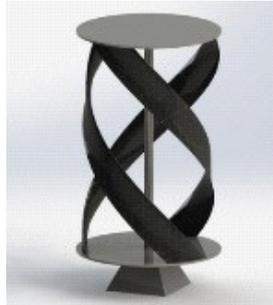
SWL = Sea Water Level

η = amplitudo gelombang

c = kecepatan gelombang

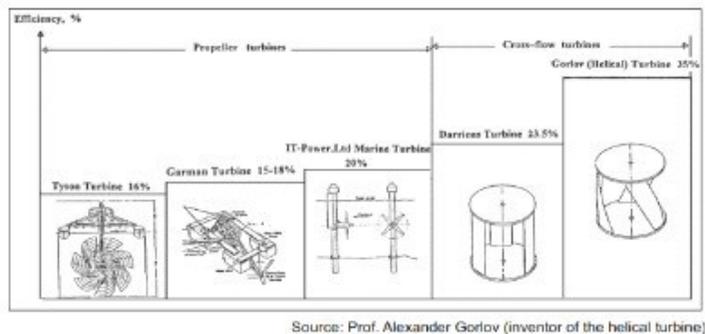
2.4 Gorlov Helical Turbine

Gorlov Helical Turbine atau turbin *helix* adalah turbin bertenaga arus laut yang diciptakan oleh Professor Alexander M. Gorlov. Turbin ini merupakan pengembangan dari turbin *Darrieus*, dimana turbin ini memiliki *foil* atau daun berbentuk helikal. Prinsip kerjanya sama dengan turbin *Darrieus*, yaitu memanfaatkan arus laut untuk menggerakkan turbin dan menghasilkan energi listrik. *Gorlov Helical Turbine* (GHT) secara khusus dirancang untuk aplikasi hidroelektrik dalam aliran air rendah yang mengalir bebas. Manfaat berikut ini membuat GHT sangat berguna untuk menghasilkan pembangkit listrik tenaga air [14].



Gambar 2.2 Turbin *Helix*

Turbin *helix* dipilih dikarenakan memiliki efektifitas paling tinggi jika dibandingkan turbin tipe lain, yaitu hingga 35% [4]. Turbin ini telah dipatenkan dalam serangkaian paten dari September 19, 1995 hingga 3 Juli 2001 dan memenangkan 2001 ASME Thomas A. Edison Paten Award.

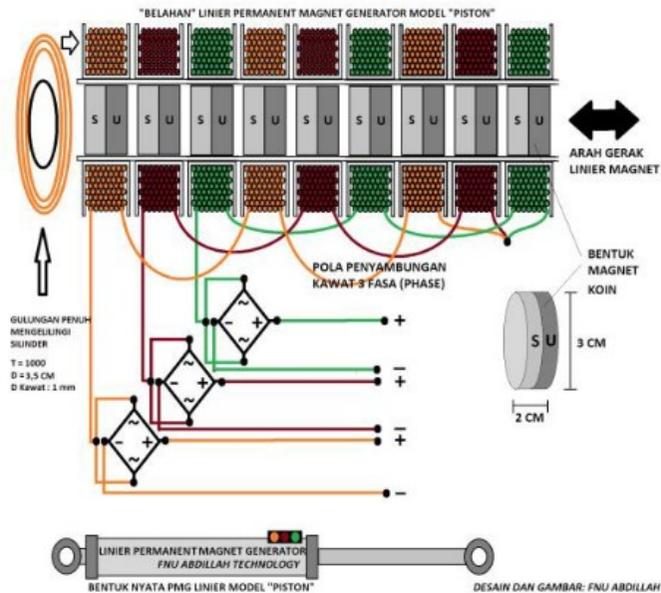


Gambar 2.3 Efisiensi Turbin *Helix (Gorlov)* [15]

2.5 Linear Generator

Linier generator atau generator gerakan linier adalah sebuah mesin listrik yang dapat menghasilkan energi listrik dengan cara mengonversinya dari gerakan linier. Kebanyakan dari linier generator menggunakan induksi magnetik. Dimana induksi magnetik digunakan untuk mengubah sebuah besi feromagnetik menjadi sebuah magnet buatan untuk menghasilkan fluks magnet yang nantinya akan ditangkap stator atau translator untuk menghasilkan energi listrik sesuai dengan hukum Faraday. Pada dasarnya cara dan prinsip kerja dari linier generator sama dengan generator pada umumnya, hanya berbeda pada gerakan yang menggerakkan translatornya. Dimana pada generator

konvensional menggunakan gerakan rotasi sedangkan pada linier generator menggunakan gerakan linier [16].



Gambar 2.4 *Linear Generator 3 Fasa* [16]

Pada konstruksi konvensional, sebuah linier generator hampir sama dengan sebuah motor listrik yang menghasilkan gerakan translasi. Tetapi pada generator operasionalnya dibalik dari konversi gerak menjadi listrik. Dari pernyataan diatas maka menurut desain system pembangkitnya linier generator dapat dibedakan menjadi 3 yaitu sebagai berikut :

a. *Linear Induction Machine*

Jenis yang ini sudah sangat konvensional dipakai di dunia industry. Hal ini dikarenakan pada jenis ini lebih simple desain untuk translatornya, khususnya untuk jenis sangkar tupai yang tidak membutuhkan slip rings atau brushes. karena untuk jenis generator masih jarang digunakan maka untuk mengubah motor jenis ini menjadi generator, maka kecepatan translatornya harus dapat melebihi kecepatan magnetic field stator. Agar mendapatkan gerakan yang memotong magnetic field stator. Generator yang berjenis linear induction seperti ini harus memiliki tahanan udara yang lebih besar daripada yang berjenis

rotary induction. Sedangkan untuk reaktansi pada kumparan eksitasinya harus lebih rendah. Sehingga dapat disimpulkan pada jenis ini arus eksitasi yang mengalir pada kumparan pembangkitnya harus lebih besar daripada generator desain rotor berputar.

b. *Field-Wound Synchronous Machine*

Field-wound synchronous machine atau lebih dikenal dengan mesin sinkron jarang sekali digunakan pada dunia industri karena mesin ini hanya untuk putaran yang tinggi dan tidak dapat digunakan pada power yang besar. Sehingga untuk mendesain generator dari mesin yang seperti ini sangat susah dan kurang efisien. Untuk menghasilkan listrik pada mesin ini juga harus menggerakkan translatornya dengan putaran yang tinggi pula karena kumparan pada statornya memutar seluruh translator. Pada umumnya untuk mengontrol arus eksitasi pada statornya lebih mudah pada mesin ini daripada pada mesin yang menggunakan induksi. Pada mesin ini voltase keluar yang dihasilkan lebih konstan dengan putaran yang konstan pula.

c. *Permanent Magnet Synchronous*

Sistem magnet permanen banyak digunakan pada mesin yang tidak mendapat suplai eksitasi, sehingga pada jenis mesin ini banyak menjadi alternatif untuk pembangkit tenaga yang sederhana. Untuk menghasilkan arus yang besar pada mesin permanen magnet harus menggunakan magnet dengan ukuran yang besar pula. Karena menggunakan magnet permanen, maka mesin ini menganut kaidah hukum Lorentz pada operasionalnya. Arah fluks yang masuk pada eksiter dan juga arah gerakan translasi berpengaruh pada arus yang dihasilkan oleh generator.

2.6 Generator Listrik

Generator adalah suatu peralatan yang berfungsi mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Prinsip kerja generator adalah berdasarkan induksi elektromagnetik, setelah rotor diputar oleh penggerak mula (*prime movers*), dengan demikian kutub-kutub yang ada pada rotor akan berputar. Jika kumparan kutub diberi arus searah maka pada permukaan kutub akan timbul medan magnet (garis-garis gaya fluks) yang berputar, kecepatannya sama dengan putaran kutub [17].

Secara umum, generator dibagi menjadi generator AC dan DC, berdasarkan jenis arus yang dihasilkan, yang digunakan dalam sistem pembangkit ini adalah generator DC, sesuai kebutuhannya untuk memenuhi kebutuhan listrik rumah tangga dan industri swasta. Setiap generator memiliki kapasitasnya sendiri yang disesuaikan dengan jumlah listrik yang akan dihasilkan. Untuk memilih kapasitas generator dalam menghasilkan energi listrik disesuaikan dengan perhitungan daya dari data hasil survei, diantara 500 Megawatt -1000 Megawatt. Kemampuan generator dalam menghasilkan listrik dinyatakan dalam Volt Ampere (VA) [17].



Gambar 2.5 Generator Listrik pada Pembangkit

2.7 Jenis-jenis Generator AC

2.7.1 Generator Sinkron

Generator sinkron (alternator) adalah mesin listrik yang digunakan untuk mengubah energi mekanik menjadi energi listrik dengan perantara induksi medan magnet. Dikatakan generator sinkron karena jumlah putaran rotornya sama dengan jumlah putaran medan magnet pada stator. Kecepatan sinkron ini dihasilkan dari kecepatan putar rotor dengan kutub-kutub magnet yang berputar dengan kecepatan yang sama dengan medan putar pada stator. Mesin ini tidak dapat dijalankan sendiri karena kutub-kutub rotor tidak dapat tiba-tiba mengikuti kecepatan medan putar pada waktu sakelar terhubung dengan

jala-jala. Generator sinkron mengkonversikan energi mekanik menjadi energi listrik. Adapun sumber dari energi mekanik tersebut adalah prime mover, baik mesin diesel, turbin uap, turbin gas, turbin air atau perangkat sejenis lainnya. Tegangan output dari generator sinkron adalah tegangan bolak-balik, karena itu generator sinkron disebut juga generator AC [18].

2.7.1.1 Generator Sinkron Satu Fasa

Prinsip kerja generator arus AC 1 fasa sebenarnya tidak berbeda dengan generator lainnya. Arus listrik AC (Alternating Current) merupakan arus listrik yang arahnya bolak-balik pada sebuah rangkaian listrik menurut sewa genset. Jika pada rangkaian listrik DC arus listrik mengalir dari kutub positif ke kutub negatif, lain halnya dengan rangkaian listrik AC dimana arus listrik bergerak secara periodik berbolak-balik arah dari kutub satu ke yang lainnya [18].

2.7.1.2 Generator Sinkron Tiga Fasa

Prinsip dasar generator arus bolak-balik menggunakan hukum Faraday yang menyatakan jika sebatang penghantar berada pada medan magnet yang berubah-ubah, maka pada penghantar tersebut akan terbentuk gaya gerak listrik. Prinsip kerja generator arus bolak-balik tiga fasa (alternator) pada dasarnya sama dengan generator arus bolak-balik satu fasa, akan tetapi pada generator tiga fasa memiliki tiga lilitan yang sama dan tiga tegangan outputnya berbeda fasa 120° pada masing-masing fasa. Jika pada sekeliling penghantar terjadi perubahan medan magnet, maka pada penghantar tersebut akan dibangkitkan suatu gaya gerak listrik (GGL) yang sifatnya menentang perubahan medan tersebut [19].

2.7.2 Generator Asinkron / Induksi

Mesin induksi ialah mesin listrik yang bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Mesin induksi bekerja berdasarkan perbedaan kecepatan putar antara stator dan rotor. Apabila kecepatan putar stator sama dengan kecepatan putar rotor ($=$), maka tidak ada tegangan yang terinduksi baik ke stator maupun ke rotor. Apabila kecepatan putar stator lebih besar daripada kecepatan rotor ($>$), maka tegangan akan terinduksi ke rotor sehingga mesin induksi beroperasi sebagai motor listrik. Apabila kecepatan putar rotor lebih besar daripada

kecepatan putar rotor (ω), maka tegangan akan terinduksi ke stator sehingga mesin induksi akan beroperasi sebagai generator listrik [20].

2.7.3 Generator *Self Excited*

Generator induksi dapat dioperasikan secara *stand alone* dimana tidak membutuhkan sistem daya yang ada / jala-jala sebagai eksitasi. Kebutuhan eksitasi diperoleh dari kapasitor yang dihubungkan pada terminal generator sehingga generator induksi ini disebut *Self Excited Induction Generator (SEIG)*. Tegangan yang terbangkit pada generator tergantung pada kecepatan rotor dan fluks. Nilai fluks yang dihasilkan bergantung pada nilai kapasitansi kapasitor pada *SEIG*. Untuk mendapatkan tegangan yang diharapkan, kapasitor harus mampu menyediakan daya reaktif dan arus magnetisasi sesuai dengan kebutuhan generator induksi. Penentuan nilai kapasitansi minimum yang dibutuhkan untuk membangkitkan tegangan dapat diperoleh dengan mencari titik perpotongan antara tegangan terminal kondisi tanpa beban dengan garis linier kurva kapasitor [21].

2.7.4 Generator *Separately Excited (Permanent Magnet Generator)*

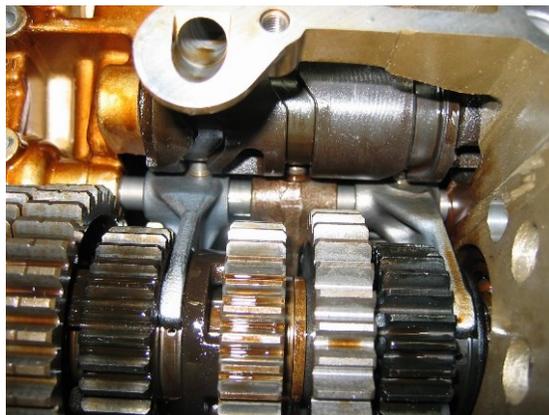
Pada *separately excitation system*, arus eksitasi awal diperoleh menggunakan PMG (*permanent magnet generator*). Pada proses produksi arus eksitasi selanjutnya, PMG membantu AVR dan exciter memproduksi arus eksitasi. *PMG (Permanent Magnet Generator)* terdiri dari dua bagian yaitu *PMG rotor* dan *PMG stator*. *PMG* menghasilkan tegangan yang dikirimkan ke *AVR* untuk dikirimkan kembali ke gulungan *exciter*. Tegangan yang dihasilkan *PMG* bersifat tetap, atau sesuai dengan kecepatan putaran penggerak generator tersebut. Jika pada *Self Excited Generator* gulungan *exciter* menghasilkan listrik sendiri untuk suplai ke gulungan *rotor*, sedangkan pada sistem *PMG excited generator*, gulungan *exciter* mendapatkan bantuan suplai tegangan dari *PMG*.

2.8 Gearbox

Gearbox merupakan suatu kumpulan roda gigi yang roda gigi mentransmisikan daya atau putaran dari satu poros ke poros yg lain. Pada *gearbox*, terjadi mekanisme perubahan torsi dan putaran, baik peningkatan atau penurunan. *Gearbox* banyak digunakan pada sistem

transmisi kendaraan bermotor, kapal laut, dan berbagai sistem yang membutuhkan *gearbox* [22].

Gearbox merupakan suatu komponen dari suatu mesin yang terdiri dari rumah untuk roda gigi. Komponen ini harus memiliki konstruksi yang tepat agar dapat menempatkan poros-poros roda gigi pada sumbu yang benar sehingga roda gigi dapat berputar dengan baik dengan sedikit mungkin gesekan yang terjadi. *Gearbox* dalam hal yang bersangkutan dengan bidang kebutuhan industri atau permesinan memiliki fungsi sebagai pemindah tenaga dari tenaga penggerak (mesin diesel atau dinamo motor elektrik) ke mesin yang ingin digerakan. Fungsi *gearbox* utamanya adalah memperlambat kecepatan putaran yang dihasilkan dari perputaran dinamo motor atau mesin diesel dan yang kedua adalah untuk memperkuat tenaga putaran yang dihasilkan oleh dinamo atau diesel [22]



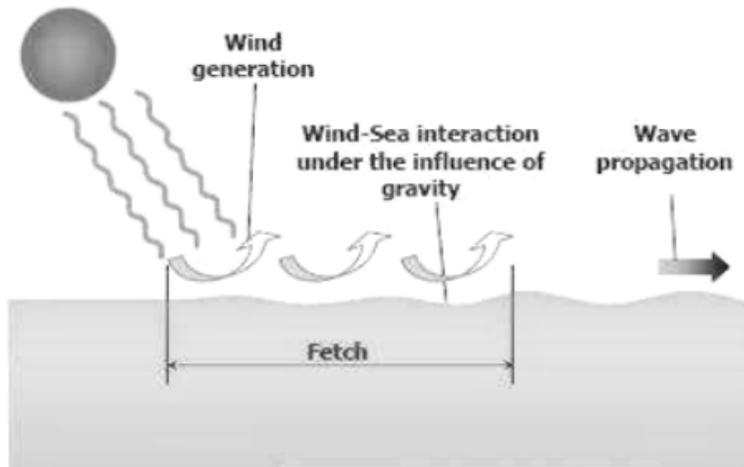
Gambar 2.6 Gearbox pada mesin

2.9 Penelitian Sebelumnya

2.9.1 *Power Generation from Sea Wave: An Approach to Create Renewable Energy*

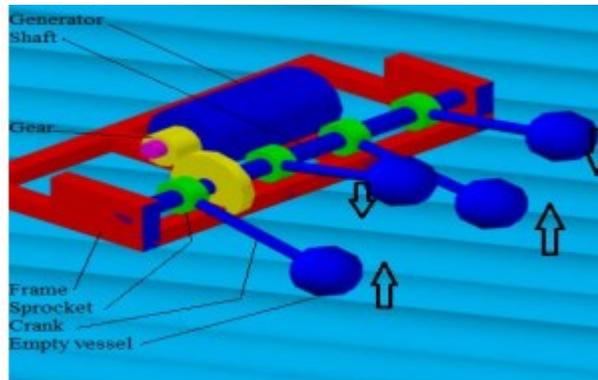
Sebuah penelitian studi literatur telah dilakukan oleh Manasseh *et al.*, (2017) untuk mengkaji tentang desain, manfaat, risiko, dan dampak lingkungan dari pembangkit listrik gelombang laut. Gelombang laut memiliki dua bentuk energi (ditunjukkan pada Gambar 2.6): energi kinetik dari partikel air (secara umum mengikuti jalur melingkar) dan energi potensial dari partikel air yang ditinggikan. Kombinasi gaya karena gravitasi, tegangan permukaan laut, dan intensitas angin adalah

faktor utama asal gelombang laut. Partikel-partikel air yang tereksitasi oleh angin ada di setiap lokasi lintasan melingkar samudera dengan diameter tertinggi di permukaan dan berkurang secara eksponensial dengan kedalaman. Konjugasi gerakan melingkar ini bertanggung jawab untuk pembentukan gelombang dan perambatan masing-masing.



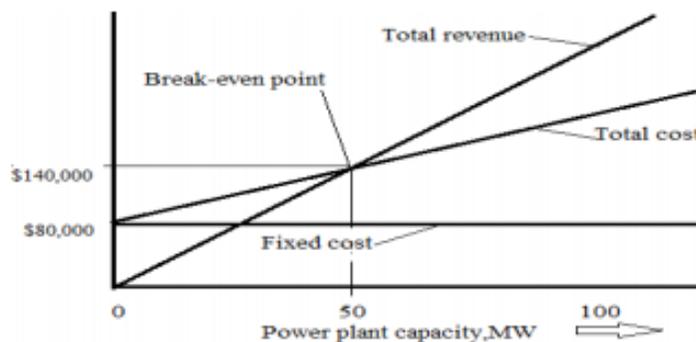
Gambar 2.7 Tipe-tipe Energi Gelombang [23]

Sistem pembangkit tenaga yang diusulkan tidak melalui proses yang canggih. Ini termasuk sejumlah bejana kosong. Bejana yang kosong naik dan turun secara acak karena dorongan gelombang ke atas. Setiap bejana kosong terhubung ke engkol. *Cranks* terpasang dengan poros tunggal. Kapal kosong bergerak ke atas dan ke bawah. *Crank* memfasilitasi gerakan linier bejana kosong ke rotasi poros. Terdapat sistem sproket antara engkol dan poros. Sistem sproket hanya melakukan rotasi untuk satu arah poros. Pada saat gerakan ke atas poros kapal kosong bergerak dengan engkol, tetapi pada gerakan ke bawah sistem sproket kapal kosong mengatur engkol bebas dari poros. Oleh karena itu poros berputar ketika bejana kosong naik tetapi poros tidak menanggapi pergerakan kapal ke bawah.



Gambar 2.8 Desain Pembangkit Energi Gelombang [23]

Sistem roda gigi ditempatkan di antara generator dan poros berputar untuk menggerakkan generator. Fungsi lain dari sistem roda gigi ini adalah ekspedisi kecepatan. Struktur utama digantung ke dasar laut dengan tali. Struktur ini membuatnya mudah untuk bergerak secara vertikal ke respons variasi ketinggian air. Sistem ini memfasilitasi pergerakan horizontal struktur utama sedikit terhadap respon pasang. Transmisi daya dari gelombang ke poros adalah konversi energi gelombang menjadi energi mekanik. Dari poros daya lagi ditransmisikan ke generator. Akhirnya generator mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Generator terhubung dengan jalur transmisi dengan kabel yang terendam dalam air.



Gambar 2.8 Analisis Biaya dan Pendapatan Pembangkit Listrik [23]

Perlu disadari berapa jumlah produksi daya listrik yang dapat memberikan keuntungan. Untuk keperluan ini analisis volume biaya telah dilakukan. Gambar 2.8 telah menunjukkan hubungan antara kapasitas pembangkit listrik dan total pendapatan, total biaya. Telah

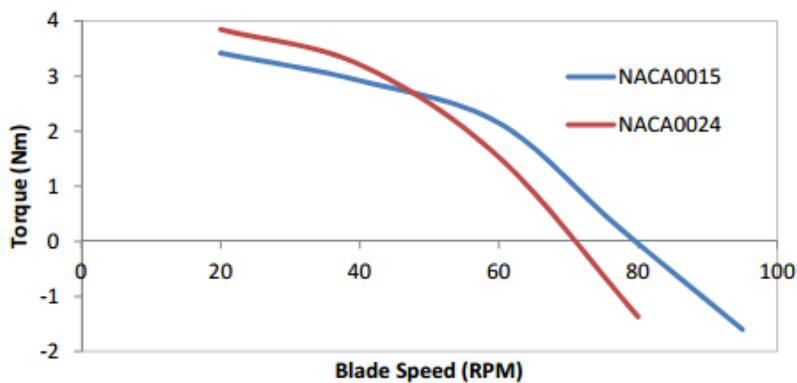
dinyatakan bahwa ketika kapasitas pembangkit listrik akan lebih dari 50 MW, total pendapatan akan melebihi total biaya. Ini adalah titik impas. Untuk tujuan menghasilkan laba, perlu menjalankan pembangkit listrik dengan kapasitas lebih dari 50 MW.

Polusi telah menjadi ancaman bagi keberlangsungan lingkungan di bumi. Hal ini termasuk polusi air, polusi udara, polusi tanah, dll. Pembangkit listrik merupakan bertanggung jawab atas ancaman ini. Pembangkit listrik tenaga nuklir memiliki bahaya radiasi. Bendungan atau struktur lain dapat menyebabkan ketidakseimbangan ekologis. Ini juga menyebabkan polusi sungai dan polusi garam ke daerah tropis. Pembangkit listrik tenaga diesel atau batubara mengeluarkan CO₂, SO₂, dan NO₂ dalam jumlah besar. Energi gelombang terbarukan, bersih, dan tidak tercemar. Tidak ada karbon dioksida atau produk sampingan lainnya yang dilepaskan. Itu tidak menghasilkan gas rumah kaca atau limbah lainnya. Karena terbarukan, ini akan membantu mengurangi ketergantungan kita pada pembakaran bahan bakar fosil. Wave selalu tersedia sehingga dapat diandalkan.

2.9.2 Design of a Gorlov Turbine for Marine Current Energy Extraction

Sebuah desain *gorlov helical turbine* telah dirancang oleh Chettiar, Narayan dan Goundar (2015) dengan diamner 0,3 m, panjang 0,6 m, dan menggunakan 3 *blade*. Desain sumbu vertikal menarik karena merespons aliran dari segala arah, dan memungkinkan peralatan pembangkit ditempatkan jauh dari air, digerakkan oleh poros vertikal. Salah satu contoh paling terkenal dari turbin sumbu vertikal adalah turbin Darrieus, yang memiliki tiga atau empat bilah lurus tipis dengan penampang hidrofoil yang dipasang secara vertikal di ujung lengan radial. Turbin heliks memiliki laju denyut yang cukup kecil, dan karakteristik awalnya lebih menguntungkan daripada turbin sumbu vertikal lainnya dengan bilah lurus. Dinamika turbin adalah aspek yang sangat penting dari pembangkit listrik dari arus laut. Melalui bilah-bilah itulah energi laut diubah menjadi energi mekanis yang pada gilirannya memutar poros turbin. Bentuk pisau dan penggunaan prinsip-prinsip secara tepat akan menghasilkan kerja efektif yang dilakukan oleh blade.

Profil *National Advisory Committee for Aeronautics* (NACA) untuk *blade* turbin dianggap sebagai *hydrofoil* karena analisis ilmiahnya yang telah terbukti dalam energi angin dan energi arus laut. Karakteristik hidrodinamik seperti distribusi tekanan pada permukaan airfoil, *minimum coefficient of pressure* (C_p), *coefficient of lift* (C_l), *coefficient of drag* (C_d), dan *lift to drag ratio* (L/D) harus dipertimbangkan untuk pemilihan *hydrofoil*. Airfoil seri NACA00XX dipelajari dari mana dua airfoil terbaik telah dipilih untuk menganalisis kinerjanya berdasarkan pada generasi torsi. Hydrofoils diuji melalui simulasi dinamika fluida komputasional. Kecepatan inlet dijaga konstan pada 1,2 m / s, sementara kecepatan blade dijaga sebagai kecepatan variabel. Grafik yang ditunjukkan pada Gambar 2.9 menunjukkan perbandingan torsi antara NACA0015 dan NACA0024.

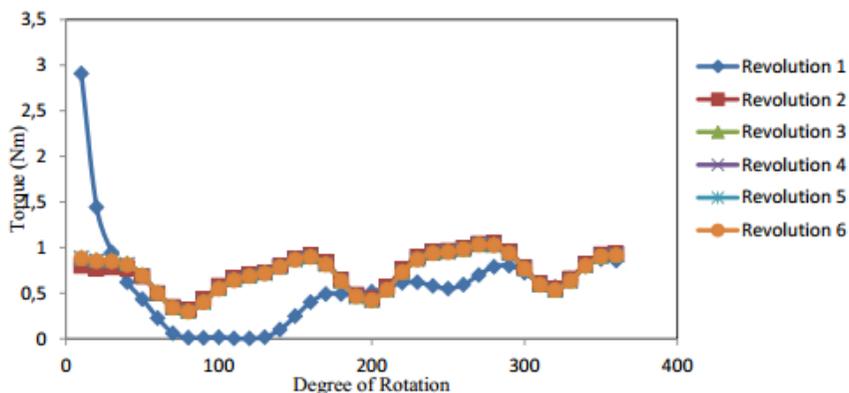


Gambar 2.9 Perbandingan Torsi Antara 2 Profil *Blade* [6]

Bentuk simetris memungkinkan pergerakan dua arah *blade*, yang sangat penting di lautan untuk mengekstraksi jumlah daya maksimum yang tersedia dengan mengosongkan dan mengisi dasar samudera saat pasang. Ketebalan profil meningkatkan gaya yang bekerja pada blade, ini disebabkan oleh peningkatan perbedaan tekanan yang diciptakan antara permukaan bawah dan atas blade. NACA0024 lebih cocok untuk rasio kecepatan tip lebih rendah (TSR) sedangkan NACA0015 lebih baik dengan TSR sedikit lebih tinggi. Kinerja turbin dianggap pada rasio soliditas yang berbeda sebagai bagian dari analisis; tiga geometri rasio soliditas yang berbeda dipertimbangkan berkisar antara 0,25 hingga 0,35

dan dianalisis pada empat TSR yang berbeda. Rasio soliditas optimal terbukti 0,3 [6].

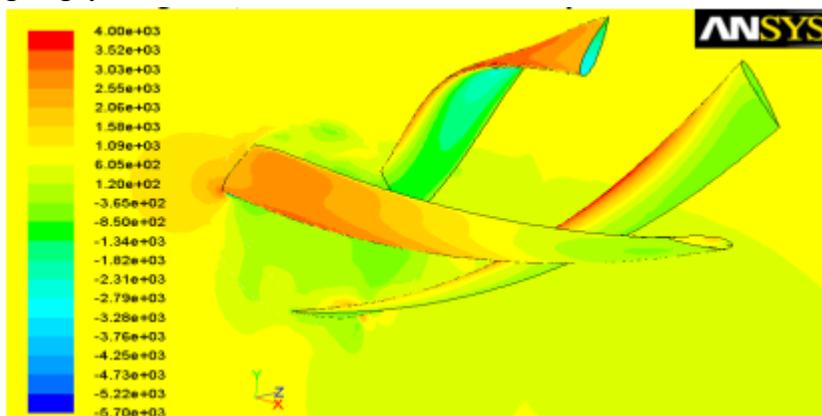
Analisis CFD dilakukan untuk menganalisis turbin Gorlov untuk dibandingkan dengan hasil eksperimen. Kondisi batas diperlukan untuk menentukan aliran dan variabel termal pada batas-batas model fisik. Kondisi kecepatan masuk digunakan untuk menentukan sifat-sifat kecepatan aliran pada batas masuk model yang ditetapkan pada 1,2 m / s dan mengatur aliran dalam arah X. Kecepatan saluran masuk bervariasi sesuai untuk simulasi yang berbeda. Prinsip aliran balik diterapkan sebagai kondisi outlet tekanan. Kondisi dinding digunakan untuk membatasi cairan dan daerah padat. Batas bidang jauh dan 3 bilah ditetapkan sebagai dinding stasioner, sedangkan wajah yang terhubung dengan bilah di sisi diberi dinding yang berputar. Zona fluida disimpan sebagai air, di mana semua persamaan sel aktif diselesaikan. Model ini dibagi menjadi dua zona cairan; satu berputar sementara yang lain diam. Wajah antara zona fluida berputar dan zona fluida stasioner ditentukan sebagai antarmuka, sedangkan antarmuka silinder lainnya ditentukan sebagai interior. Metode sliding mesh yang akurat terhadap waktu berguna untuk memodelkan beberapa tahap dalam aplikasi mesin turbo. The Solver diambil sebagai Tekanan berdasarkan dengan formulasi implisit.



Gambar 2.10 Hasil Simulasi Turbin Heliks [6]

Setelah semua parameter ditetapkan, solusi diinisialisasi, sehubungan dengan kecepatan saluran masuk. Kriteria konvergensi diatur dengan semua parameter memiliki sisa 0,001. Telah diverifikasi

bahwa semakin besar elemen *mesh*, akurasi hasil meningkat. Elemen mesh bervariasi dari 1 juta hingga 4,9 juta, yang menghasilkan peningkatan daya dari 4.3 W menjadi 15.7 W untuk model yang disimulasikan. Gambar 2.11 di bawah menjelaskan prinsip Bernoulli, ketika blade membuat paruh pertama rotasi, kecepatan berkurang secara dramatis, dan dengan demikian tekanan pada permukaan atas meningkat, dan sedangkan kecepatan pada permukaan bawah tinggi dengan tinggi tekanan. Perbedaan tekanan ini menciptakan gaya hidrodinamik bersih; satu bertindak ke atas sebagai gaya angkat sedangkan yang lain bertindak di sepanjang aliran aliran, yang dikenal sebagai gaya seret, yang mirip dengan gaya aerodinamis.



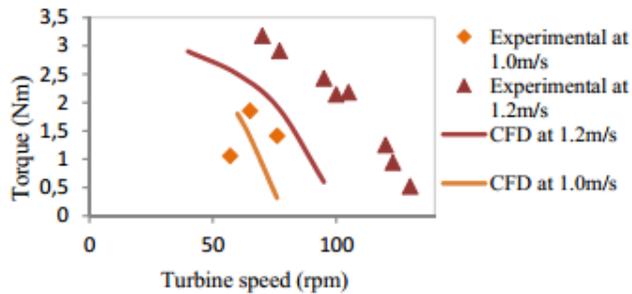
Gambar 2.11 Pesebaran Tekanan pada Sudut 70° dengan Kecepatan Arus 1,2 m/s [6]

Percobaan juga dilakukan pada fasilitas tangki penarik untuk memvalidasi hasil simulasi CFD. Tangki derek memiliki kontrol kecepatan elektronik yang bervariasi untuk menguji turbin pada kecepatan aliran bebas yang berbeda. Load cell digunakan untuk mengukur gaya, dari mana torsi dihitung, sementara pick-up magnetik digunakan untuk mengukur kecepatan rotasi bilah dalam putaran per menit. Analisis CFD memperkirakan torsi dekat dengan nilai-nilai eksperimental, meskipun ada sedikit perubahan pada Gambar 2.12 tetapi mengikuti tren yang sama seperti percobaan.



Gambar 2.12 Turbin untuk Percobaan [6]

Hasil CFD sedikit memperkirakan torsi, karena geometri CFD tidak memiliki poros aksial dan kerangka seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. Bangun yang terbentuk di sekitar kerangka turbin meningkatkan akselerasi tangensial pada blade. Ini jelas dibuktikan dalam kecepatan 1,2m/s.



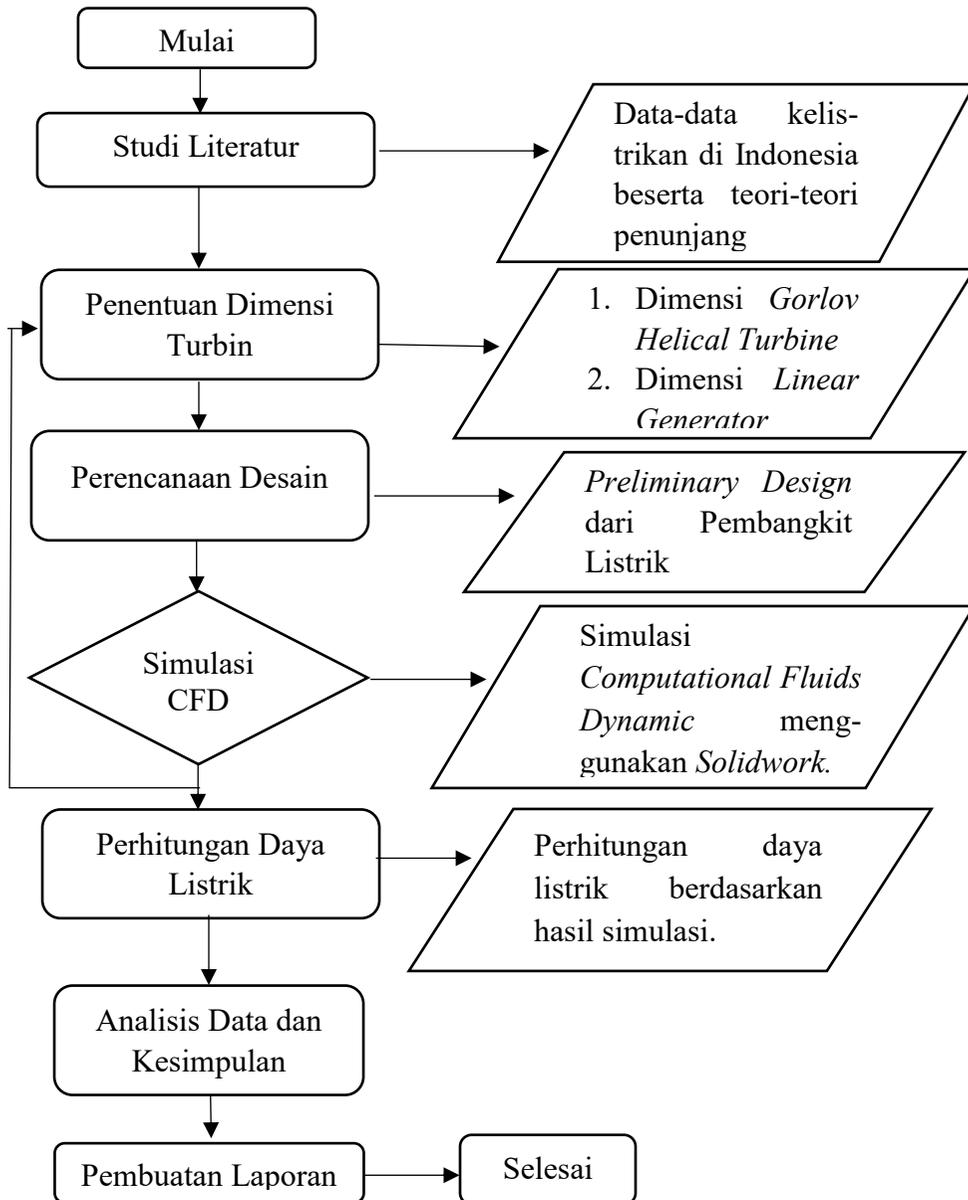
Gambar 2.12 Perbandingan Antara Hasil Simulasi dengan Percobaan [6]

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 3 METODOLOGI PENULISAN

3.1 Diagram Alir

Berikut ini adalah diagram alir (*flowchart*) dari penelitian ini:



Gambar 3.1 *Flowchart* Metodologi Penelitian

3.2 Penjelasan Detail Diagram Alir

3.2.1 Studi Literatur

Pada bagian ini penulis mencari sumber informasi dan referensi dari berbagai jurnal, buku, dan laporan yang terjamin validitasnya. Informasi yang dicari difokuskan pada permasalahan pemenuhan energi listrik di Indonesia, serta solusi yang berupa *renewable energy* yang efektif dan efisien. Informasi yang dimaksud yaitu berupa data kebutuhan serta pemenuhan energi listrik, teori-teori yang relevan dengan penelitian, serta spesifikasi komponen-komponen yang akan digunakan sebagai asumsi penerapan.

Pengumpulan data yang dilakukan dalam penyusunan makalah ini menggunakan beberapa metode–metode yaitu :

a. Tinjauan Pustaka

Data–data yang diperoleh diambil dari referensi buku yang diperoleh dari perpustakaan dan juga jurnal-jurnal penelitian dari internet, yang memiliki relevansi dengan pembahasan.

b. Tinjauan Media

Informasi–informasi lain yang diperoleh sebagai input dalam penyusunan makalah ini diperoleh dari internet, media cetak dan media elektronik dalam bentuk berita yang berkaitan dengan permasalahan yang kami angkat. Informasi yang diperoleh dalam tinjauan ini dijadikan landasan permasalahan yang akan kami bahas.

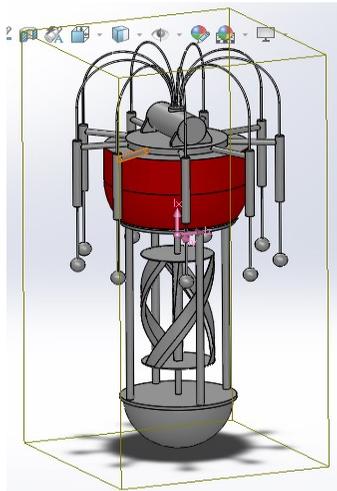
3.2.2 Penentuan Dimensi Turbin dan Pembangkit Listrik

Pada tahap ini, penulis melakukan perancangan dimensi dari pembangkit listrik, dan turbin akan didesain menyesuaikan dengan kebutuhan torsi oleh generator. Dalam menentukan ukuran turbin nantinya akan didesain beberapa variasi dimensi untuk kemudian disimulasikan untuk mengetahui dimensi turbin yang optimum. Dimensi dari turbin akan menyesuaikan dengan potensi arus laut dan gelombang laut pada lokasi penerapan.

3.2.3 Perencanaan Desain

Pada tahap ini, penulis melakukan perancangan desain pembangkit listrik menggunakan *software Solidwork* agar mengetahui

bentuk visual pembangkit listrik. Pembangkit listrik akan ditempatkan pada perairan yang memiliki potensi arus laut dan gelombang laut yang baik. Berdasarkan hasil studi literatur, Selat Sunda merupakan lokasi paling ideal untuk penerapan pembangkit listrik ini. Maka perancangan desain akan menyesuaikan karakteristik perairan di Selat Sunda yang meliputi arus laut dan gelombang laut.



Gambar 3.2 Desain Pembangkit Listrik

3.2.4 Simulasi *CFD* dan Analisis Matematis

Analisis dilakukan dengan mensimulasikan turbin menggunakan simulasi *Computational Fluid Dynamics* menggunakan *software Solidworks* dengan menyesuaikan keadaan arus yang ada di Selat Sunda untuk mengetahui torsi dan putaran yang dihasilkan oleh *Gorlov Helical Turbine*. Simulasi akan dilakukan dengan beberapa variasi kecepatan arus laut. Adapun variabel yang akan diteliti dalam simulasi ini yaitu torsi, kecepatan rotasi turbin, dan *drag force*. Torsi dan kecepatan rotasi turbin yang didapatkan akan digunakan sebagai acuan untuk menghitung daya listrik yang dapat dihasilkan oleh pembangkit listrik dengan mempertimbangkan spesifikasi generator yang akan digunakan. Berikut tabel pengamatan untuk simulasi *computational fluids dynamic*:

Tabel 1. Variabel Simulasi CFD

Kecepatan Arus Laut(m/s)	Torsi (nm)	Kecepatan Turbin (rpm)	Drag Force (N)
0,66	331,334	32,9	504,81
0,77	330,483	38,38	659,809
0,88	334,676	43,83	838,142
0,99	341,881	49,6	1036,34
1,11	330,165	55,32	1240,34

3.2.5 Perhitungan Daya Listrik

Nilai torsi dan kecepatan putaran nantinya akan digunakan untuk perhitungan daya listrik dengan menyesuaikan spesifikasi dari generator. Apabila nilai putaran turbin dibawah spesifikasi generator, maka diperlukan gearbox untuk meningkatkan putaran dari turbin. Dan apabila nilai torsi turbin kurang dari yang dibutuhkan oleh generator, maka akan dipilih generator dengan daya yang lebih rendah. Setelah didapatkan daya yang dihasilkan oleh satu generator, akan dihitung daya dari akumulasi semua generator yang terpasang. Berikut tabel yang dibutuhkan dalam perhitungan daya listrik yang dihasilkan *Gorlov Helical Turbine* beserta hasilnya:

Tabel 2. Perhitungan Daya Listrik *GHT*

Kecepatan Arus Laut(m/s)	Torsi Turbin (nm)	Kecepatan Turbin (rpm)	Torsi Generator (nm)	Efisiensi (%)	Daya Listrik (kW)
0,66	331,334	32,9	915	94,7	34,292
0,77	330,483	38,38	915	94,7	34,204
0,88	334,676	43,83	915	94,7	34,638
0,99	341,881	49,6	915	95,6	35,720
1,11	330,165	55,32	850	95,6	37,133

Sedangkan untuk perhitungan daya listrik yang dapat dihasilkan oleh *Linear Generator* dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$E_w = 0,195 \cdot w \cdot p \cdot g \cdot h^2 \cdot T^2 \quad (2)$$

[13]

Dimana:

- E_w = energi total (J)
- ρ = massa jenis air laut (1025 kg/m³)
- w = lebar gelombang (m)
- g = percepatan gravitasi (9,8 m/s²)
- T = periode gelombang (sec)
- h = tinggi gelombang (m)

Kemudian dari energi tersebut dapat dihitung pula daya listrik yang dihasilkan menggunakan persamaan:

$$P_w = \frac{E_w}{T} \cdot 10^{-3} \quad (3)$$

[13]

Dimana :

- E_w = energi total (J)
- P_w = daya (kW)
- T = periode gelombang (sec)

3.2.6 Analisis data dan kesimpulan

Tahap penganalisisan data dan teori yang digunakan dalam penulisan dirumuskan pada tahapan ini. Data hasil simulasi *software* akan dianalisis untuk mengetahui tingkat keberhasilannya dan dihubungkan dengan permasalahan yang diangkat dengan didukung teori yang relevan. Analisis data akan dilakukan untuk mengolah data kuantitatif dan kualitatif sehingga didapatkan kesimpulan yang komprehensif.

Untuk mendukung validitas hasil analisis yang akan dilakukan, dibutuhkan spesifikasi teknis komponen-komponen yang akan digunakan dalam pembangkit listrik sebagai asumsi penerapan. Adapun spesifikasi teknis dibutuhkan untuk komponen-komponen sebagai berikut:

1. *Communication antena*

2. Lampu navigasi
3. *Antennas cellular satellite wifi*
4. Kamera
5. Radar
6. *Satellite tracker*
7. *Automatic Identification System (AIS)*
8. *Permanent Magnet Generator*
9. *Motor DC*
10. *Air Reservoir*

Adapun metode pengolahan data yang digunakan adalah metode analisis deskriptif dan analisis matematis. Metode analisis deskriptif adalah analisis untuk mengelola dan menafsirkan data yang diperoleh sehingga dapat menggambarkan keadaan yang sebenarnya pada obyek yang dikaji. Adapun data yang akan dianalisis dengan metode ini yaitu desain pembangkit listrik dan hasil simulasi dengan menyesuaikan teori yang relevan.

Sedangkan metode analisis matematis digunakan untuk mengetahui validitas data yang diperoleh dari penelitian. Adapun analisis matematis akan dilakukan untuk mengetahui daya listrik yang dapat dihasilkan oleh pembangkit listrik. Perhitungan daya listrik akan membutuhkan *input* data dari hasil simulasi *computational fluid dynamic* untuk kemudian diolah menggunakan perhitungan matematis dengan menyesuaikan spesifikasi peralatan yang digunakan.

Untuk analisis *Gorlov Helical Turbine* akan dibutuhkan nilai torsi dan rotasi turbin dari hasil simulasi. Sedangkan untuk perhitungan *Linear Generator* akan menggunakan nilai kecepatan fluida yang mengenai *buoy* dari hasil simulasi untuk mengetahui periode gelombang yang dibutuhkan dalam persamaan. Masing-masing unit generator akan menghasilkan listrik dan disimpan pada baterai yang berbeda. Dari hasil akumulasi daya listrik yang dihasilkan oleh masing-masing generator, maka dapat diketahui kapasitas total dari pembangkit listrik. Sehingga dari hasil analisis yang sudah dilakukan akan diperoleh kesimpulan akhir yang menjawab tujuan penelitian yang sudah ditentukan di awal.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 4

ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Potensi Arus dan Gelombang Laut di Indonesia

Indonesia memiliki potensi energi yang besar di lautnya yaitu sebesar sebesar 41 gigawatt yang dapat menghasilkan energi listrik sebesar 240.000 megawatt [2]. Selain itu, pada banyak titik pantai di Indonesia memiliki gelombang laut yang relatif tinggi sehingga berpotensi untuk dimanfaatkan sebagai sumber tenaga listrik [3]. Arus dan gelombang laut pada umumnya tidak selalu berbanding lurus. Dimana ketika pada suatu perairan yang memiliki gelombang tinggi, arus laut cenderung lemah. Sedangkan pada perairan dengan kecepatan arus laut yang tinggi, misalnya pada selat-selat, gelombang laut relatif kecil. Oleh karenanya, penulis mengumpulkan data karakteristik beberapa perairan di Indonesia apabila ditinjau dari kecepatan arus laut dan tinggi gelombangnya. Berikut data arus dan gelombang laut di berbagai perairan di Indonesia.

Tabel 3. Data Arus dan Gelombang Laut Sejumlah Perairan di Indonesia

No	Lokasi	Tinggi Gelombang Rata-rata (m)	Kecepatan Arus (m/s)
1	Perairan utara Aceh	0,2 – 1,25 [3]	0 – 0,9 [24]
2	Perairan barat Sumatera Barat	0,4 – 1,5 [3]	0,22 – 0,297 [25]
3	Selat Sunda	0,3 – 1,7 [3]	0,66 - 1,10 [17]
4	Perairan selatan	0,5 – 2,0	8,33 – 22,22

	Jawa Tengah	[3]	(Kecepatan aliran gelombang laut) [26]
5	Perairan selatan Jatim	0,5 – 2,0 [3]	0,29 [27]
6	Perairan selatan Bali hingga NTB	0,4 – 1,5 [3]	0,001 – 1,75 [28]
7	Laut Sawu	0,4 – 1,4 [3]	0,06 – 0,62 [29]
8	Laut Timor	0,4 – 1,3 [3]	0,3 [30]
9	Laut Natuna	0,4 – 1,25 [3]	0,00006 – 1,19 [31]
10	Perairan selatan Kalimantan	0,2 – 0,8 [3]	0,1 [32]
11	Perairan Kepulauan Seribu	0,2 – 0,8 [3]	0,0138 - 0.4082 [33]
12	Laut Jawa	0,3 – 1,2 [3]	0,02 – 0,69 [34] [35]
13	Laut Bali	0,2 – 0,8 [3]	1,0303 [14]

14	Selat Makasar bagian Selatan	0,1 – 0,8 [3]	0,26 [29]
15	Perairan selatan Sulawesi	0,2 – 0,8 [3]	0,04 – 0,45 [36]
16	Laut Maluku	0,4 – 1,3 [3]	0,19 – 0,49 [37]
17	Laut Sulawesi	0,4 – 1,25 [3]	0,18 – 0,6 [38]
18	Laut Halmahe ra	0,4 – 1,25 [3]	0,19 [39]
19	Laut Arafuru	0,8 – 2 [3]	0,2 [30]
20	Perairaan Nongsa Batam	0,19 – 2,6 [40]	0,02 – 0,26 [40]
21	Perairan Pelawan Kepulauan Riau	0,23 – 0,27 [41]	0,46 – 0,48 [41]
22	Selat Madura	0,1 – 0,2 [42]	0,6 – 1,1 [43]

Kecepatan arus laut minimal untuk memutar *Gorlov Helical Turbine* adalah sebesar 0,5 m/s [4]. Sedangkan data gelombang laut digunakan sebagai referensi panjang *linear generator* yang digunakan. Lokasi yang berpotensi sebagai tempat pengaplikasian alat ini adalah di Selat Sunda dengan tinggi gelombang 0,3 – 1,7 m dan kecepatan arus

laut 0,66 – 1,1 m.s serta Perairan Bali (Nusa Penida) dengan tinggi gelombang 0,2 – 0,8 dan kecepatan arus laut mencapai 1,03 m/s. Sementara itu di pantai selatan Jawa Tengah juga memiliki potensi yang bagus, namun data arus laut yang diperoleh berupa kecepatan rambat gelombang laut [26]. Arus yang dihasilkan oleh gelombang laut bersifat sesaat dan *reversible* sehingga belum dapat digunakan untuk pengaplikasian alat ini karena kurang efisien.

4.2 Pemilihan Penempatan Aplikasi Pembangkit Listrik

Berdasarkan data pada Tabel 3., penulis memilih selat sunda sebagai tempat pengaplikasian yang cocok. Kecepatan arus laut pada selat sunda mencapai 0,66 – 1,1 m/s [17] sehingga akan mampu untuk memutar *gorlov helical turbine* yang dapat berputar dengan kecepatan arus minimal 0,5 m/s [4]. Kecepatan arus laut rata-rata di Selat Sunda dalam satu tahun mencapai 0,84 m/s. Untuk data arus laut di Selat Sunda yang lebih detail tiap bulannya akan disajikan dalam Tabel 3.

Tabel 4. Kecepatan Arus Laut per Bulan di Selat Sunda
(Sumber: Supian, Budi , Suhendar, 2013)

No.	Data/Bulan	Kecepatan Arus Laut Rata-Rata dalam m/s
1	Januari	1,04
2	Februari	0,73
3	Maret	0,66
4	April	0,71
5	Mei	0,97
6	Juni	1,02
7	Juli	0,87
8	Agustus	0,70
9	September	0,67
10	Oktober	0,72
11	Nopember	0,90
12	Januari	1,10
	Rata-rata	0,84

Selain itu, gelombang laut di Selat Sunda juga tergolong sedang, yaitu dengan tinggi mencapai 0,3-1,7 m [3]. Bahkan pada musim

tertentu, tinggi gelombang di Selat Sunda dapat mencapai 1,5-2,5 m, khususnya pada Selat Sunda bagian selatan. Hal ini dipengaruhi oleh angin kencang yang melintasi Selat Sunda dengan kecepatan hingga mencapai 15 knots [44]. Data tinggi gelombang laut akan digunakan sebagai bahan pertimbangan untuk menentukan dimensi *linear generator* yang akan dirancang.

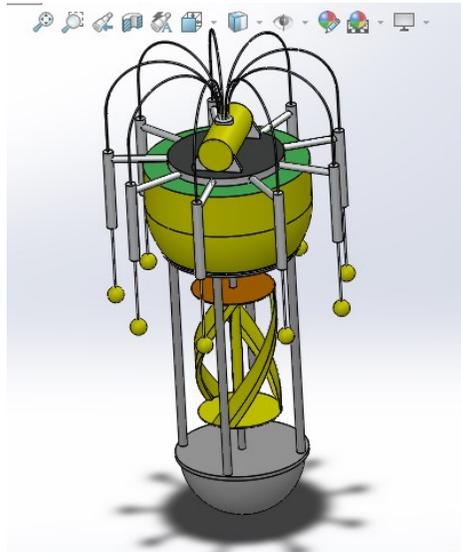


Gambar 4.1 Prakiraan Gelombang Laut di Selat Sunda [44]

4.3 Desain Pembangkit Listrik

4.3.1 Deskripsi Umum

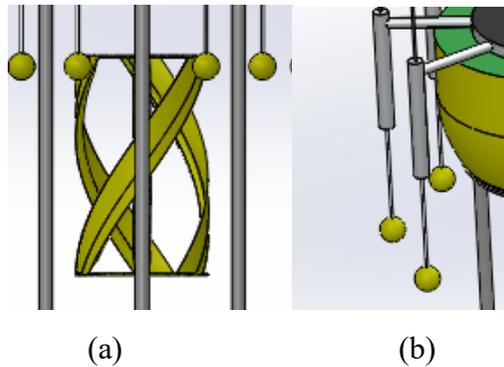
Pada tahap ini penulis akan melakukan perancangan desain pembangkit listrik dengan memanfaatkan energi arus dan gelombang laut. Penulis merancang desain pembangkit listrik dengan menggunakan *software Solidworks 2016*. Arus laut akan dikonversi menjadi listrik oleh *gorlov helical turbin*, sedangkan gelombang laut akan dikonversikan menjadi listrik menggunakan *linear generator*. Gelombang laut akan ditangkap oleh *buoy* agar terjadi gaya translasi pada *linear generator*. Gaya yang ditimbulkan dari gelombang laut yang mengenai *buoy* disebut *drag force*. *Drag force* adalah hambatan fluida, dimana gaya ini menghambat laju dari udara atau fluida akibat bergesekan dengan sebuah permukaan benda padat [45]. Desain dari pembangkit listrik dapat dilihat pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Desain Pembangkit Listrik

Adapun pertimbangan dalam penentuan dimensi pembangkit listrik yaitu menyesuaikan karakteristik kecepatan arus laut dan tinggi gelombang pada Selat Sunda. Kecepatan arus laut pada Selat Sunda relatif tidak terlalu cepat namun stabil dan memiliki kecepatan minimal yang cukup untuk dapat memutar *Gorlov Helical Turbine*. Jika ukuran turbin terlalu besar, rotasi turbin akan tidak maksimal karena massa yang terlalu berat. Jika ditempatkan beberapa *Gorlov Helical Turbine* sekaligus dalam tempat yang berdekatan, akan terjadi turbulensi pada arus yang mengenai turbin sehingga rotasi turbin akan kurang maksimal.

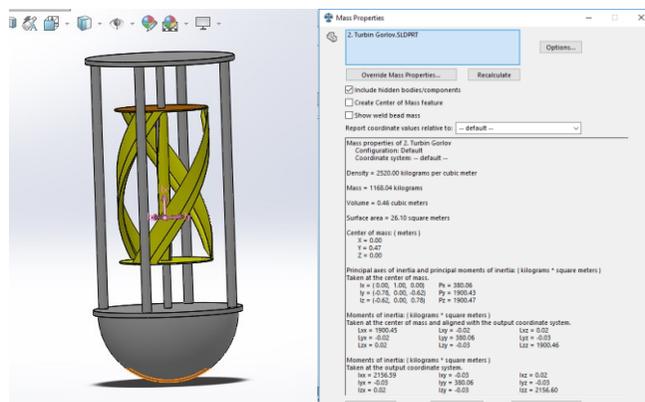
Gorlov Helical Turbine dirancang dengan panjang 1,6 m dan diameter 1 m serta dengan menggunakan bahan *Fibre Glass C Grade*. Turbin akan diletakkan pada bagian tengah *platform* pada kedalaman 1 meter untuk menangkap arus laut. *Gorlov Helical Turbin* nantinya akan dilengkapi dengan *gearbox* untuk meningkatkan putaran untuk kemudian dikonversikan menjadi listrik oleh *permanent magnet generator*. Sedangkan *buoy* beserta *linear generator* yang berjumlah 9 buah akan diletakkan pada sekeliling *platform*. *Linear generator* sendiri akan dirancang dengan panjang 1 meter menyesuaikan tinggi gelombang laut rata-rata di Selat Sunda.



Gambar 4.3 (a) *Gorlov Helical Turbine*; (b) *Linear Generator*

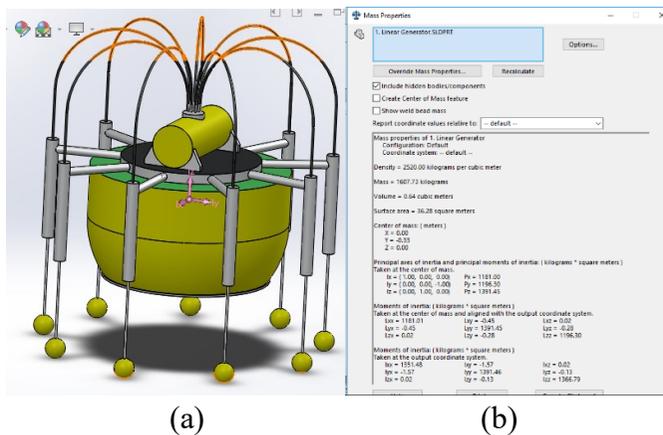
4.3.2 Desain *Gorlov Helical Turbine*

Gorlov helical turbine telah dirancang dengan dimensi 1 x 1,6 m dan akan bekerja pada kedalaman 1 m di bawah permukaan air laut. Turbin ini telah dirancang dengan menggunakan *Fibre Glass C Grade* yang merupakan bahan anti korosi dan ringan untuk digunakan. Bahan ini memiliki massa jenis sebesar 2520 kg/m^3 . Berdasarkan hasil desain pada *software Solidworks*, turbin heliks yang penulis rancang memiliki massa sebesar 1168,04 kg, volume $0,46 \text{ m}^3$, dan luas permukaan $26,10 \text{ m}^2$. *Centre of mass* turbin ini berada pada sumbu ($X= 0,0$; $Y= 0,47$; $Z=0,0$).



Gambar 4.4 (a) *Gorlov Helical Turbine*; (b) *Mass Properties*

4.3.3 Desain *Linear Generator*

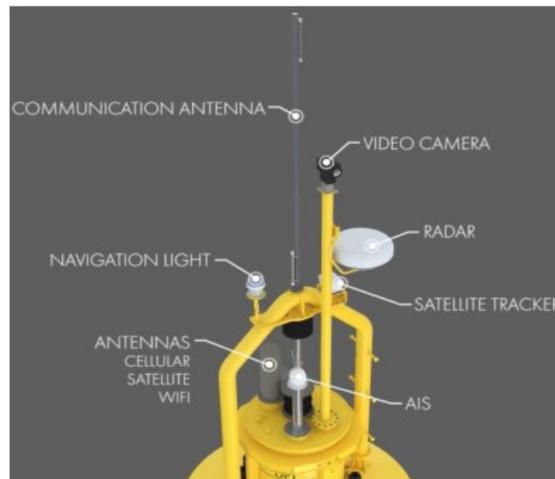


Gambar 4.5 (a) *Linear Generator*; (b) *Mass Properties*

Linear generator telah dirancang dengan panjang 1 m dan diameter 10 cm. *Linear generator* akan mengkonversikan energi translasi yang dihasilkan oleh gelombang laut menjadi energi listrik. Adapun pada *platform* ini, *linear generator* akan dipasangkan sebanyak 9 buah dengan spesifikasi yang sama. *Linear generator* akan dipasangkan pada ponton dan terhubung dengan kawat elastis agar pergerakan generator akan menjadi lebih dinamis. *Linear generator* beserta pontonnya memiliki massa sebesar 1607 kg dan volume sebesar $0,64 \text{ m}^3$.

4.3.4 Komponen Navigasi dan *Monitoring*

Pembangkit listrik ini akan digunakan di tengah laut, sehingga perlu dilakukan *monitoring* jarak jauh untuk memastikan keadaan dari pembangkit. Untuk memudahkan dalam melakukan *monitoring* dari darat, pembangkit ini akan dilengkapi oleh perlengkapan navigasi. Peralatan navigasi juga berfungsi untuk mengirimkan sinyal kepada kapal terdekat untuk menghindari terjadinya tabrakan.



Gambar 4.6 Komponen Navigasi

Terdapat tujuh komponen berbeda yang digunakan dalam sistem navigasi dari pembangkit ini, yaitu:

1. *Communication antena*



Gambar 4.7 *Communication antena*

(Sumber: Ericsson Antenna Technology Germany, 2019)

Antena berfungsi untuk transmisi dan penerimaan radiasi elektromagnetik yaitu membantu mengumpulkan data dari sinyal listrik dari saluran transmisi dan mengkonversi mereka menjadi gelombang radio. Antena yang akan digunakan pada *platform* adalah antena dengan merk Kathrein 2-Port

Antenna HB 2.5m 62° tipe 80010378 yang memiliki frekuensi hingga 2200 MHz.

Type No.	80010378			
Highband	B1			
Frequency range	MHz	1710 - 1880	1850 - 1990	1920 - 2200
Polarization	°	+45, -45	+45, -45	+45, -45
Gain	dBi	2 x 20.6	2 x 21.1	2 x 21.2
Horizontal Pattern:				
Half-power beam width	°	65	62	60
Front-to-back ratio (180°±30°)	dB	> 30	> 28	> 28
Cross polar ratio	dB	25	23	23
Sector	0°	> 10	> 10	> 10
	±60°			
Tracking, Avg.	dB	1.0		
Squint	°	±2.5		
Vertical Pattern:				
Half-power beam width	°	3.7	3.5	3.3
Electrical tilt	°	0-6, continuously adjustable		
Sidelobe supression for first sidelobe above main beam	*T	0 ... 3 ... 6	0 ... 3 ... 6	0 ... 3 ... 6
	dB	18 ... 18 ... 17	18 ... 17 ... 17	17 ... 17 ... 17
Null-fill at 0° tilt	dB	20	20	20
Impedance	Ω	50		
VSWR		< 1.5		
Isolation, between ports	dB	> 30		
Intermodulation IM3	dBc	< -150 (2 x 43 dBm carrier)		
Max. power per input	W	300 (at 50 °C ambient temperature)		

Gambar 4.8 Spesifikasi *Communication antena* [46]

2. Lampu navigasi



Gambar 4.9 Lampu Navigasi [47]

Lampu navigasi membantu pemantauan oleh kapal agar kapal dapat menghindari untuk melewati *platform*, khususnya pada malam hari. Lampu navigasi yang digunakan adalah *aqua signal series 32* yang hanya

membutuhkan daya 1,5 W dan tegangan 12-24 V. Lampu navigasi ini juga memiliki *lifetime* selama 50.000 jam.

3. *Antennas cellular satellite wifi*



Gambar 4.5 *Antennas cellular satellite wifi* [46]

Berfungsi sebagai satelit data transfer antara *platform* dengan ruang kontrol. Produk yang digunakan dalam *platform* ini adalah KyMeta mTenna PLUS yang dapat meningkatkan throughput dengan menggabungkan koneksi penerimaan dari dua hingga empat ODU, menghasilkan tambahan RX hingga 5,4 dB. Selain itu, alat ini juga dapat menghasilkan akses internet yang andal dengan kecepatan tinggi di laut.

4. Kamera



Gambar 4.10 *Antennas cellular satellite wifi* [48]

Kamera menunjukkan kondisi gelombang laut dan kondisi di sekitar *platform* serta mengirimkan data lalu lintas

untuk membantu mengelola sistem. Kamera yang akan digunakan dalam *platform* yaitu *Stealth IP Camera SDC-IPE324P 5.0MP IP Dome Camera*. Kamera ini menggunakan *360° Panoramic Fish-Eye Lens* yang dapat memungkinkan kamera untuk dapat menangkap gambar di sekeliling *platform*.

5. Radar



Gambar 4.11 Radar [49]

Radar (*Radio Detection And Ranging*) adalah suatu system pendeteksi obyek yang menggunakan gelombang elektromagnetik untuk identifikasi jarak, arah, atau kecepatan baik obyek bergerak maupun diam seperti pesawat terbang, kapal, kendaraan, keadaan cuaca, dan *terrain* [50]. Radar membantu menentukan rentang, sudut, atau kecepatan benda-benda seperti kapal, pesawat ruang angkasa, dll. Radar yang digunakan pada *platform* ini adalah *GF 2291 Contacting Radar (TDR)*. Tipe ini kurang sensitif terhadap turbulensi yang biasanya mengganggu pembacaan dalam teknologi radar ultrasonik dan terarah.

6. *Satellite tracker*



Gambar 4.12 *Satellite Tracker* [51]

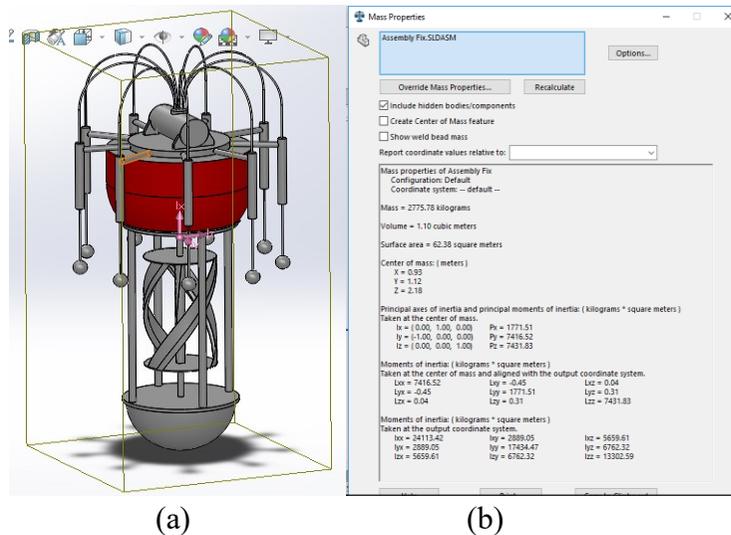
Satellite tracker mempunyai fungsi yang hampir sama dengan sistem *Global Positioning System* (GPS) yang merupakan sistem pelacakan yang menyediakan informasi seperti lokasi yang tepat, kecepatan, waktu dan arah suatu objek. Komponen yang digunakan dalam sistem ini adalah *Spot SmartOne C Satellite Asset Tracker* yang memiliki fitur mode pengurangan biaya pengiriman pesan untuk saat aset tetap di lokasi yang sama untuk periode waktu yang telah ditentukan. Adapun data satelit yang digunakan adalah *Globalstar Simplex Data Network* yang memiliki jangkauan hingga hampir seluruh negara.

7. *Automatic Identification System (AIS)*

Teknologi *Automatic Identification System (AIS)* merupakan perangkat digital yang digunakan sebagai instrumen navigasi dalam pelayaran. Perangkat ini menggabungkan teknologi *Global Positioning System* (GPS), teknologi radio VHF (*Very High Frequency*), dan teknologi informasi dalam satu sistem [52].

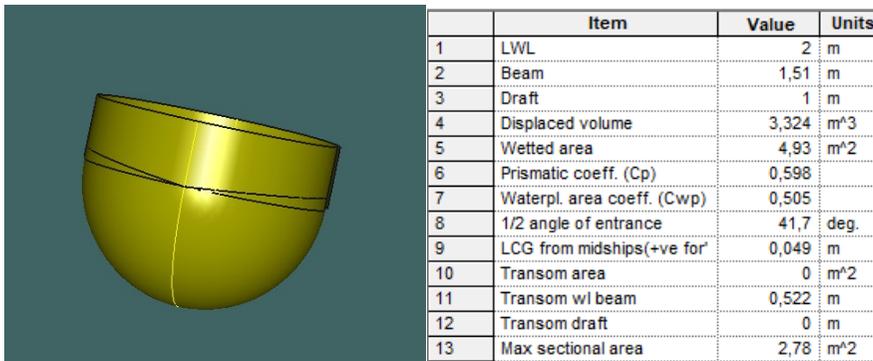
4.3.5 Analisis Stabilitas Platform

Pembangkit ini menerapkan konsep *semi submersible*. *Semi-submersible* merupakan bangunan apung yang umumnya beroperasi di laut dalam, yang normalnya didesain dengan bagian *upper hull*, kolom, dan *lower hull* yang terhubung secara horizontal dan diagonal dengan *bracing members*. Desain dari semi-submersible tersebut bertujuan untuk mengurangi *wave force* karena penempatan dari sebagian besar displasemen berada jauh di bawah permukaan air laut dan stabilitas dari struktur cukup dijamin oleh vertikal kolom [53].



Gambar 4.13 (a) Platform; (b) Mass Properties

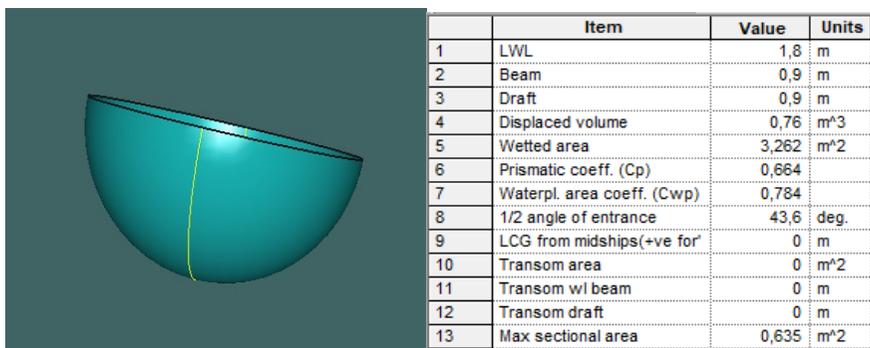
Pada bagian tengah pembangkit akan diberikan ponton atau ruang kosong untuk memperbesar *displacement* dari platform. Massa *displacement* adalah volume air yang dipindahkan oleh badan ponton [54]. Dapat diartikan bahwa volume air yang dipindahkan merupakan massa maksimal yang dapat diangkut oleh ponton tersebut. Platform ini nantinya akan dilengkapi dengan *mooring* agar mengapung pada permukaan air dengan stabil. Ponton dirancang dengan menggunakan bahan *aluminium alloy* yang mempunyai tekstur kuat namun ringan. Didalam ponton juga terdapat beberapa komponen pembangkit listrik seperti *double acting cylinder*, *DC motor*, dan *permanent magnet generator*. Beberapa komponen tersebut diletakkan di dalam ponton agar meminimalisir kebocoran air yang dapat menyebabkan kerusakan pada komponen listrik.



(a)

(b)

Gambar 4.14 (a) Ponton Atas; (b) *Volume Properties*



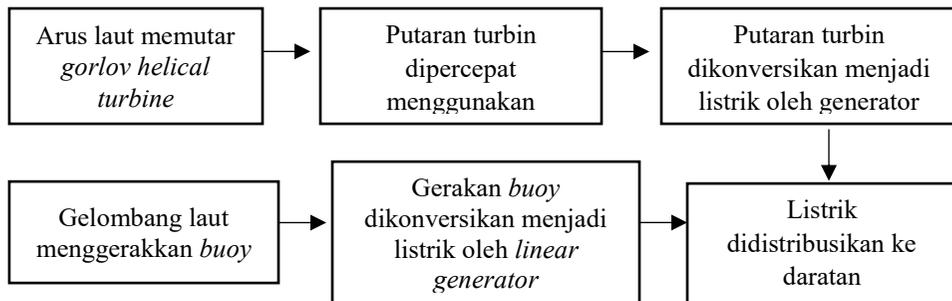
(a)

(b)

Gambar 4.15 (a) Ponton Bawah; (b) *Volume Properties*

Selain pada ponton, displasemen juga disimpan pada ponton di bagian bawah *platform* agar kapasitas muat menjadi lebih besar. Analisis desain dengan menggunakan *Maxsurf Modeler* dan *Maxsurf Resistance* telah menghasilkan volume displacemen masing-masing ponton. Besar volume pada ponton atas adalah sebesar 3,324 m³, sedangkan ponton bagian bawah memiliki volume displacemen sebesar 0,76 m³. Sehingga didapatkan total volume displacemen *platform* sebesar 4,084 m³. Apabila dikalikan dengan massa jenis air laut sebesar 1025 kg/m³. maka dihasilkan massa displasemen sebesar 4186,1 kg yang cukup untuk menopang *platform* dengan total massa sebesar 2775 kg.

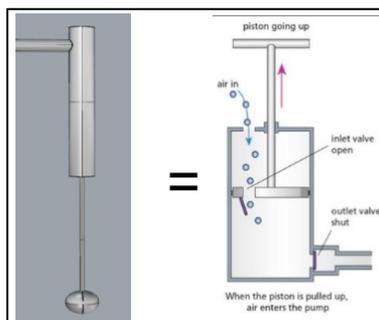
4.4 Alir Kerja Pembangkit Listrik



Gambar 4.16 Alir Kerja Pembangkit Listrik

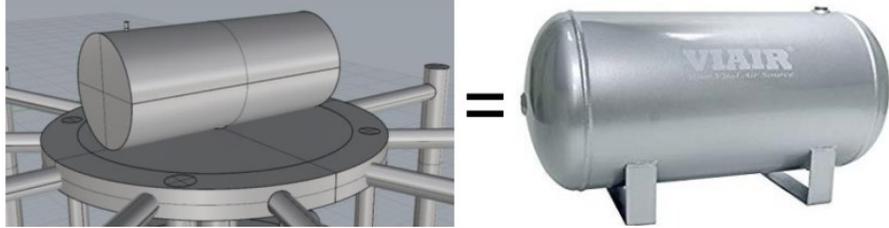
Tahapan kerja dari pembangkit listrik ini secara lengkap yaitu:

1. Arus laut yang melewati *Gorlov Helical Turbine* yang dipasang di bawah lambung ponton akan menyebabkan rotasi dari turbin.
2. Kemudian rotasi turbin akan ditingkatkan oleh *gearbox* dengan rasio maksimal 1:3 untuk memaksimalkan tenaga yang dihasilkan.
3. Lalu rotasi yang dihasilkan akan dikonversikan menjadi energi listrik oleh generator.
4. Di saat bersamaan, gelombang laut menekan *buoy* sehingga menyebabkan terjadinya gerak translasi.
5. Saat *buoy* melayang bergerak naik/turun karena kekuatan air, *buoy* mendorong batang dan juga piston dan karenanya menciptakan tekanan di dalam ruang (fungsinya sama seperti pompa sepeda) sementara *buoy* turun kembali ke permukaan laut mengambil udara dari katup saluran masuk (saluran masuk udara dari atmosfer) dan udara tekan kemudian dipindahkan ke tangki penyimpanan / reservoir udara.



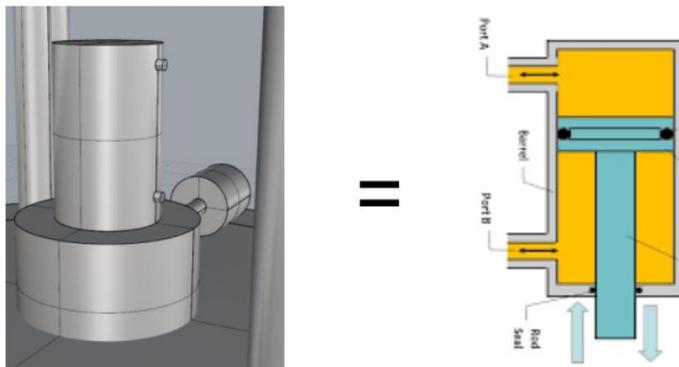
Gambar 4.17 *Linear Generator*

6. *Air reservoir* kemudian mentransfer udara *oscillating double acting actuator*, yang kemudian membantu untuk memutar poros yang terhubung ke motor DC (sebagai generator).



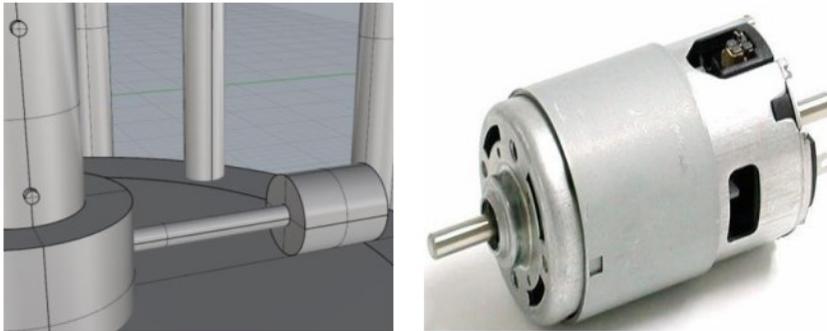
Gambar 4.18 *Air Reservoir*

7. *Oscillating double acting actuator* yang mengambil udara bertekanan dari reservoir pada inlet dan outlet dan memutar poros engkol sehingga memutar generator (motor DC).



Gambar 4.19 *Double Acting Cylinder*

8. Motor DC sebagai Generator yang memiliki formasi internal dari magnet dan kumparan yang menghasilkan gaya EMF ketika gaya rotasi diterapkan dari sumber eksternal untuk mengubah energi rotasi dari poros engkol menjadi energi listrik dan menyimpannya dalam baterai atau terhubung ke galangan kapal atau juga sebuah kapal dapat mengkonsumsi energi darinya



Gambar 4.20 Motor DC

9. Energi listrik yang dihasilkan oleh masing-masing generator kemudian disimpan terlebih dahulu pada baterai. Adapun untuk energi listrik dari *gorlov helical turbine* dan *linear generator* disimpan pada baterai yang berbeda. Energi listrik yang tersimpan dalam baterai kemudian akan didistribusikan ke daratan melalui kabel bawah laut.

4.5 Simulasi *Computational Fluids Dynamic*

Setelah melakukan perancangan terhadap *platform* beserta turbin dan generatornya, pada tahap simulasi dengan metode *computational fluids dynamic*. Simulasi bertujuan untuk mengetahui kinerja turbin ketika berinteraksi dengan fluida berupa air laut. Adapun variabel bebas yang menjadi *outcome* utama dari simulasi ini adalah torsi, *drag force*, kecepatan turbin, dan tekanan. Data-data yang diperoleh dari hasil simulasi akan digunakan untuk menghitung daya listrik yang dapat dihasilkan oleh pembangkit listrik ini.

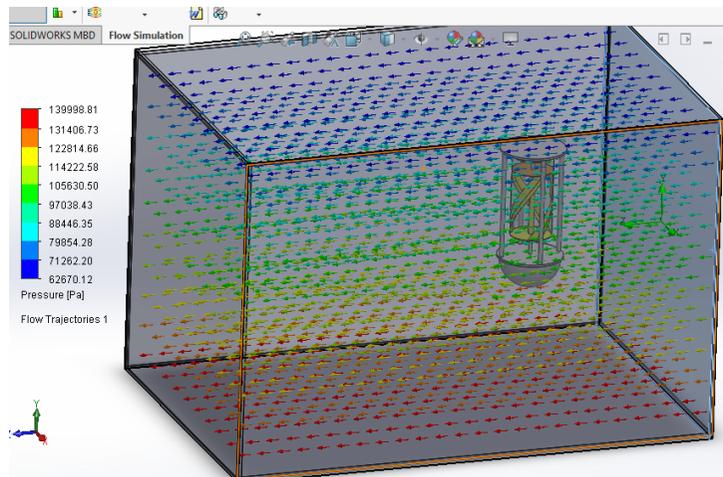
4.5.1 Simulasi *Gorlov Helical Turbine*

Simulasi pertama dilakukan pada *gorlov helical turbine* yang terpasang pada kedalaman 1 meter di bawah permukaan laut. Simulasi dilakukan dengan menggunakan 5 variasi kecepatan arus laut yang menyesuaikan dengan kondisi sebenarnya pada Selat Sunda, yaitu sebesar 0,66-1,1 m/s. Adapun variasi kecepatan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu 0,66 m/s, 0,77 m/s, 0,88 m/s, 0,99 m/s, 1,1 m/s.

4.5.1.1 Simulasi dengan Kecepatan Arus 0,66 m/s

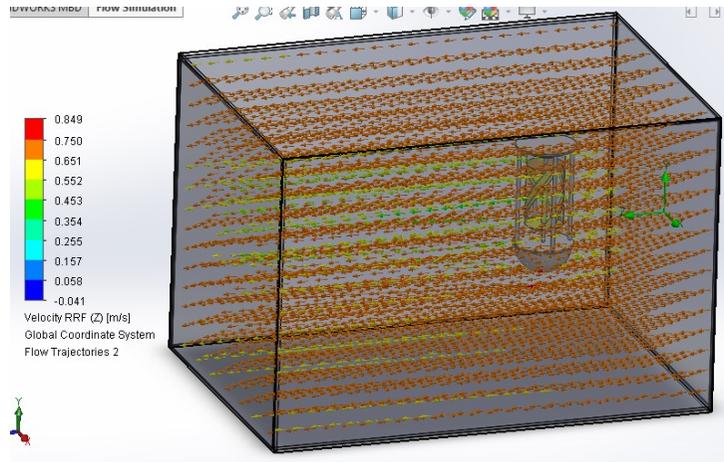
Simulasi telah dilakukan dengan asumsi kecepatan arus laut terendah, yaitu 0,66 m/s. Variabel yang diamati dalam simulasi ini yaitu

kecepatan fluida, tekanan fluida, dan torsi yang dihasilkan oleh turbin. Simulasi menunjukkan bahwa semakin dalam turbin ditempatkan, maka tekanan yang dihasilkan oleh fluida akan semakin besar. Tekanan yang mengenai *blade* turbin dapat mencapai **62,67-88,446 kPa**. Namun, apabila melihat fluida yang menyentuh turbin, tekanan yang dihasilkan cenderung merata. Tekanan yang merata akan memungkinkan tidak terjadinya pembebanan berlebih pada satu titik. Sehingga turbin heliks akan memiliki *life time* yang lebih lama.



Gambar 4.21 Pesebaran Tekanan oleh Fluida pada Kecepatan 0,66 m/s

Sementara itu pada parameter laju fluida, tampak kecepatan fluida yang bergerak di sekitar turbin cenderung konstan. Arus laut yang menyentuh *blade* turbin yaitu pada kecepatan **0,354-0,651 m/s**. Apabila dilihat dari laju aliran fluida yang mengenai turbin, tidak ditemukan terjadinya turbulensi arus. Hal ini akan meningkatkan efisiensi dari turbin dikarenakan tidak terjadinya penurunan kecepatan arus yang mengenai turbin. Selain itu, hal ini juga mencegah terjadinya kavitasi yang akan mempercepat korosi pada turbin.

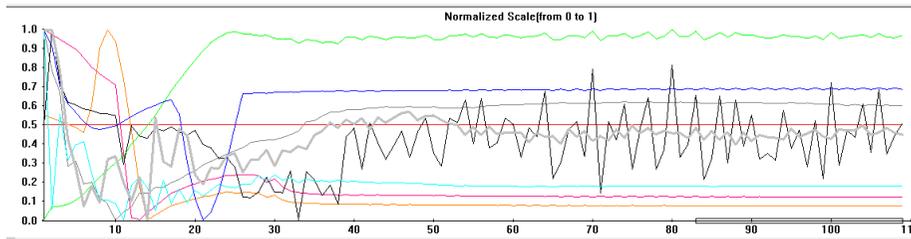


Gambar 4.22 Laju Aliran Fluida pada Kecepatan 0,66 m/s

Pada parameter lain, simulasi ini juga menghasilkan torsi turbin sebesar **331,334 Nm**. Besar torsi akan digunakan dalam perhitungan daya listrik yang digunakan dengan menyesuaikan spesifikasi torsi oleh generator. Selain itu, didapatkan hasil *drag force* sebesar **504,81 N**. Kecepatan turbin pada simulasi ini adalah sebesar 0,861 m/s atau sebesar **32,9 rpm**.

Tabel 5. Hasil Simulasi pada Kecepatan 0,66 m/s

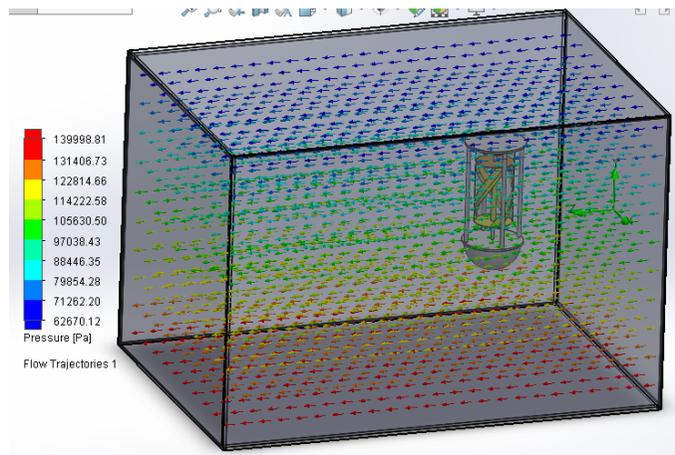
Variabel	Nilai	Satuan
<i>Min Velocity (X)</i>	0	m/s
<i>Min Velocity (Z)</i>	0,033573	m/s
<i>Average Velocity (X)</i>	0,661408	m/s
<i>Average Velocity (Z)</i>	0,660998	m/s
<i>Max Velocity (X)</i>	0,861559	m/s
<i>Max Velocity (Z)</i>	0,847265	m/s
<i>Drag Force</i>	504,025	N
<i>Torque</i>	331,289	Nm



Gambar 4.23 Grafik Hasil Simulasi pada Kecepatan 0,66 m/s

4.5.1.2 Simulasi dengan Kecepatan Arus 0,77 m/s

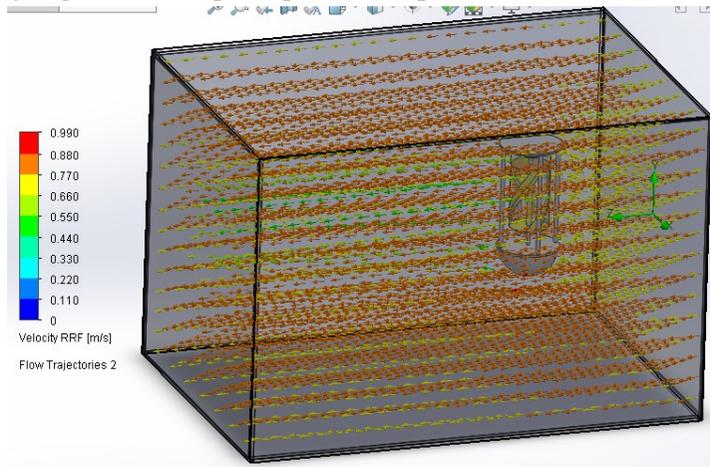
Simulasi berikutnya menggunakan asumsi kecepatan arus laut **0,77 m/s**. Simulasi *computational fluids dynamic* menunjukkan bahwa semakin dalam turbin ditempatkan, maka tekanan yang dihasilkan oleh fluida akan semakin besar. Tekanan yang mengenai *blade* turbin dapat mencapai **62,67-105,63 kPa**. Namun, apabila melihat fluida yang menyentuh turbin, tekanan yang dihasilkan cenderung merata. Tekanan yang merata akan memungkinkan tidak terjadinya pembebanan berlebih pada satu titik. Sehingga turbin heliks memungkinkan memiliki *life time* yang lebih lama.



Gambar 4.24 Pesebaran Tekanan oleh Fluida pada Kecepatan 0,77 m/s

Sementara itu pada parameter laju fluida, tampak kecepatan fluida yang bergerak di sekitar turbin cenderung konstan, antara **0,44-0,77 m/s**. Apabila dilihat dari laju aliran fluida yang mengenai turbin, tidak ditemukan terjadinya turbulensi arus. Hal ini akan meningkatkan efisiensi dari turbin dikarenakan tidak terjadinya penurunan kecepatan

arus yang mengenai turbin. Selain itu, hal ini juga mencegah terjadinya kavitasi yang akan mempercepat korosi pada turbin.

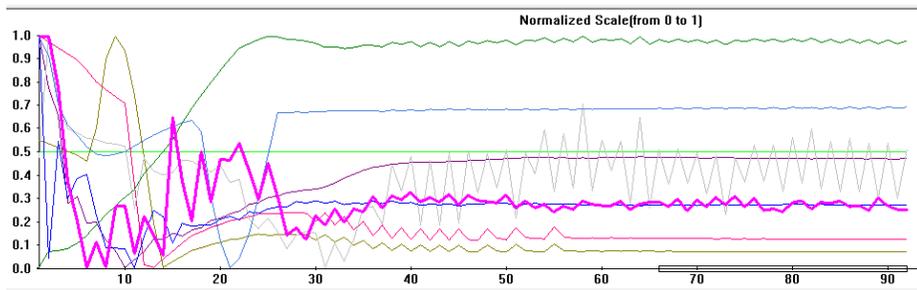


Gambar 4.25 Laju Aliran Fluida pada Kecepatan 0,77 m/s

Pada parameter lain, simulasi ini juga menghasilkan torsi turbin sebesar **330,019 nm**. Besar torsi akan digunakan dalam perhitungan daya listrik yang digunakan dengan menyesuaikan spesifikasi torsi oleh generator. Selain itu, didapatkan hasil *drag force* sebesar **659,965 N**. Kecepatan turbin pada simulasi ini adalah sebesar 1,0043 m/s atau sebesar **38,38 rpm**.

Tabel 6. Hasil Simulasi pada Kecepatan 0,77 m/s

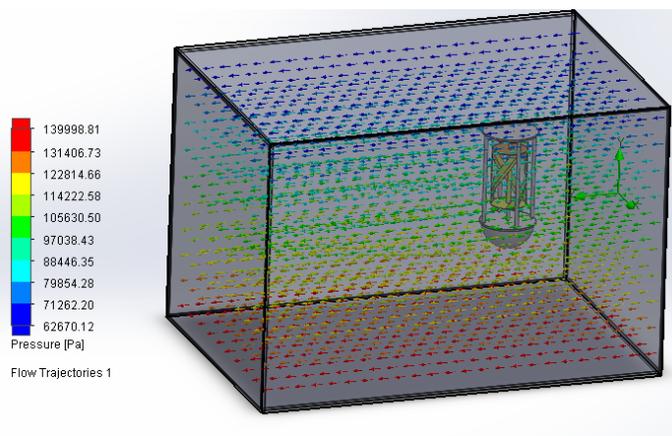
Variabel	Nilai	Satuan
<i>Min Velocity (X)</i>	0	m/s
<i>Min Velocity (Z)</i>	0,038736	m/s
<i>Average Velocity (X)</i>	0,771641	m/s
<i>Average Velocity (Z)</i>	0,771165	m/s
<i>Max Velocity (X)</i>	1,0043	m/s
<i>Max Velocity (Z)</i>	0,988505	m/s
<i>Drag Force</i>	659,965	N
<i>Torque</i>	330,019	Nm



Gambar 4.26 Grafik Hasil Simulasi pada Kecepatan 0,77m/s

4.5.1.3 Simulasi dengan Kecepatan Arus 0,88 m/s

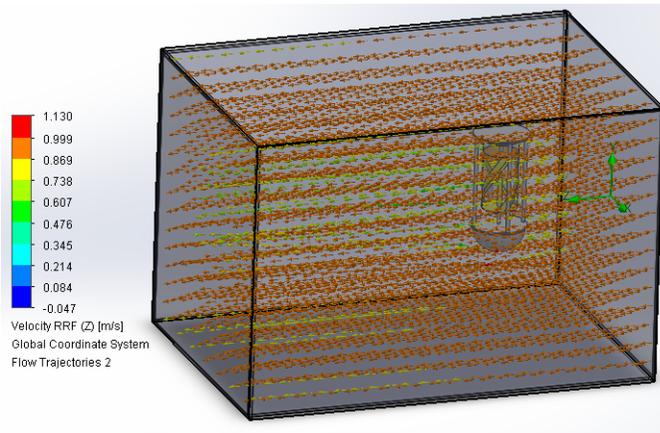
Simulasi berikutnya menggunakan asumsi kecepatan arus laut **0,88 m/s**. Simulasi *computational fluids dynamic* menunjukkan bahwa semakin dalam turbin ditempatkan, maka tekanan yang dihasilkan oleh fluida akan semakin besar. Tekanan yang mengenai *blade* turbin dapat mencapai **62,67-114,22 kPa**. Namun, apabila melihat fluida yang menyentuh turbin, tekanan yang dihasilkan cenderung merata. Tekanan yang merata akan memungkinkan tidak terjadinya pembebanan berlebih pada satu titik. Sehingga turbin heliks memungkinkan memiliki *life time* yang lebih lama.



Gambar 4.27 Pesebaran Tekanan oleh Fluida pada Kecepatan 0,88 m/s

Sementara itu pada parameter laju fluida, tampak kecepatan fluida yang bergerak mengenai turbin mempunyai kecepatan antara **0,476-0,869 m/s**. Apabila dilihat dari laju aliran fluida yang mengenai turbin, tidak ditemukan terjadinya turbulensi arus. Hal ini akan

meningkatkan efisiensi dari turbin dikarenakan tidak terjadinya penurunan kecepatan arus yang mengenai turbin. Selain itu, hal ini juga mencegah terjadinya kavitasi yang akan mempercepat korosi pada turbin.

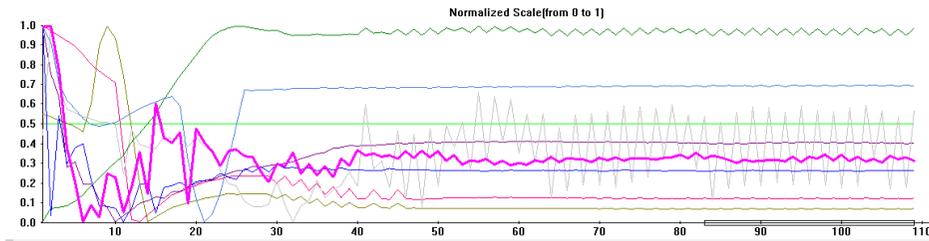


Gambar 4.28 Laju Aliran Fluida pada Kecepatan 0,88 m/s

Pada parameter lain, simulasi ini juga menghasilkan torsi turbin sebesar **334,946 nm**. Besar torsi akan digunakan dalam perhitungan daya listrik yang digunakan dengan menyesuaikan spesifikasi torsi oleh generator. Selain itu, didapatkan hasil *drag force* sebesar **838,302 N**. Kecepatan turbin pada simulasi ini adalah sebesar 1,147 m/s atau sebesar **43,83 rpm**.

Tabel 7. Hasil Simulasi pada Kecepatan 0,88 m/s

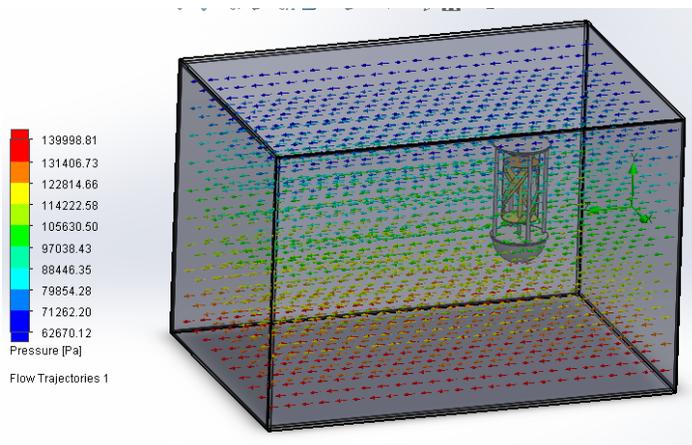
Variabel	Nilai	Satuan
<i>Min Velocity (X)</i>	0	m/s
<i>Min Velocity (Z)</i>	0,044997	m/s
<i>Average Velocity (X)</i>	0,881878	m/s
<i>Average Velocity (Z)</i>	0,881335	m/s
<i>Max Velocity (X)</i>	1,14766	m/s
<i>Max Velocity (Z)</i>	1,12963	m/s
<i>Drag Force</i>	838,302	N
<i>Torque</i>	334,945	Nm



Gambar 4.29 Hasil Simulasi pada Kecepatan 0,88 m/s

4.5.1.4 Simulasi dengan Kecepatan Arus 0,99 m/s

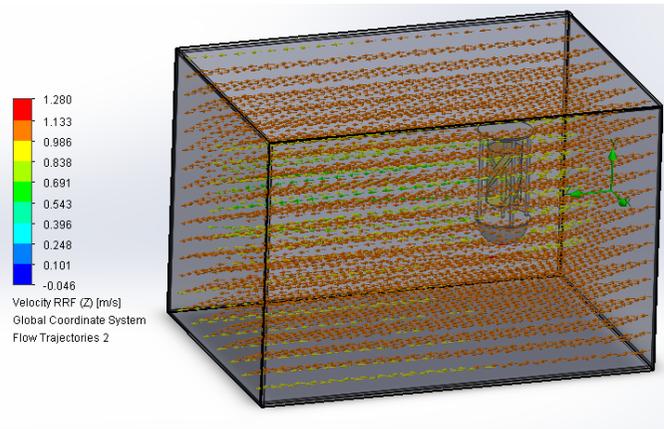
Simulasi berikutnya menggunakan asumsi kecepatan arus laut **0,99 m/s**. Simulasi *computational fluids dynamic* menunjukkan bahwa semakin dalam turbin ditempatkan, maka tekanan yang dihasilkan oleh fluida akan semakin besar. Tekanan yang mengenai *blade* turbin dapat mencapai **62,67-114,22 kPa**. Namun, apabila melihat fluida yang menyentuh turbin, tekanan yang dihasilkan cenderung merata. Tekanan yang merata akan memungkinkan tidak terjadinya pembebanan berlebih pada satu titik. Sehingga turbin heliks memungkinkan memiliki *life time* yang lebih lama.



Gambar 4.30 Pesebaran Tekanan oleh Fluida pada Kecepatan 0,99 m/s

Sementara itu pada parameter laju fluida, tampak kecepatan fluida yang bergerak mengenai turbin mempunyai kecepatan antara **0,543-0,986 m/s**. Apabila dilihat dari laju aliran fluida yang mengenai turbin, tidak ditemukan terjadinya turbulensi arus. Hal ini akan

meningkatkan efisiensi dari turbin dikarenakan tidak terjadinya penurunan kecepatan arus yang mengenai turbin. Selain itu, hal ini juga mencegah terjadinya kavitasi yang akan mempercepat korosi pada turbin.

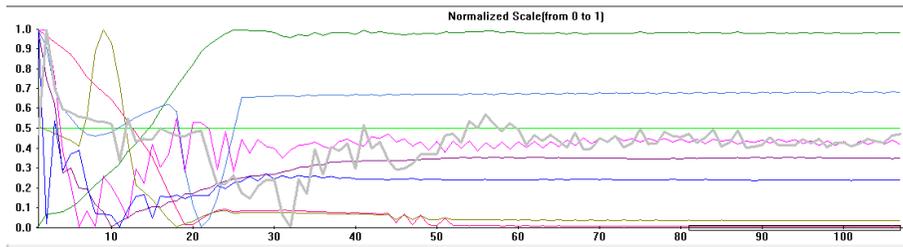


Gambar 4.31 Laju Aliran Fluida pada Kecepatan 0,99 m/s

Pada parameter lain, simulasi ini juga menghasilkan torsi turbin sebesar **342,364 nm**. Besar torsi akan digunakan dalam perhitungan daya listrik yang digunakan dengan menyesuaikan spesifikasi torsi oleh generator. Selain itu, didapatkan hasil *drag force* sebesar **1036,6 N**. Kecepatan turbin pada simulasi ini adalah sebesar 1,298 m/s atau sebesar **49,6 rpm**.

Tabel 8. Hasil Simulasi pada Kecepatan 0,99 m/s

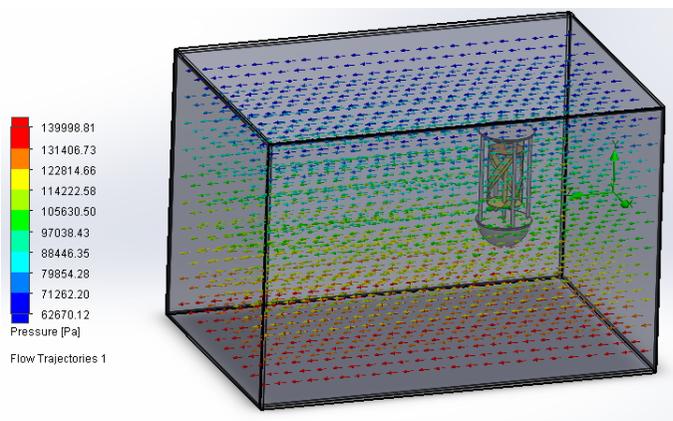
Variabel	Nilai	Satuan
<i>Min Velocity (X)</i>	0	m/s
<i>Min Velocity (Z)</i>	0,00049583	m/s
<i>Average Velocity (X)</i>	0,992144	m/s
<i>Average Velocity (Z)</i>	0,991495	m/s
<i>Max Velocity (X)</i>	1,29803	m/s
<i>Max Velocity (Z)</i>	1,27677	m/s
<i>Drag Force</i>	1036,6	N
<i>Torque</i>	342,364	Nm



Gambar 4.32 Hasil Simulasi pada Kecepatan 0,99 m/s

4.5.1.5 Simulasi dengan Kecepatan Arus 1,11 m/s

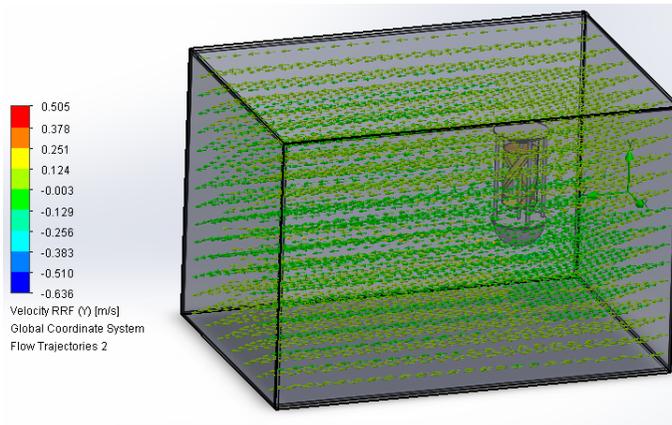
Simulasi berikutnya menggunakan asumsi kecepatan arus laut **1,11 m/s**. Simulasi *computational fluids dynamic* menunjukkan bahwa semakin dalam turbin ditempatkan, maka tekanan yang dihasilkan oleh fluida akan semakin besar. Tekanan yang mengenai *blade* turbin dapat mencapai **62,67-114,22 kPa**. Namun, apabila melihat fluida yang menyentuh turbin, tekanan yang dihasilkan cenderung merata. Tekanan yang merata akan memungkinkan tidak terjadinya pembebanan berlebih pada satu titik. Sehingga turbin heliks memungkinkan memiliki *life time* yang lebih lama.



Gambar 4.33 Pesebaran Tekanan oleh Fluida pada Kecepatan 1,11 m/s

Namun pada parameter laju fluida, kecepatan fluida yang bergerak mengenai turbin justru lebih kecil daripada variasi arus yang lainnya, yaitu dengan kecepatan antara **0,124-0,251 m/s**. Apabila dilihat dari laju aliran fluida yang mengenai turbin, tidak ditemukan terjadinya

turbulensi arus. Hal ini akan meningkatkan efisiensi dari turbin dikarenakan tidak terjadinya penurunan kecepatan arus yang mengenai turbin. Selain itu, hal ini juga mencegah terjadinya kavitasi yang akan mempercepat korosi pada turbin.

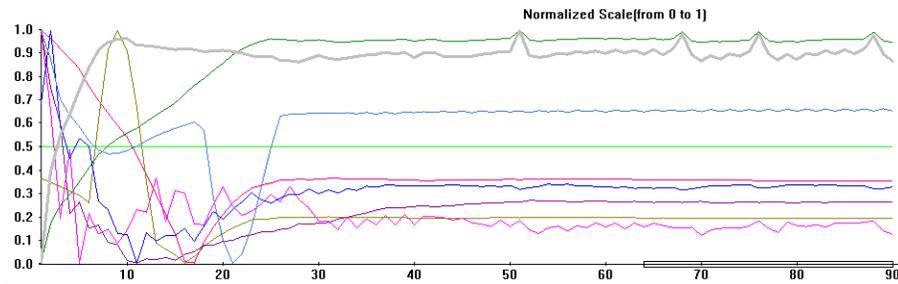


Gambar 4.34 Laju Aliran Fluida pada Kecepatan 1,1 m/s

Pada parameter lain, simulasi ini juga menghasilkan torsi turbin yang lebih kecil, yaitu sebesar **330,165 Nm**. Besar torsi akan digunakan dalam perhitungan daya listrik yang digunakan dengan menyesuaikan spesifikasi torsi oleh generator. Selain itu, didapatkan hasil *drag force* sebesar **1240,92 N**. Kecepatan turbin pada simulasi ini adalah sebesar 1,4478 m/s atau sebesar **55,32 rpm**.

Tabel 9. Hasil Simulasi pada Kecepatan 1,11 m/s

Variabel	Nilai	Satuan
<i>Min Velocity (X)</i>	0	m/s
<i>Min Velocity (Z)</i>	0,056271	m/s
<i>Average Velocity (X)</i>	1,10239	m/s
<i>Average Velocity (Z)</i>	1,10166	m/s
<i>Max Velocity (X)</i>	1,44797	m/s
<i>Max Velocity (Z)</i>	1,42615	m/s
<i>Drag Force</i>	1240,92	N
<i>Torque</i>	330,165	Nm



Gambar 4.35 Hasil Simulasi pada Kecepatan 1,1 m/s

4.5.1.6 Rangkuman Hasil Simulasi

Dari simulasi dengan menggunakan beberapa variasi, penulis telah merangkum hasilnya untuk dibandingkan tiap parameternya. Hasil simulasi akan dituliskan pada Tabel 10.

Tabel 10. Hasil Simulasi *CFD*

Kecepatan Arus Laut(m/s)	Torsi (nm)	Kecepatan Turbin (rpm)	<i>Drag Force</i> (N)
0,66	331,334	32,9	504,81
0,77	330,483	38,38	659,809
0,88	334,676	43,83	838,142
0,99	341,881	49,6	1036,34
1,11	330,165	55,32	1240,34

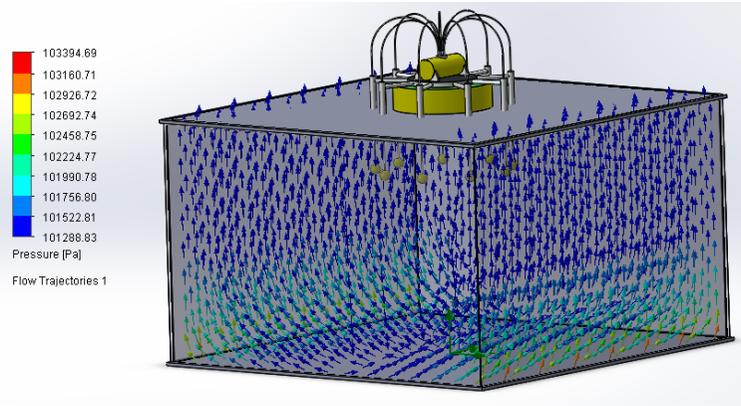
Dari tabel diatas dapat dilihat bahwa terjadi peningkatan torsi yang cenderung konstan pada tiap kecepatan, namun mengalami penurunan pada variasi kecepatan arus tercepat, yaitu pada kecepatan 1,11 m/s dengan torsi sebesar 326,354 nm. Sedangkan pada variabel kecepatan turbin dan *drag force* terjadi peningkatan secara konstan seiring bertambahnya kecepatan arus.

4.5.2 Simulasi *Linear Generator*

Simulasi dengan menggunakan metode *computational fluids dynamic* juga dilakukan terhadap desain *linear generator* untuk mengetahui nilai tekanan dan *drag force* yang dihasilkan. Simulasi

dilakukan dengan menggunakan 5 variasi gelombang (v_y), yaitu sebesar 0,3 m/s, 0,4 m/s, 0,5 m/s, 0,6 m/s dan 0,7 m/s.

4.5.2.1 Simulasi dengan Kecepatan Gelombang 0,3 m/s

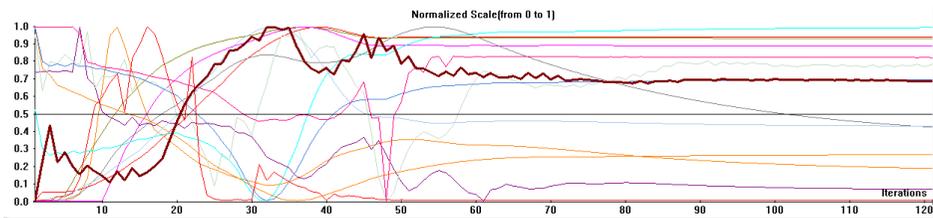


Gambar 4.36 Tekanan pada Kecepatan 0,3 m/s

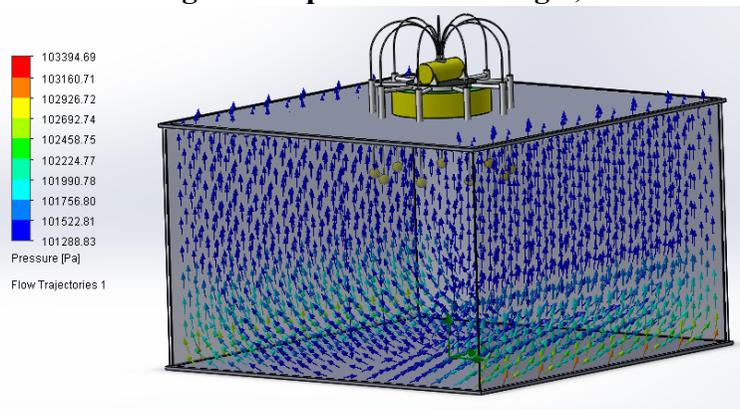
Simulasi telah dilakukan dengan asumsi kecepatan gelombang terendah, yaitu 0,4 m/s. Variabel yang diamati dalam simulasi ini yaitu tekanan fluida dan *drag force* yang mengenai *buoy* pada *linear generator*. Simulasi menunjukkan bahwa semakin dalam *buoy* ditempatkan, maka tekanan yang dihasilkan oleh fluida akan semakin besar. Tekanan yang mengenai *buoy* dapat mencapai **101,288 kPa**. Pada parameter lain, simulasi ini juga menghasilkan *drag force* sebesar **388,51 N**.

Tabel 11. Hasil Simulasi pada Kecepatan Gelombang 0,3 m/s

Variabel	Nilai	Satuan
<i>Average Velocity (Y)</i>	0,299483	m/s
<i>Average Velocity (Z)</i>	0,486077	m/s
<i>Max Velocity (Y)</i>	1,20474	m/s
<i>Max Velocity (Z)</i>	1,62766	m/s
<i>Drag Force</i>	344,501	N



Gambar 4.37 Hasil Simulasi pada Kecepatan 0,3 m/s
4.5.2.2 Simulasi dengan Kecepatan Gelombang 0,4 m/s



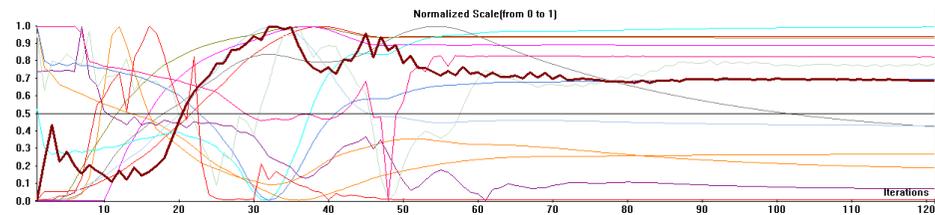
Gambar 4.38 Tekanan pada Kecepatan 0,4 m/s

Simulasi telah dilakukan dengan asumsi kecepatan gelombang terendah, yaitu 0,4 m/s. Variabel yang diamati dalam simulasi ini yaitu tekanan fluida dan *drag force* yang mengenai *buoy* pada *linear generator*. Simulasi menunjukkan bahwa semakin dalam *buoy* ditempatkan, maka tekanan yang dihasilkan oleh fluida akan semakin besar. Tekanan yang mengenai *buoy* dapat mencapai **101,288 kPa**. Pada parameter lain, simulasi ini juga menghasilkan *drag force* sebesar **388,51 N**.

Tabel 12. Hasil Simulasi pada Kecepatan Gelombang 0,4 m/s

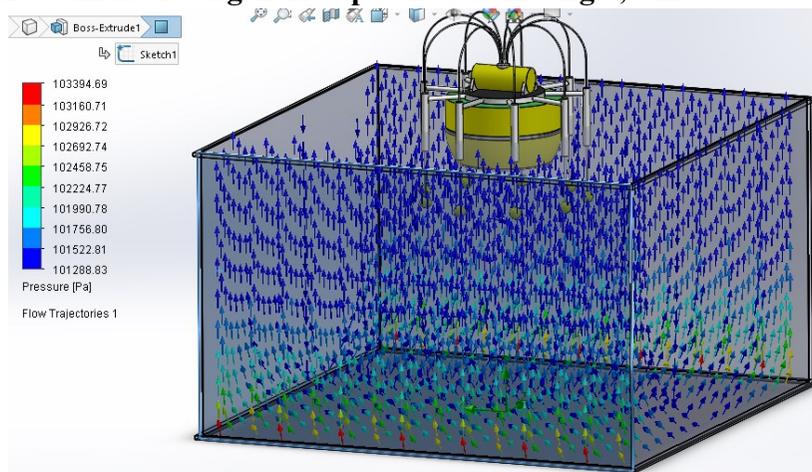
Variabel	Nilai	Satuan
<i>Average Velocity (Y)</i>	0,399795	m/s
<i>Average Velocity (Z)</i>	0,518249	m/s
<i>Max Velocity (Y)</i>	1,70599	m/s
<i>Max Velocity (Z)</i>	1,70605	m/s
<i>Drag Force</i>	388,157	N
<i>Friction Force</i>	403,446	N

Average Turbulent Viscosity	1,16285	Pa.S
-----------------------------	---------	------



Gambar 4.39 Hasil Simulasi pada Kecepatan 0,4 m/s

4.5.2.3 Simulasi dengan Kecepatan Gelombang 0,5 m/s

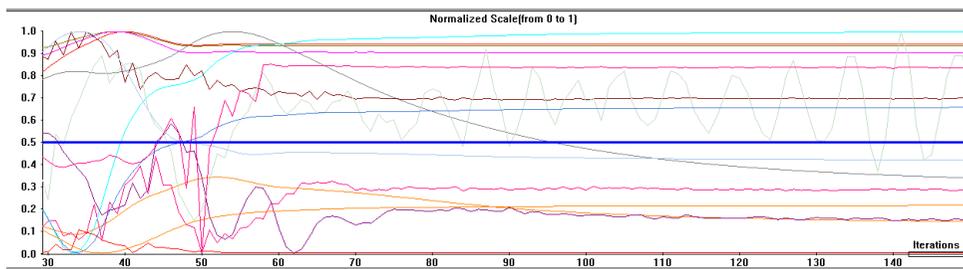


Gambar 4.40 Tekanan pada Kecepatan 0,5 m/s

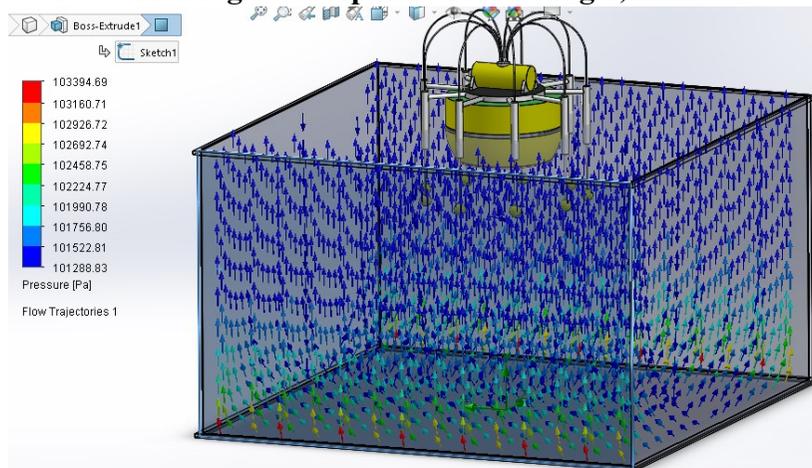
Simulasi telah dilakukan dengan asumsi kecepatan gelombang terendah, yaitu 0,4 m/s. Variabel yang diamati dalam simulasi ini yaitu tekanan fluida dan *drag force* yang mengenai *buoy* pada *linear generator*. Simulasi menunjukkan bahwa semakin dalam *buoy* ditempatkan, maka tekanan yang dihasilkan oleh fluida akan semakin besar. Tekanan yang mengenai *buoy* dapat mencapai **101,522 kPa**. Pada parameter lain, simulasi ini juga menghasilkan *drag force* sebesar **466,631 N**.

Tabel 13. Hasil Simulasi pada Kecepatan Gelombang 0,5 m/s

Variabel	Nilai	Satuan
<i>Average Velocity (Y)</i>	0,616555	m/s
<i>Average Velocity (Z)</i>	0,618249	m/s
<i>Max Velocity (Y)</i>	1,86558	m/s
<i>Max Velocity (Z)</i>	1,86561	m/s
<i>Drag Force</i>	466,177	N
<i>Friction Force</i>	484,822	N
<i>Average Turbulent Viscosity</i>	7,61497	Pa.S

**Gambar 4.41** Hasil Simulasi pada Kecepatan 0,5 m/s

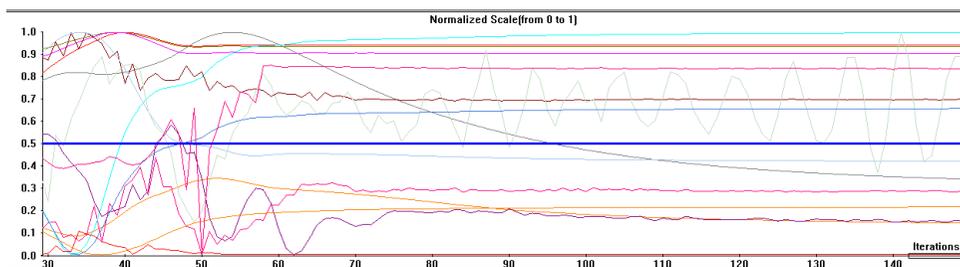
4.5.2.4 Simulasi dengan Kecepatan Gelombang 0,6 m/s

**Gambar 4.42** Tekanan pada Kecepatan 0,6 m/s

Simulasi telah dilakukan dengan asumsi kecepatan gelombang terendah, yaitu 0,6 m/s. Variabel yang diamati dalam simulasi ini yaitu tekanan fluida dan *drag force* yang mengenai *buoy* pada *linear generator*. Simulasi menunjukkan bahwa semakin dalam *buoy* ditempatkan, maka tekanan yang dihasilkan oleh fluida akan semakin besar. Tekanan yang mengenai *buoy* dapat mencapai **101,522 kPa**. Pada parameter lain, simulasi ini juga menghasilkan *drag force* sebesar **466,631 N**.

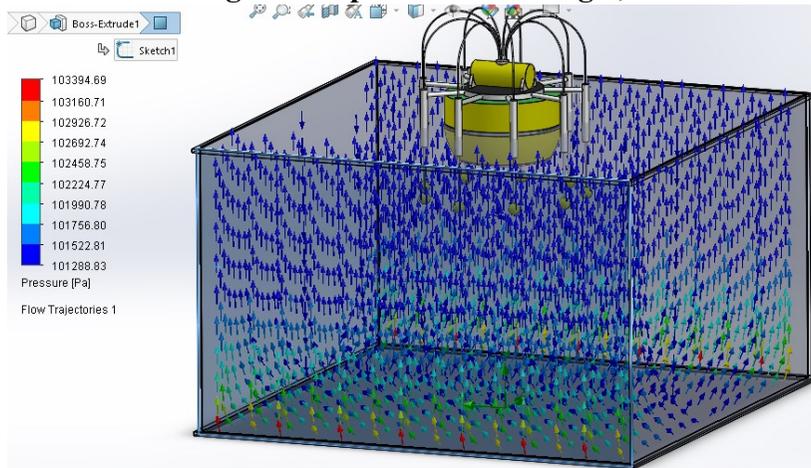
Tabel 14. Hasil Simulasi pada Kecepatan Gelombang 0,6 m/s

Variabel	Nilai	Satuan
<i>Average Velocity (Y)</i>	0,59974	m/s
<i>Average Velocity (Z)</i>	0,751386	m/s
<i>Max Velocity (Y)</i>	1,66838	m/s
<i>Max Velocity (Z)</i>	1,76754	m/s
<i>Drag Force</i>	295,341	N



Gambar 4.43 Hasil Simulasi pada Kecepatan 0,6 m/s

4.5.2.5 Simulasi dengan Kecepatan Gelombang 0,7 m/s

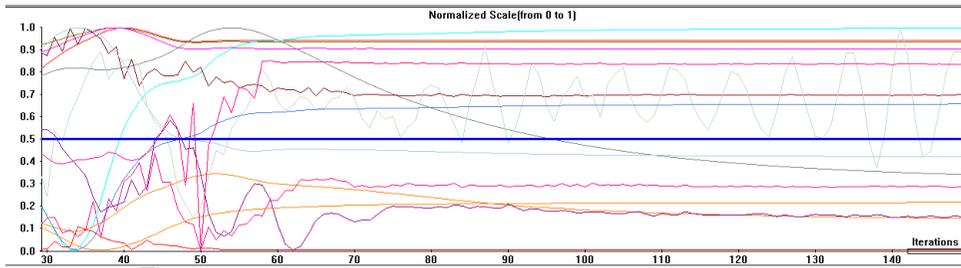


Gambar 4.44 Tekanan pada Kecepatan 0,7 m/s

Simulasi telah dilakukan dengan asumsi kecepatan gelombang terendah, yaitu 0,7 m/s. Variabel yang diamati dalam simulasi ini yaitu tekanan fluida dan *drag force* yang mengenai *buoy* pada *linear generator*. Simulasi menunjukkan bahwa semakin dalam *buoy* ditempatkan, maka tekanan yang dihasilkan oleh fluida akan semakin besar. Tekanan yang mengenai *buoy* dapat mencapai **101,522 kPa**. Pada parameter lain, simulasi ini juga menghasilkan *drag force* sebesar **466,631 N**.

Tabel 15. Hasil Simulasi pada Kecepatan Gelombang 0,7 m/s

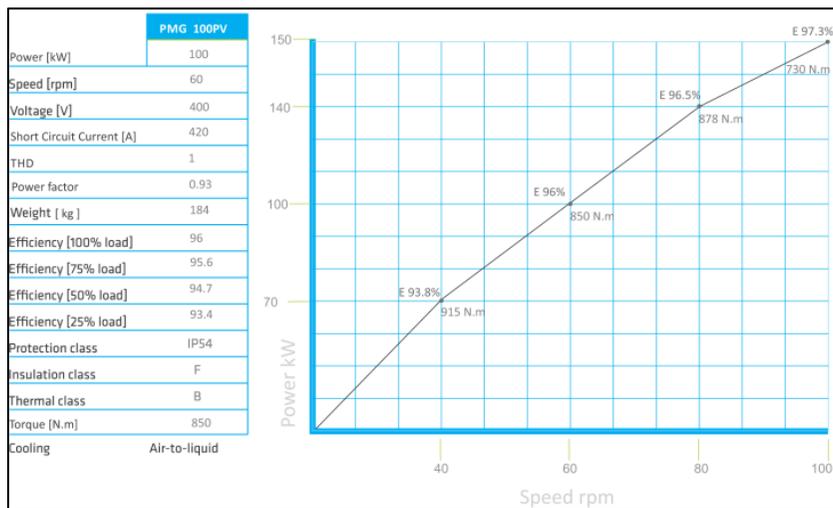
Variabel	Nilai	Satuan
<i>Average Velocity (Y)</i>	0,699839	m/s
<i>Average Velocity (Z)</i>	0,841151	m/s
<i>Max Velocity (Y)</i>	1,80588	m/s
<i>Max Velocity (Z)</i>	1,91878	m/s
<i>Drag Force</i>	274,337	N



Gambar 4.45 Hasil Simulasi pada Kecepatan 0,7 m/s

4.6 Perhitungan Daya Listrik

4.6.1 Perhitungan *Gorlov Helical Turbine*



Gambar 4.46 Spesifikasi Generator

Dari simulasi dengan menggunakan metode *computational fluids dynamic*, telah didapatkan torsi yang dihasilkan turbin pada beberapa variasi kecepatan arus laut. Torsi yang didapatkan dari simulasi akan digunakan dalam perhitungan daya listrik yang dihasilkan dari konversi energi arus laut. Torsi turbin akan disesuaikan dengan spesifikasi generator yang digunakan. Jenis generator yang digunakan yaitu *permanent magnet generator*, yaitu generator sinkron listrik yang menggunakan magnet permanen di rotor [18]. Generator dengan magnet permanen sering digunakan dalam berbagai macam peralatan pembangkit listrik tenaga air, mulai dari energi arus laut hingga gelombang pasang [55]. Generator jenis ini juga diproduksi dengan

sumbu vertikal dan sumbu horizontal dan dapat dipasang di setiap jenis turbin air [56].



Gambar 4.47 ENERSET PMG 100PV

Generator yang digunakan sebagai asumsi penerapan yaitu dengan tipe ENERSET PMG 100PV yang memiliki daya 100 kW dan tegangan sebesar 400 V. Generator ini akan bekerja secara optimal pada putaran 60 rpm dan torsi sebesar 850 Nm, yaitu dengan efisiensi sebesar 96%. Namun, generator ini juga dapat bekerja dengan baik walaupun dengan beban hanya 25% dari kapasitas, yaitu dengan efisiensi 93,4%. Berikut spesifikasi lengkap dari generator ENERSET PMG 100PV.

Tabel 16. Spesifikasi Generator yang Digunakan

Merek Generator	ENERSET PMG 100 PV	
Daya	50	kW
Putaran	60	rpm
Berat	184	kg
Torsi Generator	850	Nm

Setelah menyesuaikan hasil simulasi *CFD* dengan spesifikasi generator yang akan digunakan, maka didapatkan perhitungan daya listrik sebagai berikut:

Tabel 17. Hasil Perhitungan Daya Listrik *Gorlov Helical Turbine*

Kecepatan Arus Laut(m/s)	Torsi Turbin (nm)	Kecepatan Turbin (rpm)	Torsi Generator (nm)	Efisiensi (%)	Daya Listrik (kW)
0,66	331,334	32,9	915	94,7	34,292
0,77	330,483	38,38	915	94,7	34,204

0,88	334,676	43,83	915	94,7	34,638
0,99	341,881	49,6	915	95,6	35,720
1,11	330,165	55,32	850	95,6	37,133

Dari hasil perhitungan didapatkan daya listrik yang dihasilkan oleh generator adalah antara **34,204-36,705 kW**. Adapun torsi yang dibutuhkan generator dan efisiensi menyesuaikan dengan spesifikasi generator untuk masing-masing beban putaran. Apabila mengacu pada rata-rata kecepatan arus laut di Selat Sunda dalam satu tahun yang mencapai 0,84 m/s [17], maka diharapkan turbin ini dapat menghasilkan daya rata-rata sebesar **34,638 kW**.

4.6.2 Perhitungan *Linear Generator*

Untuk mencari energi dari gelombang laut tersebut dapat menggunakan persamaan (2), yaitu:

$$E_w = 0,195 \cdot w \cdot p \cdot g \cdot h^2 \cdot T^2$$

[13]

Dimana:

- E_w = energi total (J)
- ρ = massa jenis air laut (1025 kg/m³)
- w = lebar gelombang (asumsi 5 m)
- g = percepatan gravitasi (9,8 m/s²)
- T = periode gelombang (sec)
- h = tinggi gelombang (1 m)

Kemudian dari energi tersebut dapat dihitung pula daya listrik yang dihasilkan menggunakan persamaan (3), yaitu:

$$P_w = \frac{E_w}{T} \cdot 10^{-3}$$

[13]

Dimana :

- E_w = energi total (J)
- P_w = daya (kW)
- T = periode gelombang (sec)

Kedua persamaan diatas akan digunakan pada perhitungan daya listrik menyesuaikan hasil simulasi *computational fluids dynamic* pada *linear generator*. Berikut tabel perhitungan energi dan daya listrik yang dihasilkan oleh *linear generator* pada beberapa variasi kecepatan sumbu Y gelombang laut.

Tabel 18. Hasil Perhitungan Daya Listrik *Linear Generator*

Variabel	0,3 m/s	0,4 m/s	0,5 m/s	0,6 m/s	0,7 m/s	Satuan
Average Velocity (Y)	0,299483	0,399795	0,616555	0,59974	0,699839	m/s
Average Velocity (Z)	0,486077	0,518249	0,618249	0,751386	0,841151	m/s
Max Velocity (Y)	1,20474	1,70599	1,86558	1,66838	1,80588	m/s
Max Velocity (Z)	1,62766	1,70605	1,86561	1,76754	1,91878	m/s
Drag Force	344,501	388,157	466,177	295,341	274,337	N
Period	3,339	2,501	1,622	1,667	1,429	s
Ew	10.919,687	6.127,451	2.576,386	2.722,880	1.999,670	Joule
Pw	3,270	2,450	1,588	1,633	1,399	kW
Pw 9 Generators	29,432	22,048	14,296	14,697	12,595	kW

Dengan asumsi pengambilan rata-rata kecepatan pada nilai tengah yaitu 5 m/s, maka daya listrik yang dapat dihasilkan oleh *linear generator* adalah sebesar **1,588 kW**. Apabila *platform* ini menggunakan 9 unit *linear generator*, maka daya total yang dihasilkan dapat mencapai **14,296 kW**.

Pada *platform* ini, *linear generator* juga dapat mengonversi energi kinetik dari gelombang laut dengan memanfaatkan tekanan udara yang dihasilkan oleh gerak translasinya. Udara bertekanan akan diarahkan menuju *air reservoir* untuk kemudian dialirkan menuju motor DC sebagai generator. Udara bertekanan akan memutar rotor pada motor untuk kemudian menghasilkan energi listrik. Adapun berdasarkan hasil simulasi, tekanan yang dihasilkan oleh masing-masing *linear generator* yaitu **101,288 -101,522 kPa** atau sekitar **1,01 bar**.



Gambar 4.42 *Air Reservoir* [57]

Air reservoir yang digunakan yaitu FESTO CRVZS-0.1 yang dapat bekerja pada tekanan 0,95-16 bar dan suhu antara -10°C hingga 100°C. Alat ini memiliki panjang 132 mm menyesuaikan dimensi dari *platform*. *Air reservoir* ini akan dihubungkan dengan *compressor* agar dapat mengalirkan udara menuju motor DC. Berikut dimensi lengkap dari *air reservoir*.

Type	B ±2	B1	B2 ±2	D ∅	D1	D2 ∅	D3 ∅	H ±1	H1 ±1
CRVZS-0.1	51	14	-	40	G½	15	42	43	28
Type	L ±1	L1		L2	L3	∅	Max. tightening torque for connecting thread [Nm]		
CRVZS-0.1	132	min. 13	max. 50	10	6	19	15		

Gambar 4.43 Dimensi *Air Reservoir* [57]

Sementara itu motor DC yang digunakan sebagai generator adalah OMEC Motor MS2 IE2 6-POL yang memiliki daya sebesar **45 kW** dengan tegangan 400V dan arus 81 A. Motor ini juga memiliki kecepatan maksimal 990 rpm dan *power factor* 0,84 serta efisiensi 94,8% [58].

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 5 PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian maka dapat diambil kesimpulan bahwa:

1. Rancangan pembangkit listrik mengapung berbasis *gorlov helical turbine* dan *linear generator* telah berhasil didesain dengan asumsi penerapan di selat sunda. *Gorlov helical turbine* dirancang dengan panjang 1,6 m dan diameter 1 m. Turbin akan diletakkan pada bagian tengah platform pada kedalaman 1 meter untuk menangkap arus laut. *Gorlov helical turbine* nantinya akan dilengkapi dengan gearbox untuk meningkatkan putaran untuk kemudian dikonversikan menjadi listrik oleh permanent magnet generator. Sedangkan *buoy* beserta *linear generator* yang berjumlah 9 buah akan diletakkan pada sekeliling platform. *Linear generator* sendiri akan dirancang dengan panjang 1 meter menyesuaikan tinggi gelombang laut rata-rata di selat sunda.
2. Dari hasil simulasi *computational fluid dynamic* dan analisis matematis didapatkan daya listrik yang dihasilkan oleh *gorlov helical turbine* yaitu sebesar **34,638 kW**. Sedangkan daya yang dihasilkan oleh *linear generator* dapat mencapai **14,296 kW**. Sehingga total daya listrik yang dapat dihasilkan oleh *platform* ini yaitu sebesar **48,934 kW**.

5.2 Saran dan Rekomendasi

Dari hasil analisis pada penelitian ini, penulis memberikan beberapa rekomendasi terkait dengan pengembangan energi baru dan terbarukan (EBT), yaitu:

1. Indonesia memiliki potensi yang besar untuk pengembangan energi baru dan terbarukan. Namun untuk sampai pada tahap penerapan, masih diperlukan banyak riset agar dapat mengimplementasikan teknologi tepat guna.
2. Hasil dari penelitian ini masih harus divalidasi dengan data eksperimen di lapangan dalam bentuk *prototype* sebagai kelanjutan dari penelitian ini.
3. Untuk penelitian berikutnya, karya ini perlu dikembangkan lagi dengan mempertimbangkan sistem transmisi listriknya

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, “Kajian Indonesia Energy Outlook,” 2012.
- [2] Kementerian ESDM, “Jurnal Energi Program Strategis EBTKE dan Ketenagalistrikan,” *Media Komun. Kementeri. Energi dan Sumber Daya Miner.*, 2016.
- [3] S. R. Utami, “Studi Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut Dengan Menggunakan Sistem Oscilating Water Column (Owc) Di Tiga Puluh Wilayah Kelautan Indonesia,” *Dep. Tek. Elektro Fak. Tek. Univ. Indones.*, 2007.
- [4] A. M. Gorlov, A. N. Gorban’, dan V. M. Silantyev, “Limits of the turbine efficiency for free fluid flow,” *J. Energy Resour. Technol. Trans. ASME*, vol. 123, no. 4, hal. 311–317, 2001.
- [5] PLN, “Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik PT. PLN (Persero),” 2018.
- [6] N. Chettiar, S. Narayan, dan J. N. Goundar, “Design of a Gorlov Turbine for Marine Current Energy Extraction Design of a Gorlov Turbine for Marine Current Energy Extraction,” no. July, 2015.
- [7] Niharman dan R. Sipahutar, “The Effect of Steering Blade Angles of Helical Turbine for Power Generation in Irigation Dam of Seluma Bengkulu,” vol. 2, no. 1, hal. 13–16, 2015.
- [8] I. S. Sekti dan I. R. Kusuma, “SKRIPSI – ME-141501 PERANCANGAN GENERATOR LINEAR MAGNET PERMANEN UNTUK PENERANGAN DI WISATA PANTAI SENDIKI , MALANG , DEPARTEMEN TEKNIK SISTEM PERKAPALAN Fakultas Teknologi Kelautan Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya 2018,” 2018.
- [9] F. Rivantoro dan I. S. Arief, “Studi Pemilihan Desain Pembangkit Listrik Tenaga Arus Laut (Pltal) Menggunakan Metode Analytical Hierarchy Process (Ahp),” *J. Tek. ITS*, vol. 4, no. 2, hal. B114–B118, 2015.
- [10] A. Nontji, *Laut Nusantara*. Jakarta: Djambatan, 1993.
- [11] C. Mulyabakti, M. I. Jasin, dan J. D. Mamoto, “Analisis Karakteristik Gelombang Dan Pasang Surut Pada Daerah Pantai Paal Kecamatan Likupang Timur Kabupaten Minahasa Utara,” *J.*

- Sipil Statik*, vol. 4, no. 9, hal. 585–594, 2016.
- [12] A. C. Wakkary, M. I. Jasin, dan A. K. T. Dundu, “Studi Karakteristik Gelombang Pada Daerah Pantai,” *Sipil Statik*, vol. 5, no. 3, hal. 167–174, 2017.
- [13] M. . J. McCormick, *Wave Energy Conversion*. Boston: John Wiley Sons Inc, 1981.
- [14] A. Ikhsan Firmansyah, B. Pranoto, P. Ketenagalistrikan, E. Baru, dan D. Konservasi Energi, “Kajian Pemanfaatan Energi Arus Laut Sebagai Pembangkit Listrik,” *Ketenagalistrikan Dan Energi Terbaru Desember*, vol. 11, no. 2, hal. 123–136, 2012.
- [15] S. Anderson, “The Use of the Helical Turbine in River Currents,” no. September, 2009.
- [16] W. B. Nugroho, I. R. Kusuma, dan S. Sarwito, “Kajian Teknis Gejala Magnetisasi pada Linear Generator untuk Alternatif Pembangkit Listrik,” *Tek. Pomits*, vol. 3, no. 1, hal. 95–98, 2014.
- [17] R. F. Supian, Budi , Suhendar, “Studi Pemanfaatan Arus Laut Sebagai Sumber Energi Listrik Alternatif di Wilayah Selat Sunda,” *Setrum Vol. 2, No. 1, Juni 2013*, vol. 2, no. 1, hal. 1–9, 2013.
- [18] R. Pradinata, “Analisa Pengaruh Beban Terhadap Efisiensi Generator di PLTG CNG Jakabaring,” vol. 53, no. 9, hal. 1689–1699, 2017.
- [19] W. Sunarlik, “Prinsip Kerja Generator Sinkron *.”
- [20] R. Harahap, “Generator Induksi Berpenguatan Sendiri,” no. 1, hal. 83–88, 2016.
- [21] J. Immanuel, “Pemodelan dan Analisis Dinamik Self Excited Turbin Angin,” vol. 1, no. 1, hal. 1–6, 2013.
- [22] K. Ikhsan, M. Mawardi, A. Jannifar, dan Z. Zaimahwati, “Rancang Bangun Alat Simulator Gearbox Untuk Pengujian Kinerja Minyak Pelumas,” *J. Mesin Sains Terap.*, vol. 1, no. 2, 2018.
- [23] R. Manasseh, S. Sannasiraj, K. L. McInnes, V. Sundar, dan P. Jalihal, “Integration of wave energy and other marine renewable energy sources with the needs of coastal societies,” *Int. J. Ocean Clim. Syst.*, vol. 8, no. 1, hal. 19–36, 2017.

- [24] K. Ondara, G. A. Rahmawan, U. J. Wisna, dan N. N. Hasanah Ridwan, "Hidrodinamika Dan Kualitas Perairan Untuk Kesesuaian Pembangunan Keramba Jaring Apung (Kja) Offshore Di Perairan Keneukai, Nangroe Aceh Darussalam," *J. Kelaut. Nas.*, vol. 12, no. 2, hal. 45, 2017.
- [25] D. N. Sugianto dan A. ADS, "Studi Pola Sirkulasi Arus Laut di Perairan Pantai Provinsi Sumatera Barat," *J. Ilmu Kelaut. UNDIP*, vol. 12, no. 2, hal. 79–92, 2007.
- [26] Z. F. Haza, "Studi Drag Force Gelombang Air Laut Terhadap Fondasi Tiang Mini (Miniple) di Kawasan Pantai Parangtritis," *J. Sci. Tech*, vol. 1, no. 1, 2015.
- [27] R. M. Lopulalan, S. Sarwito, dan E. S. Koenhardono, "Desain Blade Turbin Pembangkit Listrik Tenaga Arus Laut di Banyuwangi Berbasis CFD," vol. 5, no. 2, hal. 424–430, 2016.
- [28] T. Al Tanto *et al.*, "Karakteristik Arus Laut Perairan Teluk Benoa – Bali," *J. Ilm. Geomatika*, vol. 23, no. 1, hal. 37, 2017.
- [29] A. Bayhaqi, M. R. Iskandar, dan D. Surinati, "Pola Arus Permukaan dan Kondisi Fisika Perairan di Sekitar Pulau Selayar pada Musim Peralihan 1 dan Musim Timur Surface Current Pattern and Physics Condition of Waters Around Selayar Island in the First Transitional and Southeast Monsoons Abstrak Pendahul," vol. 2, no. August 2015, hal. 83–95, 2017.
- [30] F. Ramadyan dan I. M. Radjawane, "Arus Geostropik Permukaan Musiman Di Perairan Arafura-Timor," *Ilmu Kelaut. dan Teknol. Kelaut. Trop.*, vol. 5, no. 2, hal. 261–272, 2013.
- [31] T. Putri, A. Rifai, dan A. Ismanto, "Studi Karakteristik Pola Arus Di Perairan Selat Lampa, Kabupaten Natuna, Provinsi Kepulauan Riau," *J. Oseanografi*, vol. 4, no. 2, hal. 138790, 2015.
- [32] D. Salim, Y. Yuliyanto, dan B. Baharuddin, "Karakteristik Parameter Oseanografi Fisika-Kimia Perairan Pulau Kerumpunan Kabupaten Kotabaru Kalimantan Selatan," *J. Enggano*, vol. 2, no. 2, hal. 218–228, 2017.
- [33] H. N. Aunillah, Purwanto, dan D. N. Sugianto, "Pola Arus di Perairan Pulau Pari Kepulauan Seribu DKI Jakarta," *J. Oseanografi*, vol. 3, no. 4, hal. 642–650, 2014.
- [34] Hadikusumah, "Karakteristik Gelombang Dan Arus Di Eretan,

- Indramayu,” *MAKARA Sci. Ser.*, vol. 13, no. 2, hal. 163–172, 2010.
- [35] G. Handoyo dan A. A. . Suryoputro, “Kondisi Arus dan Gelombang Pada Berbagai Kondisi Morfologi Pantai di Perairan Pantai kendal Provinsi Jawa Tengah,” *J. Kelaut. Trop.*, vol. 18, no. 1, hal. 33–37, 2015.
- [36] Hasriyanti, E. Syarif, dan Maddatuang, “Analisis karakteristik kedalaman perairan, arus dan gelombang di Pulau Dutungan Kabupaten Barru,” *J. Sci. Pinisi*, vol. 1, no. 1, hal. 44–54, 2015.
- [37] G. Loupatty, “Karakteristik Energi Gelombang dan Arus Perairan di Provinsi Maluku,” *J. Barekeng*, vol. 7, no. 1, hal. 19–22, 2013.
- [38] A. S. Atmadipoera, “STRUKTUR DAN VARIABILITAS ARLINDO DI LAUT SULAWESI STRUCTURE AND VARIABILITY OF INDONESIAN THROUGHFLOW,” *J. Kelaut. Nas.*, vol. 11, no. 3, hal. 159–174, 2016.
- [39] . Suandi, M. I. Jumarang, dan . Apriansyah, “Analisis Pola Sirkulasi Arus di Perairan Pantai Sungai Duri Kabupaten Bengkayang Kalimantan Barat,” *Positron*, vol. 6, no. 2, hal. 60, 2017.
- [40] S. Irawan, R. Fahmi, dan A. Roziqin, “Kondisi Hidro-Oseanografi (Pasang Surut, Arus Laut, Dan Gelombang) Perairan Nongsa Batam,” *J. Kelaut. Indones. J. Mar. Sci. Technol.*, vol. 11, no. 1, hal. 56, 2018.
- [41] S. Ayunarita dan M. Galib, “the Study of Current Pattern, Tides and Waves on the Beaches Village Pangke Villagers Meral Karimun District Riau Archipelago Province,” 2017.
- [42] A. D. Siswanto dan W. A. Nugraha, “Studi Parameter Oseanografi Di Perairan Selat Madura Kabupaten Bangkalan,” *J. Kelaut.*, vol. 7, no. 1, hal. 45–49, 2014.
- [43] A. Kasharjanto, D. Rahuna, dan R. B. Aditya, “Uji Kinerja Turbin Pembangkit Listrik Arus Laut Lambung Ganda 10 Kilowatt Di Jembatan Suramadu,” *J. Ilmu Pengetah. dan Teknol. Kelaut.*, vol. 14, no. 3, hal. 79–86, 2017.
- [44] BMKG, “Prakiraan Wilayah Perairan Indonesia,” 2020.
- [45] H. A. Luhur P, E. S. Hadi, dan W. Amiruddin, “Jurnal teknik

- perkapalan,” *Tek. Perkapalan*, vol. 5, no. 2, hal. 421–430, 2017.
- [46] Ericsson Antenna Technology Germany, “Kathrein Mobile Communication,” 2019.
- [47] aqua signal, “Light on Board,” 2007.
- [48] stealth.co.id, “SDC-IPE324P 5.0 MP IP Panoramic Fish-Eye Camera.” [Daring]. Tersedia pada: <http://www.stealth.co.id/kamera-cctv/ip-camera/ip-dome-camera/sdc-ipe324p-2/>.
- [49] gfps.com, “2291 Contacting Radar (TDR).” [Daring]. Tersedia pada: https://www.gfps.com/appgate/ecat/common_flow/10007R/ES/en/109620/109666/429099/527562/P527096/product.html.
- [50] Rustamaji dan E. Djaelani, “Radar Jamming Suatu Konsep Rancang Bangun,” *Encycl. United States Natl. Secur.*, vol. 11, no. 2, hal. 71–80, 2012.
- [51] satellitophonestore.com, “Spot SmartOne C Satellite Asset Tracker.” [Daring]. Tersedia pada: <https://satellitophonestore.com/catalog/sale/details/spot-smartone-c-satellite-asset-tracker>. [Diakses: 30-Mei-2020].
- [52] M. Agus, S. W. Widyanto, S. Wisnugroho, dan S. Asuhadi, “Automatic Identification System (AIS) Berbasis Mikrokontroler untuk Pengawasan Nelayan di Wakatobi,” hal. 1–7, 2018.
- [53] A. Adilah, E. B. Djatmiko, dan R. W. Prastianto, “Kajian Kekuatan Struktur Semi-submersible dengan Konfigurasi Enam Kaki Berpenampang Persegi Empat Akibat Eksitasi Gelombang,” *J. Tek. POMITS*, vol. 2, no. 1, 2013.
- [54] D. A. Taylor, *Merchant Ship Construction 4th Edition*. IMAREST (Institute of Marine Engineering Science & Technology), 1998.
- [55] L. Wei, T. Nakamura, dan K. Imai, “Development and optimization of low-speed and high-efficiency permanent magnet generator for micro hydro-electrical generation system,” *Renew. Energy*, vol. 147, hal. 1653–1662, 2020.
- [56] Enerset Electric, “Low Speed Generator Catalogue,” 2015.
- [57] FESTO, “Air reservoirs CRVZS,” 2010.

[58] OMEC MOTORS, “Electric Motors Catalogue.”

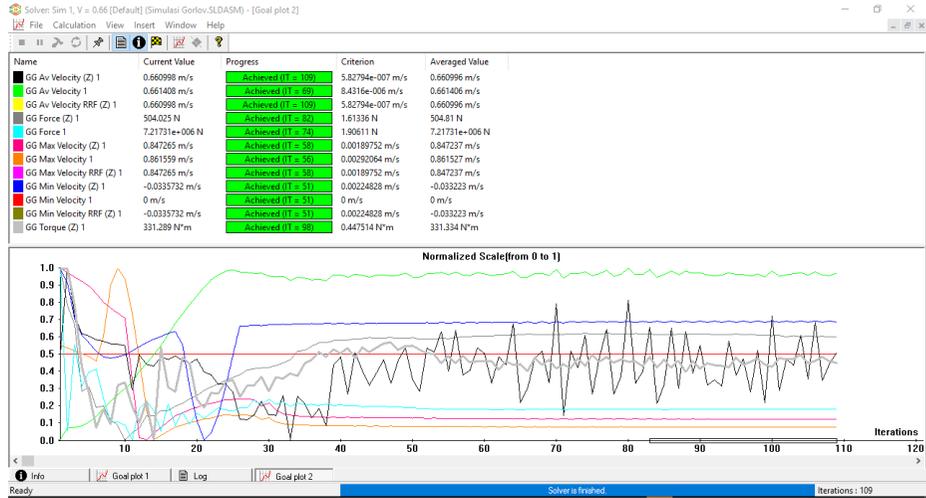
“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LAMPIRAN

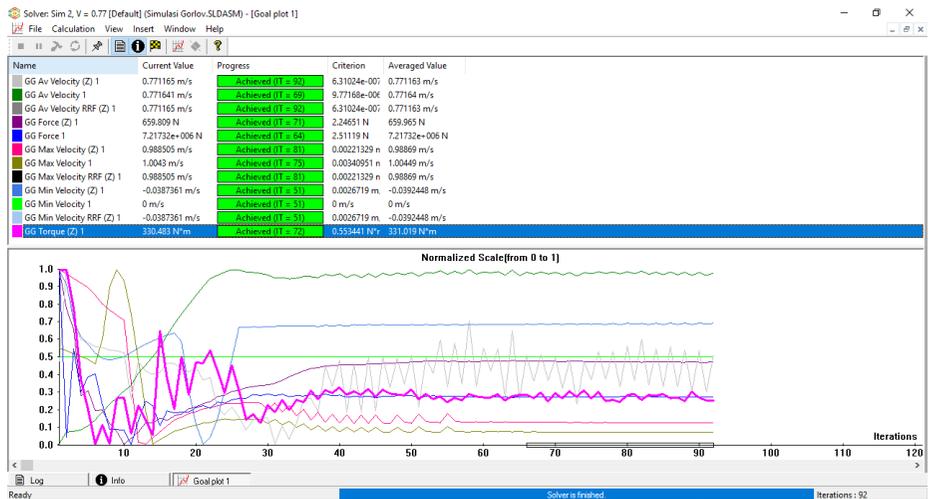
Lampiran 1. Hasil Simulasi *Computational Fluids Dynamic*

A. Simulasi *Gorlov Helical Turbine*

1. Kecepatan 0,66 m/s



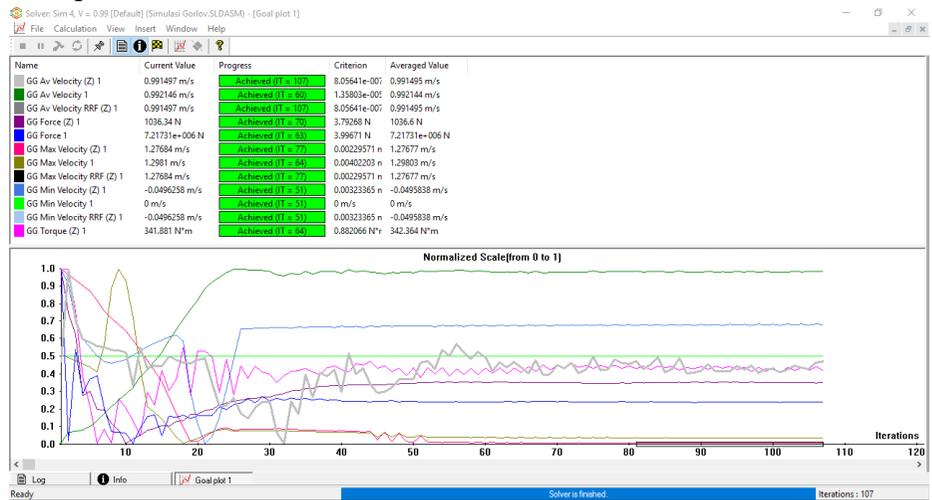
2. Kecepatan 0,77 m/s



3. Kecepatan 0,88 m/s



4. Kecepatan 0,99 m/s

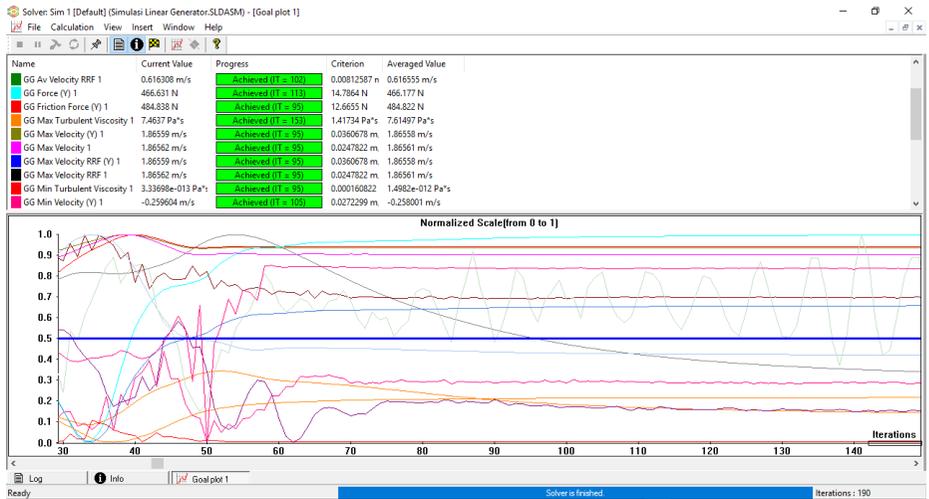


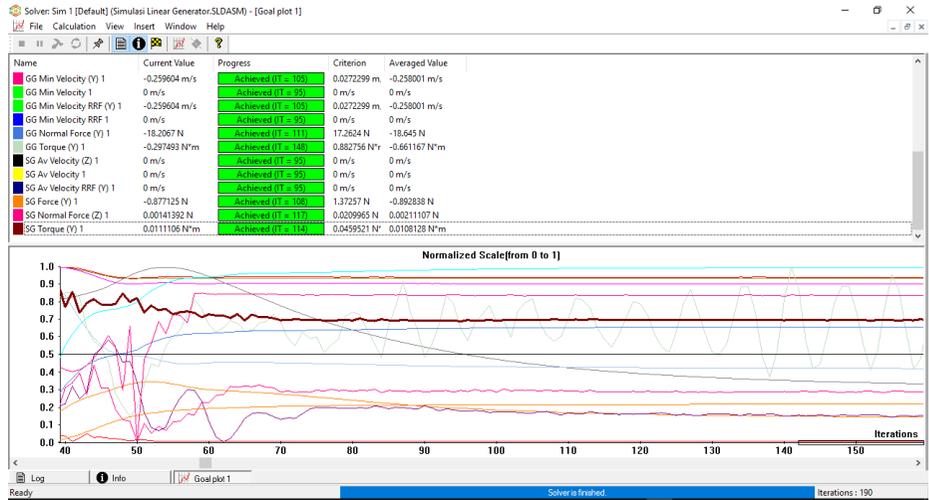
5. Kecepatan 1,1 m/s



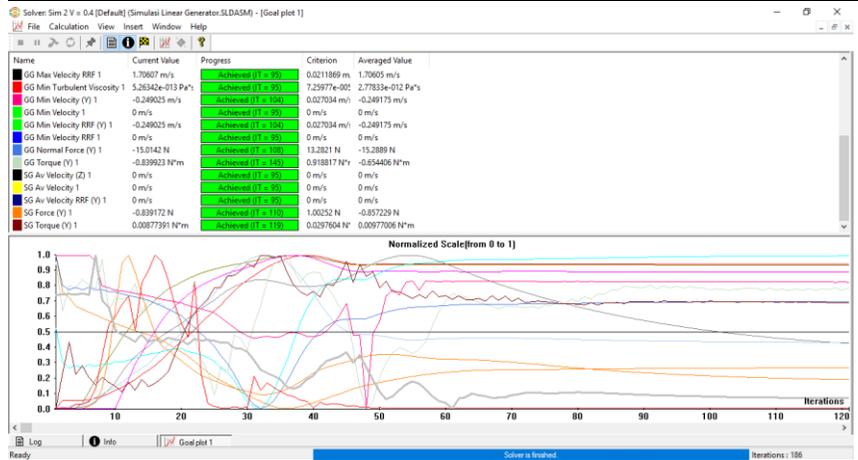
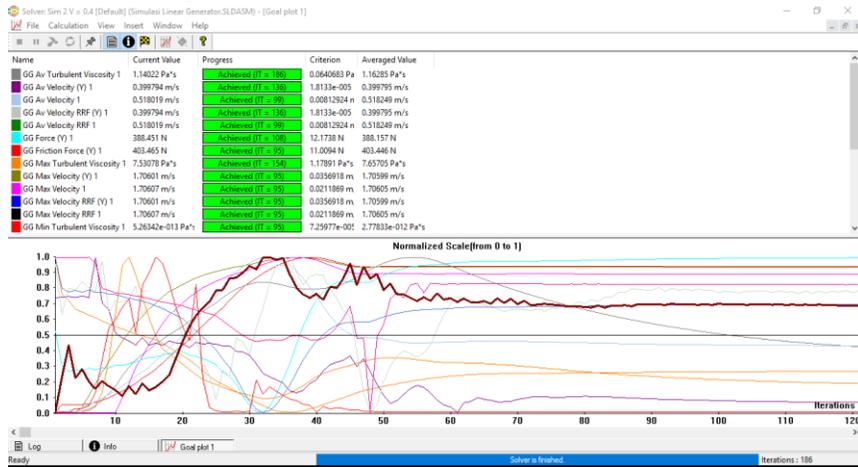
B. Simulasi Linear Generator

1. Kecepatan 0,4 m/s





2. Simulasi kecepatan 0,5 m/s



Lampiran 2. Spesifikasi Detail Peralatan

1. Navigation Light

Series 32			aqua signal - NAVIGATION LIGHTS		
USCG	IMO	RINA			
MCA	GL	BSH			
A-16	CE	LED			
	12 V 24 V				

Series 32
LED navigation lights

Application
Applications depending on required visibilities.
See table in technical information

Housing
Polycarbonate in black or white, shock resistant, non-corrosive, non-magnetic, seawater resistant. The LED-body is thermally connected to a machined aluminum casing which keeps it cool allowing a lifetime of more than 50,000 hours. Optional stainless steel covers available for port-, starboard-, stern- and bicolor lights.

Electronics and the LED are molded into a durable watertight casing keeping them safe from water and dust.

Optics
Patented optics are UV- and saltwater resistant requiring only a single LED per light source

Electric
Low power consumption (1,5 W per sector). Current from 12 - 24 V, + / - 20 % (without losing lifespan). Invers polarity protection

5

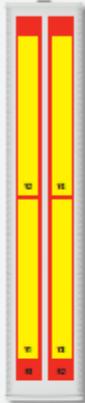
6



mm/inch

2. Communication Antennas

378 Platform – World's Smallest Antenna with Side-by-Side Lowband Arrays



800372991

12-Port Hexaband 2L4H	Y1, Y2	Y1, Y2	Y1, Y2
Frequency range [MHz]	698–960	905–2000	907–2000
Dual polarization	✓	✓	✓
Gain [dBi]	15.5	15.9	16.3
Horizontal HPBW [°]	68	65	65
Vertical HPBW [°]	10.8	10.8	10.8
Tilt range [°]	2.5–91.5	2–0	2–41
Port-to-port isolation [dB]	> 25	> 28	> 28
PAR 2 x 42 dBS [dB]		< -152	
Size L/W/H [mm]		107/276/154	

Frequency Range [MHz]	Array	Connectors/Ports
698–960	Y1	1–2
698–960	Y2	3–4
905–2000	Y1	5–6
907–2000	Y2	7–8
905–2000	Y3	9–10
907–2000	Y4	11–12

Correlation table

12-Port Hexaband 2L4H, 800372991

Features

- Revolutionary width reduction from 508 mm to 378 mm
- 2 ultra broadband highband arrays (1427–2690 MHz)
- Market-leading width for parallel lowbands
- First antenna in ultra compact platform worldwide

Functions

- Wind load and weight reduction
- L-band for supplemental downlink
- All bands with independent electrical downtilt
- Use of two separate arrays for 700/900/900 MHz
- Optimal side lobe behaviour through advanced dipole feeding concept

Benefits

- Reduced tower rental costs thanks to:
 - 25% less weight (compared to current platform) – TCO
 - 30% less wind load (compared to current platform) – TCO
- Relaxed tower construction (statics benefit) – TCO
- Increased data throughput at no additional antenna cost
- Ultra broadband dipole ready for L-band use
- Guarantees optimal network performance by avoiding intermodulation products caused by frequency combination of 700/900/900 MHz
- 12 ports (4 x 698–960 MHz, 4 x 1427–2690 MHz, 4 x 1695–2690 MHz)

Site preparation for 5G technology

- Reduces the number of antennas in the field: Existing installations with fewer ports will be replaced by antennas with a higher number of bands and the same form factor
- Fewer antennas and lower wind load allow the installation of additional 5G devices

Layout of interface



2G–5G Hybrid Antenna

Hybrid Passive and Active Antenna System

➤ Innovative Antenna System for 2G, 3G, 4G, 5G

- Cell sites are often space constrained, making it challenging, if not impossible, to deploy additional hardware, in particular, antennas
- Kathrein Mobile Communication is introducing this innovative antenna system aimed at overcoming these issues, while ensuring the delivery of next generation mobile services
- This new, high-performance antenna system seamlessly integrates a multi-band passive antenna and a massive MIMO active antenna into a single unit

➤ Ready for 5G All-in-One

Features

- Three separate field-replaceable products, which can be integrated on site into a single physical antenna:
 - Passive multi-band antenna
 - Mechanical Integration Kit (MIK)
 - mMIMO active antenna system
- Available for all Kathrein Mobile Communication 448, 488 platform antennas
- Designed to carry various massive MIMO radios
- Fulfills typical overall maximum height requirements

Functions

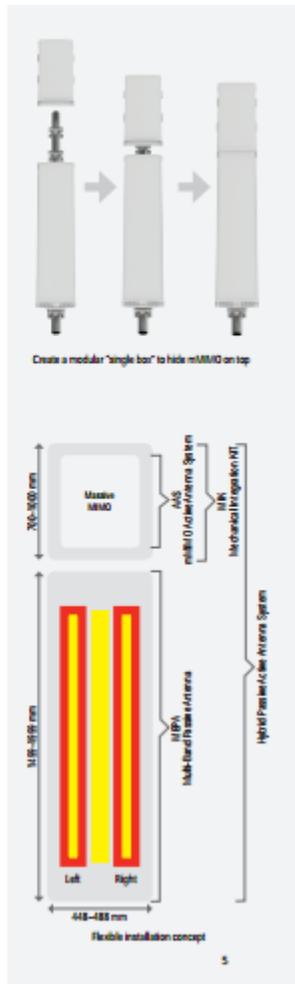
- Innovative antenna system combining various mobile radio standards and technologies
 - State-of-the-art passive multi-band antenna technology with integrated 4 x 4 MIMO support
 - Latest 5G mMIMO technology

Benefits

- Flexible and modular deployment, easy installation
- Existing antenna sites can be easily upgraded to 5G
- Optimal cost-benefit ratio
- Improved visual appearance

Three installation options

- Stand-alone MBPA
- MBPA with empty MIK; can be installed post installation of option 1
- MBPA, MIK and mMIMO; can be installed post installation of option 1 or 2



New Approach to Wind Load Reduction

Vortex Generators (VGs)



Vortex Generators (VGs)

Features

- New approach to wind load reduction
- First ever usage of vortex generators for antennas
- Possible for all new Kathrein Mobile Communication antenna platforms
- Approved in three different wind tunnels
- Approved for all wind speeds

Functions

- Affects the wind flow around the antenna
- Wind flow is directed closer to the antenna
- Reduces drastically the frontal wind load
- No risk of extreme lift effects

Benefits

- Relaxed tower construction (statics benefit)
- Easier to implement antennas in existing sites
- Less operating expenses
- Best installation space to wind load ratio

Visualisation of the Streamlines in the Wind Tunnel



Without VGs



With VGs

New Approach to Wind Load Reduction

Vortex Generators (VGs)

Wind Tunnel Tests

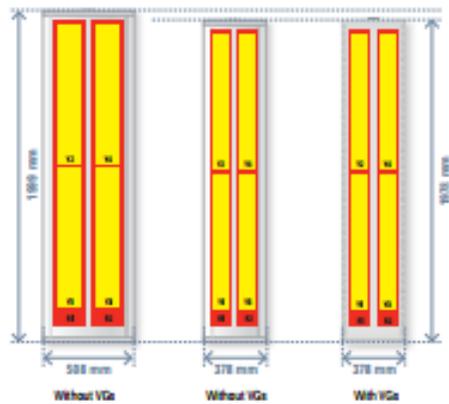
- Measured values
- Accepted by civil engineers and authorities
- All wind directions can be measured
- Results can be used for validation

Comparison Between Different Antenna Designs and the Impact on Wind Loads

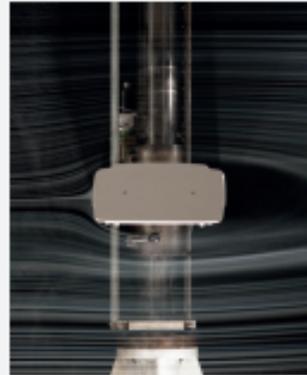
Advantages with new antennas:

- Smaller antenna design → less installation space
- Reduced wind loads
- Optimized profile for best performance

Tower Loading Improvement



	80018001 Wind load at 150 km/h	Wind load at 150 km/h	80037001 Wind load at 150 km/h
Frontal	130 N	85 N	45 N (~-65%)
Maximal	140 N	85 N	85 N (~-38%)
Weight	48.7 kg	37 kg	37 kg (~-25%)



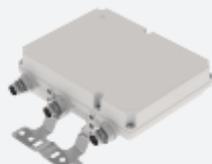
Wind tunnel tests

Detailed information about the methodology and findings about wind loads can be found online in the White Paper "Base Station Antennas – Reliable Wind Load Calculation".
www.kathrein.com → Support → Technical Documents
 → Windload



Antenna Line Devices

Boxes Between Antenna and Radio – Disposable or Essential?



Multi-band Combiner



Multi-band TMA with RF bypass



50-ohm Load



Smart Bias Tee

An operator's daily challenge is increasing capacity and coverage of mobile communication sites to quench the thirst for data in a highly competitive environment. But why still use Antenna Line Devices (ALDs), when multi-band Remote Radio Units and Active Antenna Solutions are already available?

Mobile communication operators have invested a fortune over the last few years to establish a mobile communication infrastructure as we have it today. For increasing the existing performance to cope with future requirements, there are in principle two options: build up completely new sites in a kind of green field approach or upgrade existing sites.

At first sight, green field approach has a certain charm, as it opens up the possibility to solely use the latest technology with best data rates and energy efficiency. But realistically it would cost another fortune with an undesirably high period for amortisation in times of massively decreasing revenue per data unit. Therefore upgrading existing sites by adding new spectrum and technology is the more reasonable approach for most operators. And this is where Antenna Line Devices come into play.

Space is limited everywhere — but especially on top of the mast. Installation of additional radios to add new frequency bands or apply 4TAR/2TOR instead of SISO can in most cases better be realized ground based. Multi-band Combiners allow an efficient use of existing feeder cables or minimizing the number of necessary new feeders. When installing RRUs near the antenna, combiners can be used to feed-in this new signal to the antenna. In case of poor RI-sensitivity of legacy sites, TMAs are used to overcome this weakness and improve performance of the existing infrastructure. This minimises the necessary investment and downtime of the network compared to the installation of new RRUs.

There's no one-fits-all upgrade solution, since the existing infrastructure varies very much from operator to operator. Kathrein Mobile Communication offers a broad ALD portfolio with approximately 400 products that covers most use cases in the frequency range from 858 to 2650 MHz. This broad ALD portfolio assures the availability of the specific product necessary for a specific use case.

High reliability and robustness of our ALDs in combination with excellent PIM performance help to decrease the total cost of ownership when installing ALDs.

To learn more about Kathrein Mobile Communication's ALD portfolio, please visit our website www.kathrein.com.