



DISERTASI - MO236505

Studi Peningkatan Daya Turbin pada Sistem Konversi Energi Arus Laut Berbasis TSR Dibantu Motor Listrik

CATUR RAKHMAD HANDOKO
04111960010003

DOSEN PEMBIMBING
Prof. Ir. Mukhtasor, M.Eng., Ph.D
Dr. Eddy Setyo Koenhardono, S.T., M.Sc

PROGRAM DOKTOR
DEPARTEMEN TEKNIK KELAUTAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2024

LEMBAR PENGESAHAN DISERTASI

Disertasi disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar

Doktor (Dr.)

di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

Catur Rakhmad Handoko

NRP. 04111960010003

dengan Judul Disertasi

**Studi Peningkatan Daya Turbin pada Sistem Konversi Energi Arus Laut
Berbasis TSR Dibantu Motor Listrik**

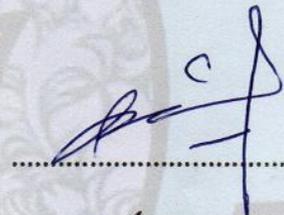
Tanggal Ujian: 16 Juli 2024

Periode Wisuda: September 2024

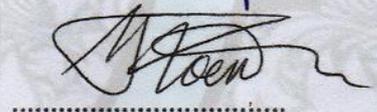
Disetujui oleh:

Pembimbing:

1. Prof. Ir. Mukhtasor, M.Eng., Ph.D
NIP. 196904201994031003

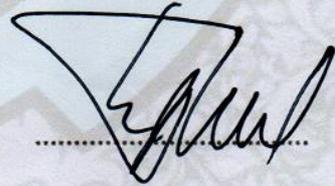


2. Dr. Eddy Setyo Koenhardono, S.T., M.Sc.
NIP. 196807011995121001

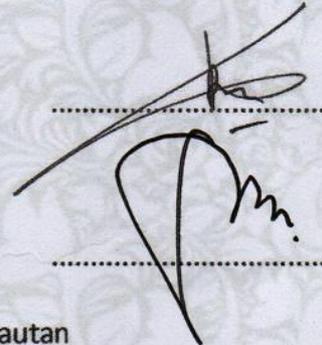


Penguji:

1. Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D
NIP. 196412281990031002



2. Dr. Indra Ranu Kusuma, ST, M.Sc
NIP. 197903272003121001



3. Muhammad Aziz Muslim, ST., MT., Ph.D
NIP. 197412032000121001

Kepala Departemen Teknik Kelautan
Fakultas Teknologi Kelautan



Prof. Herman Pratikno, S.T., M.T., Ph.D.
NIP: 197304152000031001

Studi Peningkatan Daya Turbin pada Sistem Konversi Energi Arus Laut Berbasis TSR Dibantu Motor Listrik

Nama Mahasiswa : Catur Rakhmad Handoko
NRP : 04111960010003
Promotor : Prof. Ir. Mukhtasor, M.Eng., Ph.D
Co – Promotor : Dr. Eddy Setyo Koenhardono, S.T., M.Sc

Abstrak

Tantangan utama dalam konversi energi arus laut adalah sifat arus yang fluktuatif, menyebabkan rendahnya faktor kapasitas sistem Pembangkit Listrik tenaga Arus Laut (PLTAL). Efisiensi PLTAL salah satunya ditentukan oleh koefisien daya atau C_p yang dipengaruhi oleh *Tip Speed Ratio*. Penelitian ini bertujuan untuk mengatasi tantangan tersebut melalui optimasi sistem konversi energi berbasis *Tip Speed Ratio* (TSR) yang dibantu oleh motor listrik.

Penelitian ini dilakukan dengan pembuatan model Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Arus Laut (PLTAL) untuk keperluan studi peningkatan daya turbin berbasis kontrol *Tip Speed Ratio* (TSR). Sistem ini terdiri dari simulator turbin, sistem transmisi mekanik dan hidrolik, generator dan kontroler. Pengujian dilakukan di laboratorium untuk mengukur kinerja sistem. Tahapan riset pendukung mencakup pengujian simulator turbin arus laut, pengujian generator dan implementasi optimasi kontrol TSR pada sistem PLTAL dengan sistem transmisi mekanik. Dan untuk mendapatkan kelebihan dalam hal fleksibilitas dalam penempatan peralatan pendukung PLTAL maka dilakukan juga implementasi kontrol TSR pada sistem PLTAL dengan sistem transmisi hidrolik.

Hasil penelitian menunjukkan hasil bahwa pengujian simulator turbin arus laut dapat bekerja dengan baik. Fitur pengaturan torsi berhasil dikembangkan sehingga hasil perhitungan dan pengukuran torsi memiliki perbedaan yang sangat kecil. Pengujian generator juga menunjukkan bahwa perubahan torsi, daya

mekanik turbin dan daya elektrik yang dihasilkan menunjukkan perilaku hubungan turbin dan generator sebagaimana yang diharapkan. Implementasi kontrol TSR pada sistem dengan transmisi mekanik menunjukkan peningkatan daya turbin yang dinyatakan dengan nilai C_p sebesar 0.44 dan TSR sebesar 6.27 yang mendekati nilai optimum dengan perbaikan daya sebesar rata-rata 33%. Sementara itu implementasi kontrol TSR pada sistem dengan transmisi hidrolik didapatkan kenaikan daya sebelum dan sesudah optimasi sebesar rata-rata 16.3% meskipun ditemukan fakta adanya kehilangan daya yang tak diharapkan akibat kerugian pada sistem transmisi hidrolik, sehingga diperlukan kajian lebih lanjut terkait hal ini.

Kata Kunci: Sistem Konversi Energi Arus Laut, Simulator Turbin, *Tip Speed Ratio*, Pelacakan Titik Daya Maksimum.

Study on TSR-Based Increasing Turbine Power in Ocean Current Energy Conversion Assisted by Electric Motor

Nama Mahasiswa : Catur Rakhmad Handoko
NRP : 04111960010003
Promotor : Prof. Ir. Mukhtasor, M.Eng., Ph.D
Co – Promotor : Dr. Eddy Setyo Koenhardono, S.T., M.Sc

Abstract

The main challenge in the conversion of ocean current energy is the fluctuating nature of the current, causing a low capacity factor of the Ocean Current Power Plant (CPP) system. The efficiency of the PLTAL is determined by the power coefficient or C_p which is influenced by the Tip Speed Ratio. This research aims to overcome these challenges through optimization of an energy conversion system based on Tip Speed Ratio (TSR) assisted by an electric motor.

This research is carried out by modeling a Marine Current Power Generation System (PLTAL) for the purpose of studying the increase in turbine power based on Tip Speed Ratio (TSR) control. The system consists of turbine simulator, mechanical and hydraulic transmission system, generator and controller. Tests were conducted in the laboratory to measure system performance. The supporting research stages include testing the ocean current turbine simulator, testing the generator and implementing TSR control optimization on the wind farm system with a mechanical transmission system. And to get advantages in terms of flexibility in the placement of PLTAL support equipment, the implementation of TSR control on PLTAL systems with hydraulic transmission systems is also carried out.

The results show that the test of the ocean current turbine simulator can work well. The torque setting feature was successfully developed so that the results of torque calculations and measurements have a very small difference. Generator testing also shows that changes in torque, turbine mechanical power and electrical

power generated show the behavior of the turbine and generator relationship as expected. The implementation of TSR control on the system with mechanical transmission shows an increase in turbine power expressed by a C_p value of 0.44 and TSR of 6.27 which is close to the optimum value with an average power improvement of 33%. Meanwhile, the implementation of TSR control on the system with hydraulic transmission obtained an increase in power before and after optimization by an average of 16.3% although it was found that there was an unexpected loss of power due to losses in the hydraulic transmission system, so further studies are needed in this regard.

Keywords: Ocean Current Energy Conversion System, Turbine Simulator, Tip Speed Ratio, Maximum Power Point Tracking.

Kata Pengantar

Puji syukur kehadirat Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat, hidayah, serta karunia-Nya sehingga saya dapat menyelesaikan disertasi yang berjudul “Studi Peningkatan Daya Turbin pada Sistem Konversi Energi Arus Laut Berbasis TSR Dibantu Motor Listrik” ini dengan baik.

Ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya saya sampaikan kepada:

1. Prof. Ir. Mukhtasor, M.Eng., Ph.D selaku promotor yang telah memberikan bimbingan, arahan, serta dorongan yang tiada henti selama proses penyusunan disertasi ini.
2. Dr. Eddy Setyo Koenhardono, ST., M.Sc selaku co-promotor yang telah memberikan masukan, saran, dan dukungan yang sangat berharga dalam penelitian ini.

Saya juga ingin mengucapkan terima kasih yang mendalam kepada para penguji yang telah memberikan kritik dan saran yang konstruktif untuk kesempurnaan disertasi ini, yakni Bapak Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D, Bapak Dr. Indra Ranu Kusuma, ST, M.Sc dan Bapak Muhammad Aziz Muslim, ST., MT., Ph.D.

Kemudian juga Ketua Program Studi Pasca Sarjana Bapak Prof. Dr-Eng. Suntoyo, ST., M.Eng.. dan Kepala Departemen Teknik Kelautan ITS Bapak Prof. Herman Pratikno, S.T., M.T., Ph.D, beserta semua staf yang telah membantu dalam penyelesaian program doktoral kami.

Tidak lupa, saya sampaikan terima kasih kepada keluarga, terutama ibu dan istri tercinta, Anis Mufadilah, yang selalu memberikan dukungan, doa, dan kasih sayang yang tiada henti. Ucapan terima kasih juga kami sampaikan untuk kampus tercinta PPNS dan Lab Mesin Listrik atas semua bantuannya.

Semoga disertasi ini dapat memberikan kontribusi positif bagi pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya dalam bidang konversi energi arus laut.

Surabaya, Juli 2024

Catur Rakhmad Handoko

Daftar Isi

Abstrak.....	ii
Daftar Isi	vii
Daftar Gambar	ix
Daftar Tabel	xi
Daftar Singkatan	xii
Bab 1 Pendahuluan	13
1.1 Latar belakang	13
1.2 Perumusan masalah.....	19
1.3 Tujuan Penelitian.	20
1.4 Manfaat Penelitian	20
1.5 Kebaharuan Penelitian	20
1.6 Penelitian Terdahulu	21
1.7 Batasan Masalah	22
1.8 Garis Besar Disertasi (Dissertation Outline).....	23
Bab 2 Kajian Pustaka dan Kajian Teoritis	25
2.1 Energi Arus Laut	25
2.2 Potensi Energi Arus Laut.....	26
2.3 Teknologi Turbin Arus Laut	28
2.4 Sistem Transmisi Pada PLTAL.....	30
2.5 Pemilihan Kombinasi Transmisi dan Generator	40
2.6 Generator Jenis PMSG pada Sistem Konversi Energi Laut.....	44
2.7 Sistem Konversi Energi Laut Off-grid Dan On-grid.....	46
2.8 Optimasi Berbasis TSR	48
Bab 3 Metodologi Penelitian.....	52
3.1 Prosedur Penelitian	52
3.2 Studi Literatur	54
3.3 Pembangunan Model sistem PLTAL	55
3.4 Metode Pengujian Simulator Turbin Arus Laut	56
3.5 Metode pada Analisa Kinerja Generator	59
3.6 Metode Implementasi Kontrol TSR pada Sistem dengan Transmisi Mekanik	60
3.7 Metode Implementasi Kontrol TSR pada Sistem dengan Transmisi Hidrolik	66
3.8 Metode Pengujian Sistem Transmisi Hidrolik	72
Bab 4 Hasil dan Pembahasan	76
4.1 Pengujian Simulator Turbin Arus Laut.....	77

4.1.1	Hasil Pengujian	77
4.1.2	Diskusi	78
4.2	Analisa Kinerja Generator pada Sistem Konversi Energi Arus Laut	80
4.2.1	Hasil Pengujian	80
4.2.2	Diskusi	82
4.3	Kontrol Optimasi Berbasis TSR dengan Motor-Bantu pada Sistem dengan Transmisi Mekanik.....	82
4.3.1	Hasil Pengujian	82
4.3.2	Diskusi	86
4.4	Kontrol Optimasi Berbasis TSR dengan Motor-Bantu pada Sistem Dengan Transmisi Hidrolik	88
4.4.1	Hasil Pengujian	88
4.4.2	Diskusi	90
4.5	Pengujian Transmisi Hidrolik pada Sistem Konversi Energi Arus Laut	91
4.5.1	Hasil Pengujian	91
4.5.4	Diskusi	94
Bab 5	Penutup.....	96
5.1	Kesimpulan	96
5.2	Saran Perbaikan untuk Penelitian Selanjutnya	97

Daftar Gambar

Gambar 1. 2 Mekanisme Pengambilan Energi.....	15
Gambar 1. 3 Contoh Tipikal Kurva Cp terhadap TSR	16
Gambar 1. 4 Contoh Tipikal Kurva Daya vs Kecepatan Putar (RPM)	17
Gambar 2. 1 Berbagai Turbin Arus Laut Sumbu Horizontal	29
Gambar 2. 2 Berbagai Turbin Arus Laut Sumbu Vertikal	30
Gambar 2. 3 Diagram yang Disederhanakan dari Transmisi Hidrostatik.	34
Gambar 2. 4 Hasil Pengujian Efisiensi Beberapa Pompa Hidrolik	38
Gambar 2. 5 Sistem dengan Konfigurasi Gearbox dan DFIG	40
Gambar 2. 6 Sistem dengan Konfigurasi Gearbox dan DFIG	41
Gambar 2. 7 (a) Sistem Turbin arus laut OpenHydro (b) Susunan Magnet Permanen pada rotor	42
Gambar 2. 8 Konfigurasi Hidrolik Dan PMSG	43
Gambar 2. 9 Sistem dengan Konfigurasi Gearbox dan DFIG	44
Gambar 2. 10 Transmisi Hidraulik Dengan Unit Roda Gigi Internal.....	44
Gambar 2. 11 Kurva CP – TSR untuk berbagai jenis turbin	49
Gambar 2. 12 Contoh Kurva Daya vs RPM untuk Kecepatan Arus laut yang Berbeda	50
Gambar 2. 13 Konsep Pasangan Generator Motor	51
Gambar 3. 1 Flowchart Prosedur Penelitian	54
Gambar 3. 2 Diagram Blok Model dengan Trasmisi Mekanik.....	55
Gambar 3. 3 Diagram Blok Pengujian dengan Sistem Transmisi Hidrolik	56
Gambar 3. 4 Diagram Blok Model Simulator Turbin Laut.....	57
Gambar 3. 5 Model Fisik Simulator Turbin Arus Laut.....	57
Gambar 3. 6 Diagram Blok Sistem Kontrol TSR dengan Motor Bantu	61
Gambar 3. 7 Kurva Turbin Arus Tipikal (3 Blade Horizontal Axis Turbine)	63
Gambar 3. 8 Flowchart Kontroler Pengatur Kecepatan Motor Bantu	66
Gambar 3. 9 Diagram Blok Model PLTAL dengan Sistem Transmisi Hidrolik .	67
Gambar 3. 10 Susunan Keseluruhan Model Sistem Pembangkit Arus Laut.....	67
Gambar 3. 11 Hasil Pengukuran Arus laut.....	69
Gambar 3. 12 Kurva Cp Turbin yang Disimulasikan	70

Gambar 3. 13 Kurva Daya sebagai Fungsi dari Kecepatan Putaran Poros Turbin untuk Setiap Kecepatan Arus	71
Gambar 3. 14 Diagram Blok Sistem Transmisi Hidrolik pada Model Pengujian	72
Gambar 3. 15 Skema Sistem Transmisi Hidraulik.....	73
Gambar 4. 3 Grafik Torsi dari Hasil Perhitungan dan Pengukuran	78
Gambar 4. 4 Grafik Daya Mekanik dan Daya Listrik.....	78
Gambar 4. 5 Grafik Daya Mekanis dan Daya Listrik	81
Gambar 4. 6 Kurva Cp-TSR.....	83
Gambar 4. 7 Grafik Daya – Kecepatan Poros untuk tiap kecepatan arus	83
Gambar 4. 8 Kurva Daya Operasional	84
Gambar 4. 9 Kecepatan rotasi dan hubungan torsi	92
Gambar 4. 10 Tegangan Terminal Generator Dan Hubungan Torsi.....	93

Daftar Tabel

Tabel 1. 1 Penelitian Sebelumnya Terkait Optimasi Pembangkitan Daya	21
Tabel 3. 1 Parameter Motor Induksi 3-Fase pada Simulator	57
Tabel 3. 2 Spesifikasi Generator Magnet Permanen	59
Tabel 3. 3 Hasil Pengaturan Torsi untuk Pengujian.....	60
Tabel 3. 4 Spesifikasi Turbin	62
Tabel 3. 5 Nilai Cp-TSR Ekstraksi Data Kurva Menggunakan Plot digitizer	63
Tabel 3. 6 Sampel Kecepatan Arus Laut.....	64
Tabel 3. 7 Sampel Arus laut yang Digunakan Dalam Pengujian	69
Tabel 3. 8 Spesifikasi Turbin Arus Laut	70
Tabel 3. 9 Parameter Sistem Transmisi Hidraulik	74
Tabel 4. 1 Outline Pembahasan	76
Tabel 4. 2 Hasil Pengaturan Torsi Dan Hasil Pengukuran.....	77
Tabel 4. 3 Hasil Pengujian Generator Tanpa Beban	80
Tabel 4. 4 Hasil Pengujian Generator Berbeban.....	81
Tabel 4. 5 Hasil Pengujian Pada Kondisi Optimum Dimana TSR Sekitar 6.3	84
Tabel 4. 6 Hasil Pengujian Pada Kondisi Dimana Generator Dibebani	85
Tabel 4. 7 Hasil Optimasi Dengan Motor Bantu.....	85
Tabel 4. 8 Hasil Pengujian tanpa kontrol optimasi	88
Tabel 4. 9 Hasil pengujian dengan kontrol optimasi.....	89
Tabel 4. 10 Daya Listrik yang Dihasilkan	89
Tabel 4. 11 Pengujian tanpa beban	92
Tabel 4. 12 Hasil Pengujian dengan Generator yang dibebani	93
Tabel 4. 13 Hasil Pengujian Sistem Transmisi Hidrolik.....	94

Daftar Singkatan

AC	: Alternating Current
ANSIS	: Adaptive Fuzzy Inference System
ASELI	: Asosiasi Energi Laut Indonesia
Cp	: Coefficient of Power
TECS	: Tidal Energy Conversion System
DC	: Direct Current
DFIG	: Doubly Fed Induction Generator
FOC	: Field Oriented Control
FPGA	: Field-Programmable Gate Array
HST	: Hydrostatic Transmission
HWT	: Horizontal Axis Wind Generator
HWT	: Hydraulic Wind Turbine
MGP	: Motor Generator Pair
MPPT	: Maximum Power Point Tracking
NN	: Neural Network
OTC	: Optimal Torque Control
OWTE	: Optimized Wind Turbine Emulator (OWTE)
P&O	: Perturb and Observe
PLTAL	: Pembangkit Listrik Tenaga Arus Laut
PMSG	: Permanent Magnet Synchronous Generator
PSF	: Power Signal Feedback
PSO	: particle swarm optimization
TSR	: Tip Speed Ratio
VSD	: Variable Speed Drive

Bab 1

Pendahuluan

1.1 Latar belakang

Sebagai negara kepulauan, Indonesia cocok untuk pemanfaatan sumber energi terbarukan laut. Energi laut sendiri, di sini, telah diklasifikasikan menjadi energi arus laut, energi gelombang laut dan energi panas laut (Mukhtasor, 2014). Pada tahun 2014, Asosiasi Energi Laut Indonesia (ASELI) meratifikasi ketiga potensi energi laut tersebut di Indonesia. Potensi praktis yang dihasilkan oleh energi panas laut adalah sebesar 41.001 MW, energi arus laut sebesar 17.989 MW, dan energi gelombang laut sebesar 1.995 MW (Mukhtasor, 2014) . Dari ketiga sumber energi laut tersebut, yang memiliki kemajuan pengembangan teknologi paling pesat di dunia adalah pembangkit listrik tenaga arus laut.

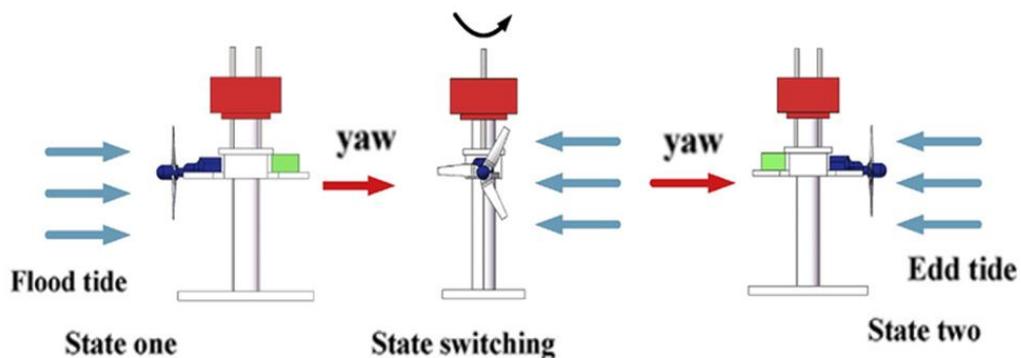
Saat ini, tiga selat telah dipelajari secara ekstensif untuk pengembangan energi Arus Laut, yaitu Selat Lombok, Alas dan Larantuka, yang terletak di wilayah Bali, Nusa Tenggara (Blunden dkk., 2013; Firdaus dkk., 2020; Orhan dan Mayerle, 2020). Selain itu, penelitian juga telah menunjukkan potensi di situs-situs lain seperti Teluk Kelabat, Sunda, Boleng, Molo, dan Selat Pantar yang diringkas dari pemetaan dan pemodelan energi arus laut di selat-selat berpotensi Indonesia 2006 - 2013 (Susilohadi dkk., 2014).

Energi Arus Laut yang berasal dari aliran air laut umumnya diubah menjadi bentuk energi listrik (Ben Elghali dkk., 2007). Turbin arus laut menangkap energi dari Arus Laut, seperti turbin angin yang menangkap energi kinetik angin (Clarke dkk., 2006). Karena kepadatan air laut relatif lebih tinggi terhadap udara (air laut sekitar 800 kali massa jenis udara), sebuah generator dapat memberikan daya yang sama pada kecepatan arus yang relatif rendah sementara generator perlu beroperasi pada kecepatan angin yang relatif tinggi. Dengan kata lain, daya potensial yang dihasilkan oleh turbin arus laut individu dapat lebih besar dibandingkan dengan turbin angin dengan diameter rotor yang sama. Selain itu, energi arus laut lebih dapat diprediksi dibandingkan energi angin (Wen dan Srikanth, 2017) . Banyak negara telah mempelajari pembangkit listrik tenaga arus laut sejak akhir abad ini,

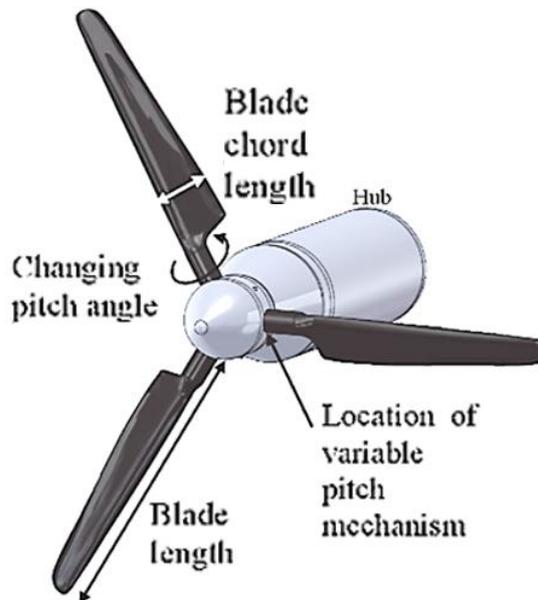
seperti Inggris, Cina, Italia, Kanada, Jepang, dan Amerika Serikat (Zhang, 2015), dengan berbagai teknologi yang dikembangkannya.

Proses ekstraksi energi arus laut dilakukan melalui sebuah turbin dan *drive-train* di belakangnya meliputi sistem drive-train (*Gearbox*, sistem hidrolis) dan pembangkitan (generator listrik, konverter elektronik). Umumnya, turbin arus laut dapat dikategorikan menjadi dua jenis, yaitu turbin Arus Laut sumbu horizontal dan turbin arus pasang sumbu vertikal (Qian et al., 2019). Turbin arus laut sumbu horizontal lebih banyak digunakan, karena efisiensi operasionalnya yang lebih tinggi (Hassan, 2012). Selanjutnya dalam tulisan ini pembahasan akan fokus ke teknologi turbin arus laut sumbu horizontal.

Bilah turbin dapat dibuat tetap (*fixed*) atau disesuaikan (*adjustable*). Karena strukturnya yang sederhana, stabilitas yang baik, dan koefisien perolehan energi yang tinggi, turbin jenis poros horizontal ini adalah model yang terbaik dan paling cepat berkembang. Pada turbin arus laut sumbu horizontal, mekanisme penangkapan energi, *drive-train* dan sistem pembangkit tenaga adalah tiga subsistem utama dari turbin ini. Dalam hal mekanisme penangkapan energi, turbin arus laut umumnya diklasifikasikan menjadi dua jenis, seperti sistem kontrol pitch variabel (*variable pitch*) dan kontrol pitch tetap (*fixed pitch*) yang dikombinasikan dengan sebuah sistem *yaw control*. Gambar 1.1 di bawah mengilustrasikan bagaimana pengaturan turbin dilakukan dengan perubahan posisi turbin maupun perubahan sudut bilah turbin.



(a)



(b)

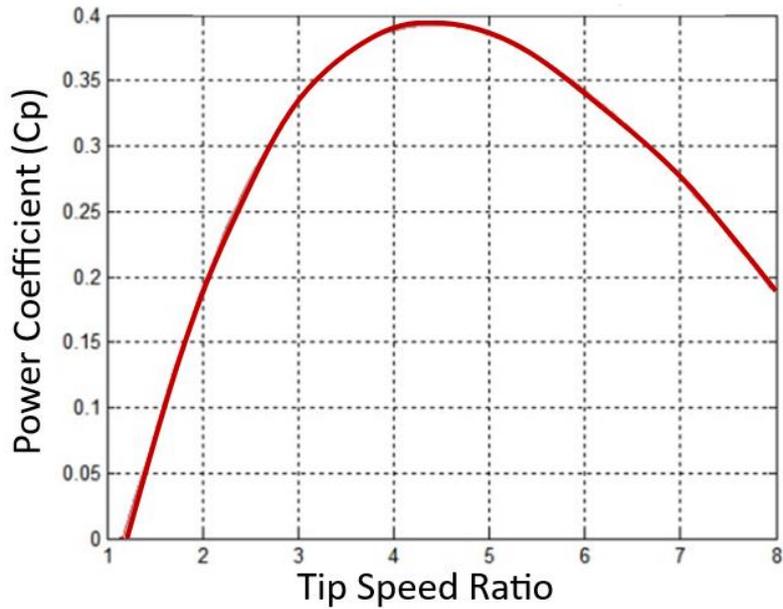
Gambar 1. 1 Mekanisme Pengambilan Energi (a) Fixed Pitch (b) Variable Pitch (Qian et al., 2019)

Untuk sistem transmisi dan pembangkit tenaga, dapat diklasifikasikan dalam empat jenis, meliputi (1) Sistem dengan *Gearbox* dikombinasikan dengan *Double Feed Induction Generator* (DFIG), (2) Sistem Direct Drive menggunakan *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG), (3) Sistem dengan *Gearbox* menggunakan PMSG, dan (4) Sistem hidrolis yang dikombinasikan dengan PMSG. (Qian et al., 2019).

Permasalahan dalam bidang rekayasa dalam teknologi ini adalah bahwa daya maksimum tidak berkorelasi secara linier dengan kecepatan aliran air dan pembebanan, sehingga sulit untuk memanen daya pada titik optimalnya. Serangkaian algoritma yang melacak titik daya maksimum yang dikenal sebagai *maximum power point tracking* (MPPT) berkembang dalam beberapa tahun terakhir.

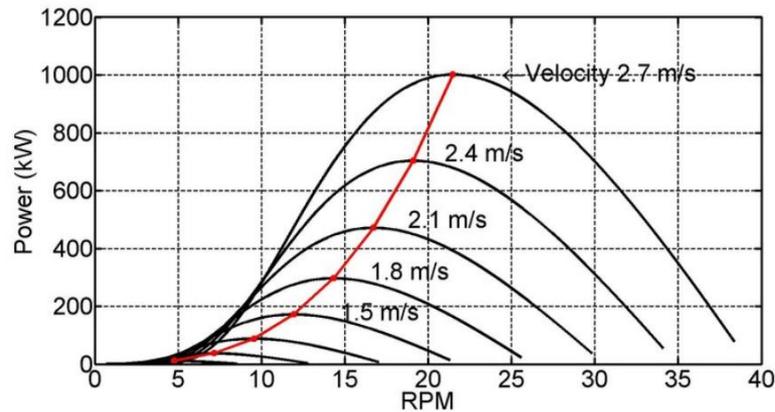
Secara teoritis, daya yang dibangkitkan generator turbin arus laut dibatasi sekitar 59,3% (dikenal sebagai batas Betz) dari energi dalam badan air laut tersebut. Dalam praktiknya, koefisien daya C_p yang dipengaruhi oleh kerugian gesekan, kecepatan putar turbin, sudut pitch, *Tip Speed Ratio* (TSR), tidak akan mencapai batas Betz. Karena C_p merupakan fungsi non-linier multivariat dan terkait dengan keluaran daya yang optimal, titik daya maksimum dapat dioptimasi meskipun

tantangannya adalah menyelesaikan masalah pengoptimalan varian waktu non-linier. Gambar 1.2 menunjukkan sebuah contoh tipikal kurva C_p sebagai fungsi dari TSR.



Gambar 1. 2 Contoh Tipikal Kurva C_p terhadap TSR ((Wen dan Srikanth, 2017)

Untuk arus laut yang sama, semakin besar C_p , semakin banyak daya yang dapat dihasilkan turbin (dengan asumsi efisiensi generator konstan). Contoh kurva output daya untuk berbagai kecepatan arus laut yang berbeda ditunjukkan pada Gambar 1.3 di bawah ini. Dengan kata lain efisiensi turbin adalah sama dengan koefisien daya turbin atau C_p . Untuk selanjutnya dalam pembahasan tentang efisiensi, maka yang maksud dengan efisiensi terkait sistem PLTAL adalah koefisien daya (C_p).



Gambar 1. 3 Contoh Tipikal Kurva Daya vs Kecepatan Putar (RPM) untuk Kecepatan Arus Laut yang Berbeda (Wen dan Srikanth, 2017)

Untuk mengekstrak daya optimal dalam PLTAL (Sistem Konversi Energi Arus Laut), beberapa algoritma MPPT dilaporkan telah berhasil diterapkan dalam sistem energi angin. Secara umum, metode MPPT dapat diklasifikasikan menjadi dua kategori: metode berbasis sensor dan metode tanpa sensor. Metode berbasis sensor didedikasikan untuk mengembangkan MPPT dengan mengontrol kecepatan putar turbin pada kecepatan arus laut tertentu, umumnya dikenal sebagai TSR (*Tip Speed Ratio*) (Wen & Srikanth, 2017). Kontrol TSR mengatur secara langsung kecepatan turbin atau torsi untuk mempertahankan TSR pada nilai optimum dengan mengukur kecepatan turbin. Penelitian yang menggunakan pendekatan ini antara lain dilakukan oleh (X. Yin & Zhao, 2019) dengan strategi predictive controller pada sistem dengan drivetrain hidrolis dan generator PMSG, kemudian dikembangkan lagi dengan pendekatan lain yaitu algoritma berbasis Extreme Learning Machine (ELM) dengan sistem PLTAL yang sama seperti sebelumnya. (X. Yin & Zhao, 2020)

Metode sensor MPPT lainnya adalah metode berbasis relasi optimum (ORB) (Abdullah dkk., 2014) dan memerlukan pemantauan kecepatan arus laut real-time serta pengetahuan sebelumnya tentang karakteristik turbin arus laut. MPP dilacak dengan bantuan hubungan optimal antara variabel sistem yang berbeda seperti daya vs kecepatan poros, daya vs torsi, dan lain-lain. Namun, metode ini dibatasi oleh ketergantungan pada karakteristik arus laut.

Metode tanpa sensor kecepatan arus laut mengandalkan pemantauan variasi daya. Metode *sensorless* yang paling terkenal adalah algoritma *perturb and observasi* (P&O) (Moon et al., 2020), karena tidak memerlukan sensor dan tanpa ketergantungan pada karakteristik sistem. Ini mengurangi biaya dan meningkatkan keandalan. Kebanyakan optimasi MPPT dengan pendekatan ini dilakukan pengaturan secara elektronik (*duty cycle* penyalaaan semikonduktor) pada konverter elektronika daya, dengan pemantauan terhadap nilai arus dan tegangan keluaran konverter. Pengaturan ini dilakukan dengan menggunakan algoritma-algoritma cerdas seperti neural network dengan support vector regression (Abo-Khalil & Alghamdi, 2021), hybrid neural fuzzy (Ghefiri et al., 2018), dan intelligent adaptive control berbasis proportional and integral (PI) controller (H. H. Aly et al., 2019).

Meski telah terdapat beberapa penelitian terkait dengan optimasi daya pada PLTAL, namun terdapat beberapa kekurangan yang belum terjawab dari penelitian-penelitian di atas, seperti misalnya rentang pengaturan yang terbatas untuk itu, maka penelitian ini mengusulkan sebuah riset yang diharapkan mampu menyelesaikan beberapa permasalahan dalam pembangkitan tenaga listrik dari energi arus laut, khususnya pada PLTAL dengan jenis *fixed pitch turbine*. antara lain yaitu:

a. Pendekatan baru optimasi dengan Motor Bantu

Pendekatan ini merupakan adaptasi dari konsep *Motor Generator Pair* (MGP), dimana pada penelitian ini motor listrik digunakan untuk mengatur TSR dengan memberikan torsi eksternal dengan kecepatan referensi sebesar kecepatan putar turbin optimum pada TSR optimum sesuai dengan kecepatan arus yang diterima turbin.

b. Implementasi pada sistem dengan transmisi mekanik dan hidrolik

Selain implementasi pada sistem mekanik, penelitian juga mengujinya penggunaan sistem transmisi hidrolik dalam PLTAL yang masih jarang diteliti. Studi-studi seperti yang dilakukan oleh Fraenkel (2002) dan Clarke et al. (2007) lebih banyak fokus pada desain turbin dan optimalisasi komponen listrik. Penelitian tentang fleksibilitas dan efisiensi sistem transmisi hidrolik, terutama yang memungkinkan penempatan generator

yang lebih fleksibel, masih sangat terbatas (Fraenkel, 2002; Clarke dkk., 2007).

Sedangkan *Freewheel coupling* digunakan untuk memisahkan pengaruh torsi balik dari generator. Studi-studi seperti oleh Peeters et al. (2006) dan Brochard et al. (2013) menyebutkan penggunaan kopling untuk aplikasi turbin angin, namun aplikasi dalam PLTAL masih minim (Peeters dkk., 2006; Brochard dkk., 2013). Penelitian ini menunjukkan potensi *freewheel coupling* dalam meningkatkan stabilitas sistem, namun lebih banyak data eksperimental diperlukan.

c. Kontroler Optimal untuk Sistem Hybrid

Desain kontroler optimal untuk sistem hybrid hidrolik-elektrik dalam PLTAL belum banyak dieksplorasi. Penelitian oleh Seixas et al. (2018) menyarankan bahwa kontrol adaptif dapat meningkatkan kinerja sistem hybrid, namun penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengaplikasikan konsep ini pada PLTAL dengan sistem transmisi hidrolik (Seixas dkk., 2018).

d. Pengembangan dan Validasi *Turbine Profile*

Pengembangan kurva Cp dan TSR dari profil turbin adalah langkah penting untuk simulasi dan optimasi sistem PLTAL. Penelitian oleh Burton et al. (2011) menekankan pentingnya validasi eksperimental terhadap profil turbin, namun lebih banyak penelitian diperlukan untuk memastikan data simulasi sesuai dengan kondisi nyata (Burton dkk., 2011).

1.2 Perumusan masalah.

1. Bagaimana membangun model fisik dan menguji sistem konversi energi arus laut, yang terdiri atas simulator turbin, sistem transmisi (hidrolik dan mekanik), serta generator untuk keperluan studi optimasi berbasis *Tip Speed Ratio (TSR)* untuk meningkatkan koefisien daya pembangkitan.
2. Bagaimana menerapkan optimasi pengaturan TSR untuk meningkatkan daya turbin pada sistem PLTAL dengan transmisi mekanik menggunakan bantuan motor listrik

3. Bagaimana menerapkan optimasi pengaturan TSR untuk meningkatkan daya turbin pada sistem PLTAL dengan transmisi hidrolis menggunakan bantuan motor listrik

1.3 Tujuan Penelitian.

1. Membangun model fisik dan menguji sistem konversi energi arus laut, yang terdiri atas simulator turbin, sistem transmisi (hidrolis dan mekanik), serta generator untuk keperluan studi optimasi berbasis *Tip Speed Ratio (TSR)* untuk meningkatkan koefisien daya pembangkitan.
2. Menerapkan optimasi pengaturan TSR untuk meningkatkan daya turbin pada sistem PLTAL dengan transmisi mekanik menggunakan bantuan motor listrik
3. Menerapkan optimasi pengaturan TSR untuk meningkatkan daya turbin pada sistem PLTAL dengan transmisi hidrolis menggunakan bantuan motor listrik

1.4 Manfaat Penelitian

Hasil penelitian dalam disertasi ini diharapkan dapat menambah khasanah baru dalam bidang energi laut. Selain itu, hasil penelitian ini juga dapat digunakan sebagai referensi dalam melaksanakan riset aplikatif Pembangkit Listrik Tenaga Arus Laut (PLTAL), utamanya dalam aspek optimasi pembangkitan daya, sehingga kontribusi penelitian ini dapat dirasakan langsung dalam pengembangan industri energi laut, khususnya industri pembangkit listrik tenaga arus laut.

1.5 Kebaruan Penelitian

Keterbaruan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Inovasi dalam Pengaturan TSR

Penelitian ini menggunakan motor bantu untuk mengatur torsi eksternal pada generator, yang menawarkan pendekatan baru dan lebih fleksibel dibandingkan metode optimasi konvensional.

2. Fleksibilitas Sistem Transmisi Hidrolis dan Penggunaan Freewheeling Coupling

Dengan memilih sistem transmisi hidrolis yang memungkinkan penempatan generator yang lebih fleksibel, penelitian ini dapat menutup celah dalam studi yang lebih banyak fokus pada sistem transmisi mekanis langsung atau elektrik. Selain itu penelitian ini dapat mengisi celah dalam literatur dengan menguji dan memvalidasi penggunaan *freewheel coupling* dalam PLTAL, yang dapat meningkatkan stabilitas dan efisiensi sistem.

3. Optimalisasi Kontroler untuk Sistem Hybrid

Penelitian pada kontroler yang mengatur torsi motor bantu dapat menyediakan data baru dan metodologi untuk desain kontroler optimal dalam sistem hybrid mekanik-elektrik maupun hidrolis-elektrik PLTAL

4. Validasi dan Simulasi Turbine Profile

Dengan mengembangkan kurva koefisien daya (C_p) dan TSR dari profil turbin yang disimulasikan, penelitian dapat memberikan metode baru untuk menguji dan memvalidasi kinerja sistem PLTAL, yang dapat digunakan sebagai referensi dalam studi-studi selanjutnya.

1.6 Penelitian Terdahulu

Penelitian terkait dengan peningkatan daya pada sistem PLTAL telah dilakukan oleh para peneliti sebelumnya. Di bawah ini adalah Tabel 1.1 yang merangkum penelitian-penelitian terkait dengan optimasi daya pembangkitan pada sistem konversi energi arus laut.

Tabel 1. 1 Penelitian Sebelumnya Terkait dengan Optimasi Pembangkitan Daya

No	Peneliti dan Tahun	Judul Penelitian	Metode dan Hasil
1	Dong dkk., 2017	Development of a simple power controller for horizontal-axis standalone tidal current energy generation system	<p>Metode: MPPT dimodelkan dan disimulasikan menggunakan perangkat lunak Matlab/Simulink.</p> <p>Hasil: Hasil simulasi menunjukkan bahwa algoritma <i>variable-step searching</i> dapat secara efektif melacak titik daya maksimum tanpa mengumpulkan data kecepatan arus laut atau kecepatan rotor. Kontroler MPPT tersebut menyediakan metode sederhana dan praktis untuk kontrol</p>

No	Peneliti dan Tahun	Judul Penelitian	Metode dan Hasil
			daya maksimum sistem konversi energi arus laut secara mandiri.
2	Ghefiri dkk., 2018	Hybrid Neural Fuzzy Design-Based Rotational Speed Control of a Tidal Stream Generator Plant	Metode: Simulasi Matlab dengan 2 studi kasus. Hasil: Hasil simulasi membuktikan keefektifan skema yang diselidiki yang menghadirkan kemampuan ekstraksi daya yang ditingkatkan dan pelacakan referensi yang efektif terhadap gangguan.
3	Moon dkk., 2020	Maximum Power-Point Tracking Control Using Perturb and Observe Algorithm for Tidal Current Generation System	Metode: Alternatif pengukuran pada TSR maka maksimalisasi daya langsung. Hasil: Hasil menunjukkan efektivitas dalam pelacakan titik daya maksimum namun memerlukan optimasi lebih lanjut untuk efisiensi konversi daya.
4	Chen dkk., 2020	Analysis of Hydraulic Transmission System for Tidal Energy Conversion Systems	Metode: Pengujian laboratorium dan simulasi komputer. Hasil: Fleksibilitas tinggi dalam penempatan generator dan pengaturan torsi, namun terdapat kerugian efisiensi pada komponen hidrolis.
5	Jones dan Smith, 2018	Optimization of Tidal Stream Energy Conversion System with Advanced Control Techniques	Metode: Simulasi dan pengujian prototipe laboratorium. Hasil: Peningkatan efisiensi konversi daya menggunakan MPPT, namun efisiensi tidak konsisten pada berbagai kondisi arus laut.

1.7 Batasan Masalah

Penelitian ini memiliki beberapa batasan yang perlu diperhatikan dalam interpretasi hasil dan penerapan temuan, yaitu:

1. Lokasi Pengujian dan Data Arus Laut

Data arus laut yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari lokasi-lokasi spesifik di Indonesia. Variasi karakteristik arus laut di lokasi lain mungkin mempengaruhi hasil jika diterapkan secara langsung tanpa adaptasi lebih lanjut.

2. Skala Model Fisik

Model fisik PLTAL yang dibangun untuk pengujian laboratorium lebih kecil dari skala sebenarnya. Hasil dari pengujian skala kecil ini mungkin tidak sepenuhnya mencerminkan performa sistem dalam aplikasi skala penuh di laut.

3. **Jenis Turbin yang Digunakan**

Fokus penelitian ini adalah pada turbin sumbu horizontal dengan bilah tetap. Jenis turbin lain seperti sumbu vertikal atau bilah variabel mungkin menunjukkan hasil yang berbeda dan tidak tercakup dalam penelitian ini.

4. **Fokus pada Optimasi TSR**

Penelitian ini fokus pada optimasi TSR untuk meningkatkan daya turbin. Aspek desain struktur turbin dan material yang digunakan tidak dibahas secara mendalam dalam konteks optimasi daya.

5. **Alat dan Metode Pengukuran**

Alat dan metode pengukuran memiliki keterbatasan dalam hal akurasi dan presisi. Ini dapat mempengaruhi hasil pengukuran dan interpretasi data. Khusus untuk alat dynamic torque sensor yang menjadi peralatan utama dalam penelitian ini, validasi dilakukan dengan membandingkan hasil perhitungan teoritis dan hasil pengukuran.

1.8 Garis Besar Disertasi (Dissertation Outline)

Berikut ini adalah garis besar (*outline*) buku disertasi yang menjelaskan isi setiap bagian dari riset yang dilakukan. Mulai Bab 3 sampai dengan Bab 7, setiap bab yang ada terkait dengan luaran riset yakni publikasi baik jurnal maupun prosiding konferensi internasional. Oleh karena itu, tanpa bermaksud membiarkan adanya *redundancy*, maka akan terdapat beberapa pengulangan gambar, tabel dan persamaan matematik pada setiap bab yang dibahas.

Bab 1 Pendahuluan

Pendahuluan disertasi ini membahas latar belakang kebutuhan mendesak Indonesia untuk meningkatkan porsi energi terbarukan dalam bauran energinya, khususnya energi arus laut yang memiliki potensi besar. Disertasi ini memfokuskan

pada pengembangan teknologi yang lebih efisien dan berkelanjutan. Permasalahan utama yang dihadapi adalah sifat alami arus laut yang fluktuatif sehingga memiliki *capacity factor* yang rendah, memerlukan optimasi agar ekstraksi energi arus laut menjadi lebih maksimal.

Bab 2 Sistem Konversi Energi Arus Laut

Bagian ini berupa kajian pustaka dan dasar teori yang membahas berbagai literatur yang relevan dengan energi arus laut dan teknologi yang digunakan dalam konversi energi ini. Terdapat penjelasan mendetail tentang potensi energi arus laut, teknologi turbin arus laut, dan sistem transmisi pada PLTAL. Pemilihan kombinasi transmisi-generator juga dibahas untuk memberikan gambaran lengkap tentang opsi-opsi yang ada dan keunggulan masing-masing konfigurasi.

Bab 3 Metodologi Penelitian

Bagian ini menjelaskan bagaimana secara umum keseluruhan tahapan penelitian dilakukan mulai dari studi literatur, perencanaan dan pembangunan model, pengujian dan implementasi kontrol TSR untuk peningkatan daya turbin. Sedangkan metodologi setiap tahapan akan dijelaskan detil pada bagian metode di tiap sub bab pada Bab 4.

Bab 4 Hasil dan Pembahasan

Bagian ini menjabarkan hasil dan pembahasan tiap penelitian yang membentuk keseluruhan studi terkait peningkatan daya turbin melalui kontrol TSR dengan bantuan motor listrik. Bagian ini terdiri dari riset pendukung seperti pengujian simulator turbin dan analisa kinerja generator. Bab ini kemudian juga membahas penerapan kontrol TSR dengan bantuan motor listrik untuk sistem dengan transmisi mekanik, penerapan kontrol yang sama untuk sistem dengan transmisi hidrolik dan analisa kinerja sistem transmisi hidrolik pada model PLTAL.

Bab 5 Penutup

Bagian penutup merangkum kesimpulan utama dari penelitian ini dan memberikan saran untuk penelitian selanjutnya.

Bab 2

Kajian Pustaka dan Kajian Teoritis

2.1 Energi Arus Laut

Energi laut, salah satu jenis energi terbarukan yang menggunakan gerakan arus laut sebagai pembangkit listrik (Handoko & Mukhtasor, 2021). Lautnya air laut dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan energi, menjadikan energi laut sebagai bagian dari energi arus laut (Halimi dkk., 2020). Energi laut dianggap sebagai sumber energi terbarukan yang layak karena keteraturan dan kepadatan energinya yang tinggi (Adesanya dkk., 2020). Turbin arus laut memiliki kemiripan dengan turbin angin, yang diadaptasi untuk digunakan di dalam air (Firmansyah dkk., 2023). Penggunaan turbin adalah cara utama untuk menghasilkan energi laut. Turbin ini dipasang di wilayah pesisir atau selat sempit dengan arus laut yang kuat untuk memanfaatkan peningkatan kecepatan air (Halimi dkk., 2020).

Tarikan gravitasi Bulan dan Matahari pada air di Bumi menghasilkan energi laut. Pasang tinggi terjadi ketika air di sisi Bumi yang menghadap ke Bulan mengalami kenaikan akibat tarikan gravitasi Bulan. Pada saat yang sama, ada kenaikan di sisi lain Bumi yang menyebabkan air pasang kedua. Pasang naik dan pasang turun karena cekungan ini bermigrasi mengelilingi Bumi saat Bumi berputar (Egbert dan Ray, 2021). Faktor lain dalam pengembangan energi laut adalah interaksi antara arus laut dan topografi dasar laut. Arus laut yang kuat dan sesuai untuk pembangkit energi laut dapat ditemukan di tempat-tempat dengan selat sempit, punggung bawah laut, atau fitur-fitur lain yang memperkuat atau menyalurkan arus laut (Halimi dkk., 2020).

Tenaga laut menawarkan banyak manfaat sebagai opsi energi yang bersih dan berkelanjutan. Pola laut air laut dapat diprediksi dengan akurasi tinggi beberapa tahun sebelumnya (Adesanya dkk., 2020). Hal ini memudahkan pekerjaan perencanaan dan integrasi ke dalam infrastruktur listrik yang telah ada (grid). Karena laut terjadi dua kali sehari relatif tanpa ada kegagalan (Adesanya dkk.,

2020), energi laut juga merupakan sumber energi yang dapat diandalkan. Selain itu, kepadatan energi energi laut tinggi, dan bahkan area yang kecil pun dapat menghasilkan daya yang signifikan (Adesanya dkk., 2020). Karena energi laut tidak mengakibatkan pelepasan gas rumah kaca atau menipisnya sumber daya yang langka, energi laut secara luas dianggap sebagai energi yang ramah lingkungan (Adesanya dkk., 2020).

Namun demikian, terdapat beberapa hambatan dan kendala dalam penerapan energi laut. Pertama adalah investasi awal yang signifikan yang diperlukan untuk membangun infrastruktur energi laut, seperti turbin arus laut, menjadi penghalang bagi pengadopsiannya secara luas (Copping dkk., 2020). Kedua, sistem energi laut secara teknis cukup rumit dan membutuhkan instalasi dan pemeliharaan yang khusus (Copping dkk., 2020). Seringkali, lokasi yang tersedia untuk pembangkit energi laut masih kurang memadai bagi proses pengembangan. Arus laut yang kuat ideal untuk menghasilkan energi laut dan biasanya ditemukan di pesisir atau perairan terbatas (Halimi dkk., 2020). Selain itu, ada kekhawatiran yang terus berlanjut yang membutuhkan studi menyeluruh dan metode mitigasi terkait dampak lingkungan dari energi laut terhadap ekosistem laut, seperti potensi tabrakan dengan spesies laut (Gillespie dkk., 2021; Gillespie dkk., 2020).

Singkatnya, energi laut adalah sumber energi arus laut yang mengubah energi kinetik arus laut menjadi bentuk yang dapat digunakan, seperti listrik. Tarikan gravitasi Bulan dan Matahari di lautan Bumi menciptakan energi laut, yang bermanifestasi sebagai naik turunnya permukaan air laut secara berkala. Dapat diprediksi, dapat diandalkan, kepadatan energi yang tinggi, dan dampak lingkungan yang minimal adalah beberapa dari banyak manfaat energi laut. Biaya modal awal yang tinggi, kurangnya lokasi yang sesuai, dan kemungkinan dampak lingkungan hanyalah beberapa kesulitan dan batasan yang terkait dengan energi laut. Meskipun kendala-kendala tersebut harus diatasi, energi laut memiliki potensi besar sebagai sumber energi terbarukan yang dapat digunakan di masa depan yang rendah karbon dan berkelanjutan.

2.2 Potensi Energi Arus Laut

Energi laut merupakan sumber energi terbarukan yang menjanjikan dan memiliki potensi untuk berkontribusi secara signifikan terhadap bauran energi

global. Beberapa penelitian telah dilakukan untuk menilai potensi energi laut, baik secara global maupun secara khusus di Indonesia.

Secara global, energi laut telah diakui sebagai sumber daya energi terbarukan yang signifikan. Menurut (Ajiwibowo, 2017), kepulauan Indonesia, dengan garis pantai yang panjang sekitar 80.000 km, memiliki potensi energi laut yang sangat besar. Studi tersebut menyoroti bahwa pemanfaatan energi laut sangat memungkinkan di Indonesia karena adanya perbedaan yang signifikan antara pasang dan surut di beberapa daerah tertentu.

Di Indonesia, telah banyak penelitian yang dilakukan untuk mengevaluasi potensi energi laut. Dan Pratama Ajiwibowo dan Pratama (2021) melakukan penelitian untuk menilai model hidrodinamika dan potensi energi arus laut di Selat Lepar yang terletak di antara Pulau Bangka dan Pulau Lepar. Studi ini menemukan bahwa Selat Lepar memiliki sumber daya energi arus laut yang belum dimanfaatkan yang dapat dimanfaatkan untuk pembangkit energi terbarukan.

Studi lain yang dilakukan oleh Ajiwibowo dkk. (2018) mengidentifikasi lokasi potensial untuk memanen energi arus laut di Tanjung Kelian, Teluk Kelabat, dan Selat Larantuka. Studi ini bertujuan untuk menangkap energi dari sumber terbarukan, karena sumber daya energi tak terbarukan semakin menipis. Pemerintah Indonesia memiliki rencana untuk mengembangkan pembangkit listrik tenaga laut di beberapa daerah, dan studi ini memberikan wawasan yang berharga mengenai lokasi-lokasi yang potensial untuk pengembangan tersebut.

Selanjutnya, (Firdaus dkk., 2020) melakukan penelitian tentang sumber daya energi laut di Selat Larantuka, Indonesia. Penelitian ini menggunakan model Delft3D yang dikembangkan oleh Deltares untuk memperkirakan kepadatan dan kecepatan arus di Selat Larantuka. Temuan menunjukkan bahwa Selat Larantuka memiliki potensi untuk pembangkit listrik tenaga laut, dengan kepadatan daya melebihi 6 kW/m² dan kecepatan melebihi 4 m/s.

Selain studi khusus di Indonesia, terdapat beberapa penilaian global mengenai sumber daya energi laut. Goward-Brown dkk. (2019) melakukan penilaian sumber daya energi laut, termasuk respon terhadap fluktuasi Arus Lintas Indonesia (*Indonesian Through Flow/ITF*). Studi ini menggunakan *Regional Ocean Modelling System* (ROMS) untuk mensimulasikan berbagai skenario aliran yang

melewati Selat Lombok. Hasilnya menunjukkan peluang energi laut untuk menyediakan listrik yang dapat diandalkan ke daerah-daerah terpencil di dunia.

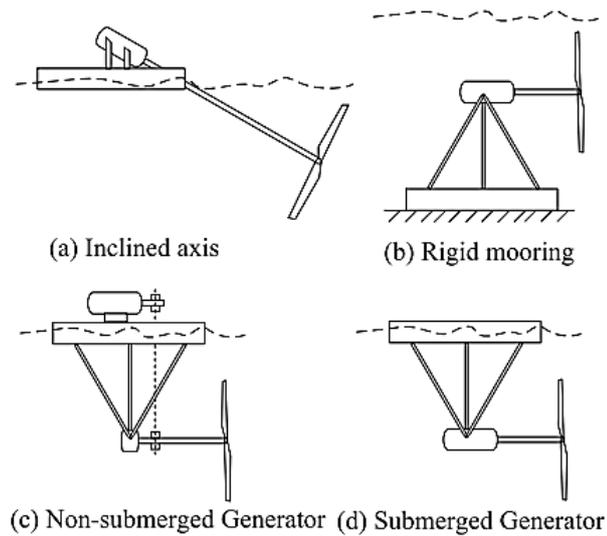
Secara keseluruhan, penelitian-penelitian yang disebutkan di atas menyoroti potensi energi laut yang signifikan, baik secara global maupun secara khusus di Indonesia. Kepulauan Indonesia, dengan garis pantai yang luas, menawarkan potensi yang sangat besar untuk pembangkit listrik tenaga laut. Daerah-daerah tertentu seperti Selat Larantuka, Selat Lepar, Tanjung Kelian, Teluk Kelabat, dan Selat Lombok telah diidentifikasi sebagai tempat yang potensial untuk pengembangan energi laut. Temuan ini menekankan pentingnya penelitian lebih lanjut dan investasi dalam energi laut untuk memanfaatkan potensinya secara penuh sebagai sumber energi terbarukan.

2.3 Teknologi Turbin Arus Laut

Pembangkitan energi listrik oleh arus laut berbeda dengan teknologi tanguna laut dan laguna laut, karena di sini turbin dan peralatan pendukungnya dipasang langsung ke lokasi aliran laut. Desain ini menghilangkan dinding yang dibutuhkan untuk menghalangi aliran. Selain itu, metode ini memiliki dampak yang jauh lebih kecil terhadap lingkungan (Todeschini, 2017). Turbin yang digunakan dalam generator jenis ini mirip dengan turbin angin tetapi beroperasi di atas air. Air lebih padat daripada angin, sehingga generator arus laut sistem ini adalah cara yang lebih efisien, andal, dan efektif untuk menghasilkan listrik.

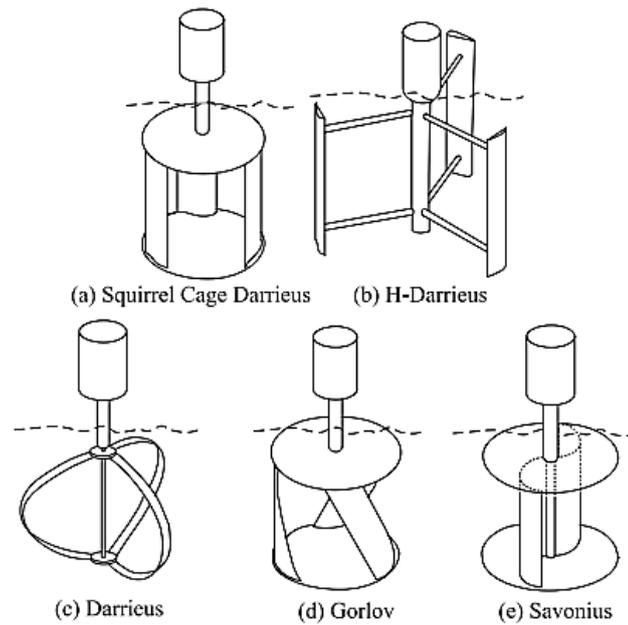
Berdasarkan orientasi sumbu rotor terhadap arah aliran air, dapat dibangun tiga jenis turbin: (a) sumbu horizontal, (b) sumbu vertikal, dan (c) turbin aliran silang (Khan dkk., 2009).

Turbin sumbu horizontal (juga dikenal sebagai aliran aksial) menggunakan rotor gaya baling-baling dan memiliki sumbu sejajar dengan arah aliran fluida. Gambar 2.1 menunjukkan berbagai tata letak turbin aksial untuk digunakan dalam aplikasi pembangkit listrik tenaga aliran air.



Gambar 2. 1 Berbagai Turbin Arus Laut Sumbu Horizontal (Khan dkk., 2009)

Turbin sumbu vertikal memiliki poros yang berputar tegak lurus terhadap arah arus laut. Banyak tata letak dalam kategori turbin sumbu vertikal ditampilkan pada Gambar 2.3 Turbin Darrieus adalah opsi sumbu vertikal yang paling umum. Meskipun turbin H-Darrieus atau Squirrel-cage Darrieus (straight-bladed) sering digunakan, tidak ada turbin Darrieus (bilah melengkung atau parabola) yang digunakan dalam aplikasi hidro. Turbin Gorlov, turbin sumbu vertikal lain dengan bilah heliks, adalah anggota lain dari keluarga sumbu vertikal. Turbin savonius adalah bentuk perangkat drag dengan bilah lurus atau miring (Khan et al., 2009).



Gambar 2. 2 Berbagai Turbin Arus Laut Sumbu Vertikal (Khan dkk., 2009)

Sementara itu, turbin *crossflow* berputar sejajar (horizontal) ke permukaan air dan melintasi arah arus laut. Turbin sumbu vertikal memiliki sumbu berputar yang tegak lurus terhadap arah arus laut.

Proses ekstraksi energi arus laut dilakukan melalui turbin. Drive-train di belakangnya termasuk sistem drive-train (gearbox, sistem hidrolik) dan generasi (generator listrik, konverter elektronik). Secara umum, turbin arus laut dapat dikategorikan menjadi dua jenis, yaitu turbin arus laut sumbu horizontal dan turbin arus laut sumbu vertikal (Qian et al., 2019). Turbin arus laut sumbu horizontal lebih banyak digunakan karena efisiensi operasionalnya yang lebih tinggi (Hassan et al., 2012)

2.4 Sistem Transmisi Pada PLTAL

2.4.1 PLTAL dengan transmisi Gearbox

Transmisi gearbox pada turbin arus laut memainkan peran penting dalam mengubah energi kinetik arus laut menjadi daya listrik secara efisien dan andal. Pilihan antara menggunakan gearbox atau memilih sistem penggerak langsung pada turbin arus laut telah menjadi subjek penelitian dan perdebatan (Touimi dkk., 2018). Sistem penggerak langsung menghilangkan kebutuhan akan gearbox,

sehingga berpotensi mengurangi kebutuhan perawatan dan meningkatkan keandalan. Namun, penelitian telah menunjukkan bahwa turbin arus laut yang digerakkan oleh gearbox, terutama yang menggunakan generator magnet permanen, dapat menawarkan solusi drivetrain yang ringkas dengan keandalan dan ketersediaan yang lebih baik (Touimi dkk., 2020).

Dalam konteks optimasi pembangkit listrik tenaga laut, kinerja generator sinkron magnet permanen sangat penting, dan optimasi ini melibatkan pertimbangan tidak hanya pada turbin dan desain sistem tetapi juga pada transmisi mekanis dari turbin ke generator (Handoko dkk., 2023). Drivetrain, termasuk gearbox, memainkan peran penting dalam memastikan transfer daya mekanis yang efisien dari turbin ke generator, yang berdampak pada efisiensi pembangkit listrik secara keseluruhan dari turbin arus laut.

Penelitian tentang gearbox turbin angin dapat memberikan wawasan berharga yang dapat diterapkan pada Turbin arus laut karena kesamaan dalam sistem transmisi mekanis dari kedua jenis teknologi energi terbarukan tersebut. Sebagai contoh, penelitian tentang metode diagnosis kerusakan gearbox turbin angin menyoroti pentingnya kondisi gearbox dalam memastikan operasi turbin yang berkelanjutan (Gu dkk., 2021). Demikian pula, teknik diagnosis kerusakan untuk gearbox turbin angin, seperti memanfaatkan jaringan pembelajaran yang mendalam, dapat diadaptasi untuk memantau dan menjaga kondisi gearbox pada Turbin arus laut (Li dkk., 2022).

Upaya untuk meningkatkan keandalan gearbox turbin angin secara langsung relevan untuk meningkatkan kinerja dan umur panjang gearbox Turbin arus laut juga (Zhang, 2023). Keandalan gearbox sangat penting dalam memastikan operasi turbin yang berkelanjutan dan memaksimalkan output energi. Pemantauan kondisi gearbox melalui metode seperti analisis getaran sangat penting untuk deteksi kesalahan dini dan pemeliharaan preventif, yang berkontribusi terhadap efisiensi dan umur panjang turbin arus laut secara keseluruhan (Teng dkk., 2021).

2.4.2 Sistem Konversi Energi Arus Laut dengan Transmisi Hidrolik

Sistem transmisi hidrolik, yang juga dikenal sebagai *Hydrostatic Transmission System* (HST), merupakan komponen penting dalam turbin arus laut,

yang memungkinkan konversi energi mekanik dari turbin menjadi daya listrik melalui mekanisme hidraulik. Sistem ini biasanya terdiri dari pompa dan motor hidrolis yang berkolaborasi untuk mentransfer energi rotasi yang dihasilkan oleh arus laut ke generator, sehingga memungkinkan untuk mengamati variasi output daya yang sesuai dengan perubahan kecepatan dan torsi turbin (Handoko dkk., 2023).

Di bidang turbin angin, penelitian telah mengeksplorasi konsep drivetrains hidrolis sebagai alternatif dari sistem gearbox tradisional. Penelitian telah difokuskan pada desain, kontrol, dan evaluasi sistem transmisi hidrolis dalam aplikasi turbin angin (Mulders dkk., 2018). *Delft Offshore Turbine* (DOT) adalah konsep turbin angin hidraulik yang menggantikan komponen drivetrain konvensional dengan pompa air laut tunggal, yang menunjukkan potensi sistem hidraulik untuk meningkatkan efisiensi dan keandalan pembangkit energi terbarukan (Mulders dkk., 2018).

Sistem transmisi hidrostatik (HST) telah dipelajari sebagai alternatif yang layak untuk drivetrain gearbox pada turbin angin, yang menawarkan manfaat seperti peningkatan efisiensi dan pengurangan kebutuhan perawatan (Lin dkk., 2020). Pada turbin angin hidrostatik (HWT), drivetrain gearbox tradisional antara poros rotor turbin angin dan poros rotor generator digantikan oleh transmisi hidrostatik, yang menunjukkan keserbagunaan dan kemampuan beradaptasi sistem hidraulik dalam aplikasi energi terbarukan (Lin dkk., 2020).

Integrasi sistem hidrolis pada turbin angin juga telah dieksplorasi dalam konteks desalinasi osmosis balik air laut, yang menggambarkan potensi turbin angin hidrolis untuk berkontribusi pada proses pengolahan air yang berkelanjutan (Laguna dan Greco, 2019). Dengan memanfaatkan turbin hidrolis bersama sistem desalinasi, energi angin dapat dikonversi secara efisien menjadi energi hidrolis, menyoroti keserbagunaan sistem hidrolis dalam berbagai aplikasi (Laguna dan Greco, 2019).

Dalam domain pembangkit listrik tenaga laut, sistem transmisi hidraulik telah diakui efisiensi dan keandalannya, terutama dalam konteks pembangkit listrik tenaga laut di mana turbin hidraulik menawarkan keunggulan dibandingkan dengan desain turbin konvensional (Rainey, 2018). Pemanfaatan transmisi hidraulik dalam

pembangkit listrik tenaga laut, dikombinasikan dengan pendekatan desain yang inovatif, dapat menghasilkan solusi yang ringan dan ramah lingkungan untuk memanfaatkan energi laut (Rainey, 2018).

Penelitian tentang pengembangan turbin angin hidrostatik bertenaga *reverse osmosis* (RO) berfokus pada penerapan strategi Maximum Power Point Tracking (MPPT) berdasarkan pengukuran tekanan oli hidrolik (Jiwad dkk., 2018). Dengan memanfaatkan penyimpanan energi hidrolik dan mekanisme kontrol, turbin angin hidrolik dapat dioptimalkan untuk efisiensi pembangkit listrik maksimum, yang menunjukkan kemampuan beradaptasi sistem hidrolik dalam aplikasi energi terbarukan (Jiwad dkk., 2018).

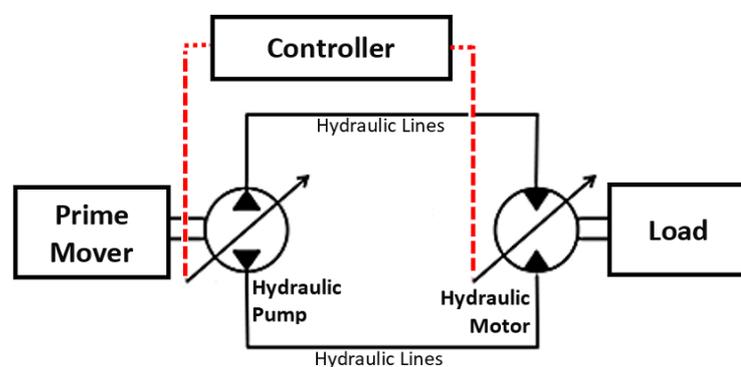
Studi tentang ketahanan dan kontrol kecepatan konstan sistem pembangkit penyimpanan energi hidrolik (HESGS) telah dilakukan untuk memastikan output energi listrik yang stabil dan konsisten terlepas dari fluktuasi kondisi angin (Liu dkk., 2018). Dengan mengontrol akumulator hidrolik dan motor variabel secara efektif, sistem penyimpanan energi hidrolik dapat menyediakan sumber energi yang dapat diandalkan, menekankan peran transmisi hidrolik dalam memastikan stabilitas jaringan dan keandalan energi (Liu dkk., 2018).

Dalam optimalisasi generator angin yang dilengkapi dengan penyimpanan energi hidrolik, proposal telah dibuat untuk menghilangkan transmisi gearbox dan memilih sistem hidrolik untuk mengurangi bobot dan meningkatkan efisiensi sistem (Han dkk., 2019). Dengan memanfaatkan sistem transmisi hidrolik, generator angin dapat mencapai pengiriman daya yang lebih halus dan kinerja yang lebih baik, yang menunjukkan potensi teknologi hidrolik untuk merevolusi pembangkit energi terbarukan (Han dkk., 2019).

Penerapan teknologi hidrolik pada turbin angin telah ditinjau secara ekstensif, menggarisbawahi pentingnya transmisi hidrolik dalam mengurangi berat nacelle dan mengurangi tingkat kegagalan roda gigi pada pembangkit listrik tenaga angin skala besar (Chen dkk., 2020). Sistem transmisi hidrolik dikenal karena tata letaknya yang fleksibel dan kemampuannya untuk mentransmisikan energi dalam jumlah besar dengan volume dan berat yang minimal, sehingga cocok untuk memenuhi kebutuhan pembangkit listrik tenaga angin (Chen dkk., 2020).

Kesimpulannya, sistem transmisi hidraulik memainkan peran penting dalam Turbin arus laut dengan secara efisien mengubah energi mekanik dari arus laut menjadi tenaga listrik. Keserbagunaan dan keandalan sistem hidraulik, seperti yang ditunjukkan dalam aplikasi turbin angin, menunjukkan potensinya untuk meningkatkan efisiensi dan kinerja pembangkit listrik tenaga laut. Dengan memanfaatkan teknologi transmisi hidraulik dan strategi kontrol, Turbin arus laut dapat dioptimalkan untuk menghasilkan daya maksimum dan stabilitas operasional, yang berkontribusi pada kemajuan solusi energi berkelanjutan.

Transmisi hidrostatis (HST) terdiri dari pompa hidrolik dan motor hidrolik. Penggerak utama terhubung ke poros input pompa dan menggerakkannya. Penggerak utama biasanya berupa motor listrik atau mesin pembakaran internal. Motor hidrolik mengontrol beban yang terhubung ke poros output pompa dengan aliran dari pompa. HST biasanya digunakan untuk mengontrol torsi dan kecepatan. Selain mengontrol arah putaran motor, juga dapat mengontrol kecepatannya. HST akan memiliki rasio roda gigi yang ditetapkan jika pompa dan motor memiliki perpindahan tetap. Dimungkinkan untuk mendapatkan rentang rasio roda gigi yang tidak terbatas dalam transmisi interval rasio roda gigi jika pompa, motor, atau keduanya adalah perpindahan variabel. Perpindahan pompa dan motor menentukan rasio roda gigi. Gambar 2.3 menunjukkan komponen utama transmisi hidraulik dengan pompa dan motor perpindahan variabel.



Gambar 2. 3 Diagram yang Disederhanakan dari Transmisi Hidrostatik (Rapp dan Turesson, 2015).

Sebuah analogi dari fisika gerakan translasi dan rotasi dapat digunakan untuk memahami hubungan antara kuantitas dalam sistem hidrolik. Daya, dalam Watt, adalah gaya dikalikan dengan kecepatan.

$$P = F \cdot v \text{ (Translational motion)} \quad (2.1)$$

$$P = T \cdot \omega \text{ (rotational motion)} \quad (2.2)$$

$$P = p \cdot q \text{ (Fluid flow motion)} \quad (2.3)$$

Dimana,

P = Power (Watts)

F = Force (Newtons)

v = Speed (m/s)

T = Torque (Twisting force) (Nm)

ω = angular velocity (rad/s)

p = pressure (Compressive Force) (Pa)

q = flow velocity or flow (m³/s)

Dalam hidrolika, banyak rumus turunan dan aturan praktis yang diturunkan dari rumus dasar di atas. Hal ini muncul karena adanya perbedaan satuan selain satuan internasional pada peralatan hidrolis. Misalnya, kecepatan putar dalam rpm (putaran per menit), aliran dalam lpm (liter per menit) atau galon per menit, tekanan dalam bar atau psi, torsi dalam kg.meter, dan daya dalam tenaga kuda (HP).

Kuantitas penting lainnya dalam sistem hidraulik adalah perpindahan. Perpindahan mengacu pada volume fluida yang dikeluarkan (atau masukan) yang diperoleh dengan mengubah dimensi geometris rongga tertutup dengan setiap putaran pompa hidraulik. Unit standar adalah volume per putaran, cm² / putaran, atau liter/putaran. Perpindahan ini bisa tetap atau variabel. Dengan pompa dan motor perpindahan variabel, jumlah aliran dan torsi dapat disesuaikan. Dari pengembangan persamaan (2.2) dan (2.3) dengan mengganti kecepatan sudut dalam rpm, kita mendapatkan rumus seperti yang diturunkan oleh (Rapp dan Turesson, 2015)

$$q_p = \varepsilon_p D_p n_p \eta_{volp} \quad (2.4)$$

$$T_p = \frac{\varepsilon_p \cdot D_m}{2\pi} \Delta p \frac{1}{\eta_{hmp}} \quad (2.5)$$

Hal yang sama berlaku untuk motor, maka aliran dan torsi dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$q_m = \varepsilon_m D_m n_m \frac{1}{\eta_{volm}} \quad (2.6)$$

$$T_m = \frac{\varepsilon_m D_m}{2\pi} \Delta p \eta_{hmm} \quad (2.7)$$

Dimana:

ε = displacement setting

D = Maximum displacement [m³/rev]

n = revolutions [rpm]

Δp = pressure difference [Pa]

η_{vol} = Volumetric efficiency

η_{hm} = Hydromechanical efficiency

Dalam menghitung daya sistem hidraulik, efisiensi dipisahkan menjadi dua jenis: efisiensi hidro-mekanis (η_{hm}) dan volumetrik (η_{vol}). Efisiensi hidro- mekanis mempertimbangkan kerugian yang disebabkan oleh gesekan (baik mekanis maupun viskos), dan kerugian efisiensi volumetrik terutama disebabkan oleh kebocoran. Efisiensi total mesin atau aktuator hidraulik adalah hasil perkalian keduanya.

Hanya ada sedikit penelitian yang secara komprehensif membandingkan kinerja berbagai sistem transmisi tenaga mekanis di pembangkit listrik tenaga arus laut. Demikian pula, pembangkit listrik tenaga angin memiliki parameter yang sama seperti ukiran turbin, kecepatan arus atau angin, generator, dan pembebanan. Informasi berikut ini dapat dipertimbangkan sebagai perbandingan dan tren dalam pemilihan sistem transmisi yang digunakan pada sistem pembangkit listrik tenaga angin, yang juga dapat diimplementasikan pada pembangkit listrik tenaga arus laut saat ini.

Sebagai upaya untuk mengkonfigurasi ulang sistem transmisi daya mekanis pada turbin angin, dilakukan penelitian oleh (Deldar dkk., 2015) dari konfigurasi gearbox dan generator berkecepatan tinggi menjadi sistem transmisi daya hidrostatik dan generator berkecepatan rendah. Hasil studi dan simulasi yang

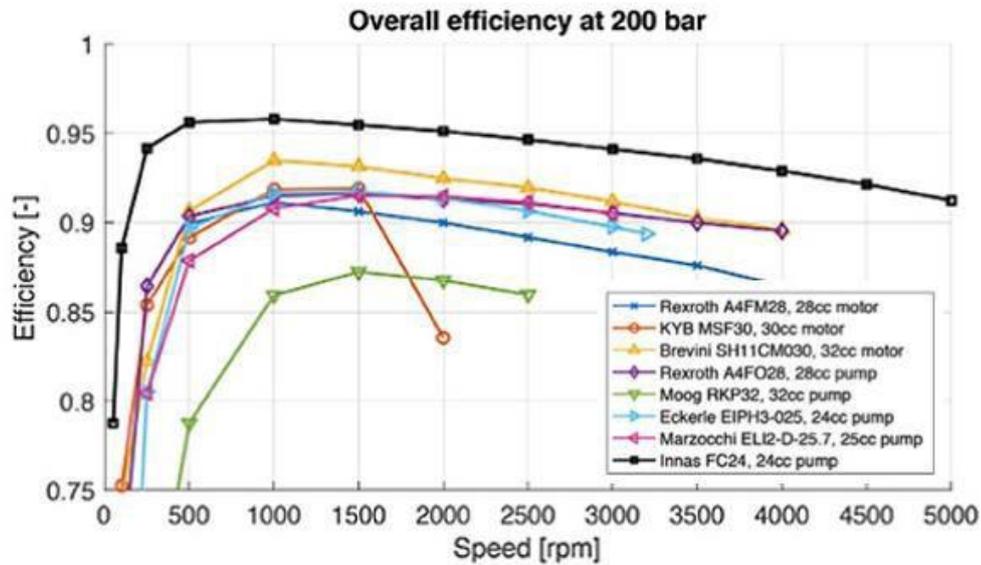
dilakukan dapat meningkatkan 8% produksi energi tahunan (AEP).

Simulasi dan studi eksperimental juga dilakukan oleh (H. W. Liu dkk., 2011) yang menguji efisiensi sistem transmisi hidrostatik pada turbin arus laut. Meskipun efisiensi total sistem transmisi hidrolik hanya sekitar 75% dibandingkan dengan efisiensi gearbox yang dapat mencapai lebih dari 90%, ada beberapa faktor tambahan yang perlu dipertimbangkan ketika memilih sistem transmisi hidrolik. Sistem transmisi hidraulik memiliki berbagai keunggulan dibandingkan gearbox. Pertama, fluktuasi torsi turbin yang dihasilkan oleh variasi kecepatan air cukup signifikan. Oleh karena itu, akan lebih baik jika beberapa solusi soft drive-train digunakan untuk mengurangi fluktuasi ini. Kedua, kontrol kecepatan motor hidrolik tipe perpindahan variabel dapat menyesuaikan kecepatan turbin, sehingga turbin dapat menangkap banyak energi.

Sebagai alternatif dari sistem turbin standar, yang menggunakan gearbox rasio tinggi terendam dan generator listrik, pompa radial hidraulik terendam modern digunakan untuk menggerakkan generator. Sistem ini memiliki beberapa keuntungan, salah satunya adalah peningkatan waktu rata-rata antara kegagalan atau *Mean Time Between Failure* (MTBF) atau pemeliharaan 1 hingga 5 tahun. Hal ini juga memungkinkan untuk menggunakan generator terendam konvensional dengan variasi yang lebih luas dari laju aliran arus laut sebagai konsekuensinya. Metode ini menggunakan komponen yang dapat diskalakan *Commercial-Off-The-Shelf* (COTS) untuk membuat penskalaan dan komersialisasi lebih mudah (Mbabazi, 2010).

Ada juga kecenderungan untuk menggunakan sistem hidrolik sebagai pendukung utama untuk ekstraksi daya dari laut, baik gelombang maupun arus laut (Korane, 2016).

Efisiensi sistem transmisi hidraulik sangat bergantung pada efisiensi pompa hidraulik. Efisiensi beberapa jenis dan merek diuji oleh (Ganon, 2021) salah satunya adalah efisiensi saat berjalan pada berbagai kecepatan putaran poros penggerak. Gambar 2.4 menunjukkan hasil pengujian tersebut.



Gambar 2. 4 Hasil Pengujian Efisiensi Beberapa Pompa Hidrolik (Ganon, 2021)

2.4.3 PLTAL dengan Tanpa Transmisi (*Direct Coupling*)

Kopling langsung atau transmisi langsung pada Turbin arus laut mengacu pada metode di mana energi mekanik yang ditangkap oleh turbin langsung ditransfer ke generator tanpa memerlukan komponen atau sistem perantara. Pendekatan ini bertujuan untuk memaksimalkan efisiensi dan mengurangi kerugian energi dalam proses konversi. Salah satu studi oleh Handoko dkk. (2023) menekankan pentingnya mengoptimalkan pembangkit listrik dalam sistem energi laut melalui desain turbin, konfigurasi sistem, dan transmisi mekanis ke generator. Kopling langsung memainkan peran penting dalam proses optimasi ini dengan memastikan transfer energi mekanik ke energi listrik yang mulus.

Dalam konteks konversi energi laut, kopling langsung sangat penting untuk meningkatkan kinerja Turbin arus laut secara keseluruhan. Turbin arus laut, mirip dengan turbin angin, mengekstrak energi dari pergerakan fluida, dalam hal ini arus laut (Orhan dan Mayerle, 2020). Dengan menghubungkan langsung turbin ke generator, sistem ini dapat secara efisien memanfaatkan energi kinetik laut dan mengubahnya menjadi listrik. Transmisi energi secara langsung ini sangat penting untuk memaksimalkan output daya Turbin arus laut dan meningkatkan efisiensi sistem konversi energi laut secara keseluruhan.

Selain itu, kopling langsung pada Turbin arus laut menghilangkan kebutuhan akan sistem transmisi yang rumit, mengurangi kebutuhan pemeliharaan dan titik-titik potensial kegagalan dalam sistem. Kesederhanaan dalam desain ini dapat meningkatkan keandalan dan mengurangi biaya operasional selama masa pakai turbin. Wani dkk. (2020) membahas analisis masa pakai modul daya pada konverter Turbin arus laut yang didinginkan secara pasif, yang menyoroti pentingnya desain yang efisien dan andal dalam sistem energi laut. Kopling langsung berkontribusi pada keandalan ini dengan merampingkan proses konversi energi dan meminimalkan jumlah komponen yang terlibat.

Selain itu, kopling langsung pada Turbin arus laut juga dapat meningkatkan kontrol dan optimalisasi pembangkit listrik. Dengan menghubungkan langsung turbin ke generator, penyesuaian dalam operasi turbin dapat lebih cepat dan akurat diterjemahkan ke dalam perubahan output listrik. Respon waktu nyata ini sangat penting untuk memaksimalkan penangkapan energi dari berbagai kondisi laut dan mengoptimalkan kinerja sistem secara keseluruhan. Nichita dkk. (2019) mempresentasikan sebuah studi tentang kopling turbin angin-laut, yang menunjukkan bagaimana kesamaan fungsional dapat dimanfaatkan untuk emulasi waktu nyata untuk meningkatkan pembangkit listrik. Kopling langsung memfasilitasi emulasi tersebut dengan menyediakan koneksi langsung dan segera antara turbin dan generator.

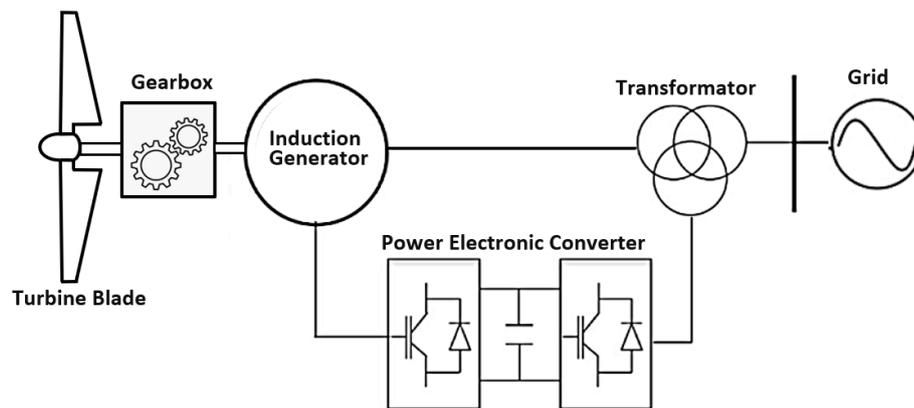
Singkatnya, kopling langsung atau transmisi langsung pada Turbin arus laut merupakan aspek fundamental dalam mengoptimalkan sistem konversi energi laut. Dengan secara langsung mentransfer energi mekanik dari turbin ke generator, pendekatan ini meningkatkan efisiensi, keandalan, dan kontrol dalam pembangkitan energi laut. Melalui penghapusan komponen perantara, kopling langsung menyederhanakan desain sistem, mengurangi kebutuhan perawatan, dan meningkatkan kinerja secara keseluruhan. Para peneliti dan insinyur terus mengeksplorasi dan menyempurnakan metode kopling langsung untuk memajukan bidang energi laut dan berkontribusi pada praktik pembangkitan energi yang berkelanjutan.

2.5 Pemilihan Kombinasi Transmisi dan Generator

Sistem transmisi dan pembangkit listrik diklasifikasikan menjadi lima jenis: (1) sistem dengan gearbox yang dikombinasikan dengan *Double Feed Induction Generator* (DFIG), (2) Sistem Penggerak Langsung menggunakan *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG), (3) sistem dengan gearbox yang menggunakan PMSG, (4) sistem hidraulik yang dikombinasikan dengan PMSG (Qian dkk., 2019) dan (5) sistem transmisi hibrida (H. W. Liu et al., 2011; Mahato & Ghoshal, 2019).

2.5.1 Konfigurasi Gearbox dan DFIG

Gearbox adalah komponen mekanis yang mengubah jumlah putaran per satuan waktu. Komponen ini meningkatkan putaran Turbin arus laut yang relatif lambat. Peningkatan kecepatan biasanya sampai tiga tahap untuk memenuhi persyaratan kecepatan rotasi minimum dari generator induksi yang diumpankan ganda. Gambar 2.5 mengilustrasikan konfigurasi sistem.



Gambar 2. 5 Sistem dengan Konfigurasi Gearbox dan DFIG

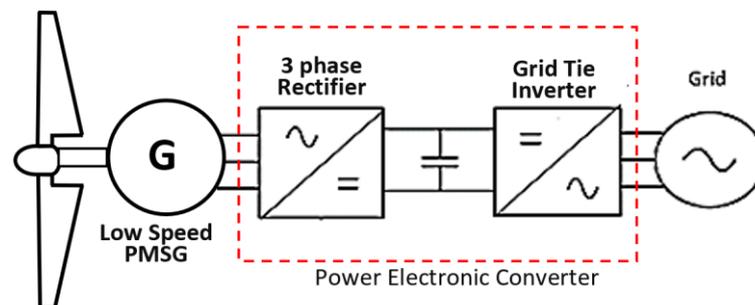
Gearbox didasarkan pada teknologi yang teruji. Gearbox telah banyak digunakan dalam transportasi, energi, dan industri proses lainnya dan dianggap sebagai komponen yang sangat diperlukan (Wang dkk., 2022). Keuntungan dari komponen ini adalah ketersediaan stok, biaya rendah, dan tingkat kegagalan yang rendah (Wang dkk., 2022).. Namun, aplikasi di bawah permukaan laut menuntut

spesifikasi teknis yang lebih tinggi daripada di darat. Biofouling juga berpengaruh karena merusak atau mengurangi kinerja sistem yang terendam (Kurdi dkk., 2020).

Pengembangan lebih lanjut dari sistem roda gigi adalah roda gigi magnetik. Roda gigi magnetik mentransmisikan torsi antara poros input dan output melalui tarikan dan tolakan magnet antara magnet yang berputar. Roda gigi magnetik modern memiliki kepadatan torsi yang tinggi dibandingkan dengan roda gigi mekanis, sehingga memungkinkannya untuk bersaing dan menarik bagi roda gigi mekanis. Dalam konteks generator lepas pantai dan terendam, gearbox magnetik tampaknya menjadi alternatif yang menjanjikan untuk mengurangi biaya operasi dan perawatan dan memperpanjang masa pakai turbin arus laut. Magnetic gear lebih dapat diandalkan dan mencapai efisiensi lebih tinggi dari 99%. Selain itu, pelumasan tidak diperlukan karena bagian yang bergerak tidak bersentuhan (Mison dkk., 2020).

2.5.2 Konfigurasi Langsung dan PMSG

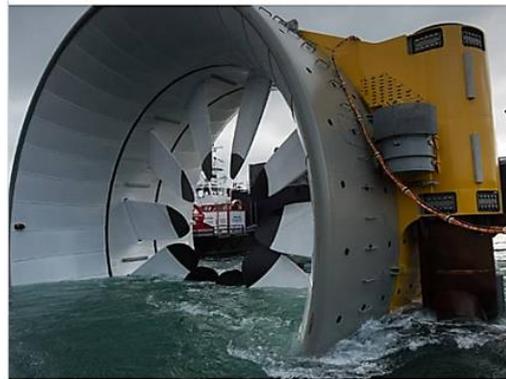
Salah satu upaya untuk menemukan alternatif adalah dengan melepas roda gigi. Hal ini membutuhkan generator dengan putaran yang jauh lebih rendah, lebih banyak kutub, dan magnet permanen yang kuat. Oleh karena itu, Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) dapat menjadi solusi (Omokhafa James dkk., 2022). Pada konfigurasi ini, Turbin arus laut terhubung langsung dengan generator tipe PMSG, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.6.



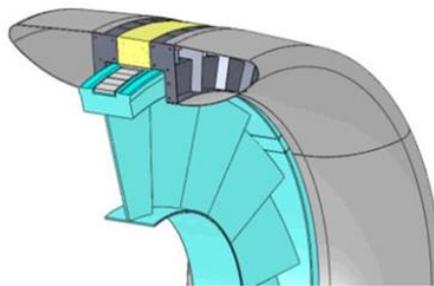
Gambar 2. 6 Sistem dengan Konfigurasi Gearbox dan DFIG

Gambar 2.7 adalah Turbin arus laut OpenHydro. OpenHydro adalah pengembang pertama yang menggunakan lokasi uji coba laut di Fall of Warness di

lepas pantai pulau Eday ketika rig uji coba dan turbin pusat terbuka berkapasitas 250 kW dipasang pada tahun 2006. Ini adalah Turbin arus laut pertama yang terhubung ke jaringan listrik di Skotlandia dan, kemudian, yang pertama berhasil menghasilkan listrik untuk jaringan listrik nasional di Inggris.



(a)



(b)

Gambar 2. 7 (a) Sistem Turbin arus laut OpenHydro (b) Susunan Magnet Permanen pada rotor (Touimi dkk., 2020)

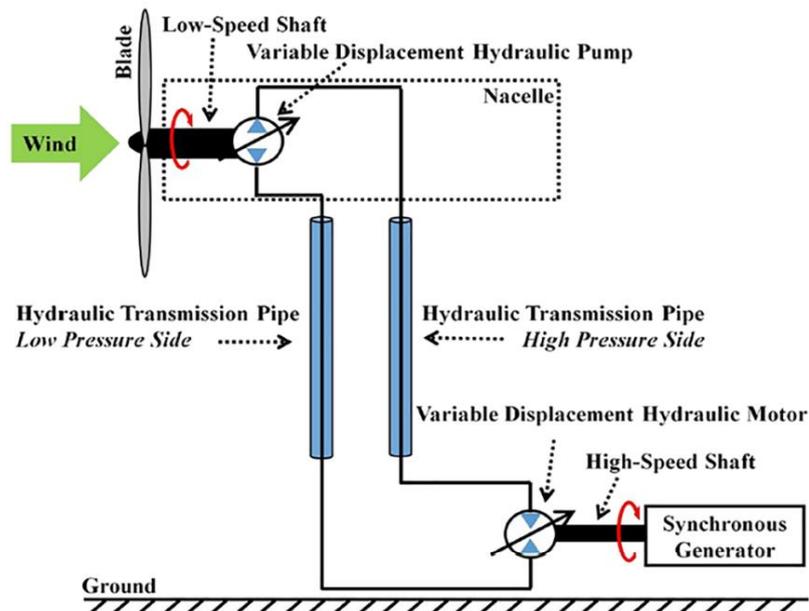
2.5.3 Konfigurasi Gearbox dan PMSG

Seringkali, putaran turbin arus laut relatif rendah meskipun menggunakan generator tipe PMSG, apalagi generator PMSG yang umum digunakan. Nilai putaran yang tersedia cukup signifikan, meskipun lebih kecil dari generator tipe DFIG. Oleh karena itu, gearbox satu atau dua tahap digunakan pada jenis konfigurasi ini (Ortega dkk., 2020).

2.5.4 Konfigurasi Hidraulik dan PMSG

Sistem ini melibatkan beberapa transformasi energi. Dengan menggunakan pompa hidrolik, fluida dipompa dari generator ke akumulator untuk disimpan.

Manfaat tambahan dari penggunaan motor hidrolik adalah aliran fluida dapat diubah kembali menjadi energi mekanik dan digunakan kembali. Generator PMSG kemudian mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Tekanan oli sistem tetap stabil karena kemampuan akumulator untuk menyerap guncangan hidrolik (Liu dkk., 2011). Overflow valve berfungsi sebagai katup pengaman yang membatasi tekanan sistem untuk melindungi sistem. Gambar 2.8 menunjukkan turbin arus laut dengan sistem transmisi hidrolik.

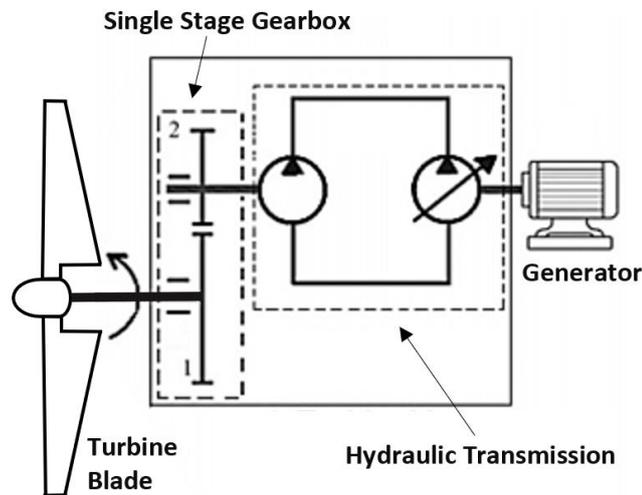


Gambar 2. 8 Konfigurasi Hidrolik Dan PMSG (Chen dkk., 2020)

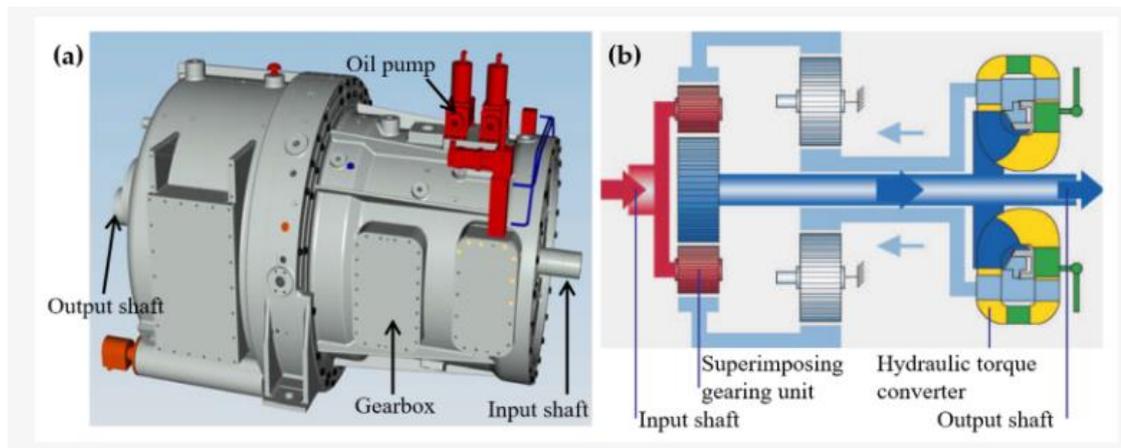
2.5.5 Gearbox Hibrida dan Konfigurasi Hidraulik

Sistem transmisi daya hidrolik pada turbin angin atau laut menghubungkan pompa hidrolik secara langsung ke poros rotor. Akibatnya, pompa hidrolik berkapasitas besar diperlukan untuk mencapai output daya tinggi. Pompa hidrolik dengan perpindahan besar sulit dibuat, dan bagi sebagian besar produsen komponen hidrolik, pompa ini mungkin tidak layak secara ekonomi. Dengan demikian, sistem hidrolik dengan penggerak langsung memiliki kelemahan yang signifikan. Masalah ini dapat diatasi dengan transmisi roda gigi satu tahap yang dihibridisasi dengan pompa hidrolik kecepatan rendah. Metode ini mengurangi perpindahan pompa dengan tetap mempertahankan fitur torsi yang stabil dari sistem turbin

angin. Gambar 2.9 dan 2.10 mengilustrasikan strategi transmisi daya hibrida secara lebih rinci.



Gambar 2. 9 Sistem dengan Konfigurasi Gearbox dan DFIG



Gambar 2. 10 Transmisi Hidraulik Dengan Unit Roda Gigi Internal (Li dan Zhu, 2022)

2.6 Generator Jenis PMSG pada Sistem Konversi Energi Laut

Turbin arus laut merupakan sumber energi terbarukan yang menjanjikan, memanfaatkan kekuatan arus laut untuk menghasilkan listrik. Dalam sistem ini, berbagai jenis generator listrik digunakan untuk mengubah energi mekanik dari laut menjadi tenaga listrik. Dua jenis generator yang umum digunakan dalam Turbin

arus laut adalah *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG) dan *Doubly Fed Induction Generator* (DFIG) (Belkhier dkk., 2021).

Generator Sinkron Magnet Permanen (PMSG) adalah komponen penting dalam sistem konversi energi pasang surut karena efisiensi, keandalan, dan kepadatan daya tinggi (Liu et al., 2020). Generator ini umumnya digunakan dalam skema pembangkit listrik pasang surut, di mana mereka terhubung ke jaringan melalui konverter frekuensi variabel dengan konverter modulasi lebar pulsa (PWM) dalam konfigurasi back-to-back (Abo-Khalil et al., 2021). Pemanfaatan PMSG dalam sistem energi pasang surut lebih lanjut didukung oleh kemampuannya untuk meningkatkan keandalan keseluruhan sistem energi aliran pasang surut (Liu et al., 2021). Selain itu, PMSG telah mendapatkan popularitas dalam sistem konversi energi arus pasang surut karena kepadatan, keandalan, dan ketersediaannya yang tinggi (Liu et al., 2020).

Desain dan pengujian jenis PMSG baru khusus untuk sistem energi arus pasang surut menyoroti pentingnya generator ini dalam memanfaatkan energi pasang surut secara efisien (Zhao et al., 2023). Turbin pasang surut, yang mengekstrak energi dari aliran pasang surut, umumnya menggabungkan PMSG karena efisiensi dan kepadatan dayanya yang tinggi, menjadikannya pilihan yang lebih disukai untuk konversi energi pasang surut (Bettouche et al., 2020). Selain itu, arsitektur pembangkit listrik pasang surut sering mengintegrasikan PMSG dengan Algoritma Pelacakan Titik Daya Maksimum untuk konversi energi dan koneksi jaringan yang optimal (Dixit & Badgaiyan, 2022).

Dalam konteks teknologi konversi arus laut, PMSG disukai karena keunggulannya seperti kepadatan daya tinggi, biaya rendah, dan produksi listrik yang menguntungkan (Belkhier et al., 2021). Konversi energi gelombang pasang surut menjadi energi mekanik melalui turbin hidro yang terhubung ke PMSG menyoroti fleksibilitas dan efektivitas generator ini dalam aplikasi energi pasang surut (Kj & Ranganathan, 2018). Analisis stabilitas generator turbin pasang surut menekankan pentingnya PMSG dalam memastikan pengoperasian sistem energi pasang surut yang andal (Ikhwan et al., 2021).

PMSG juga banyak digunakan dalam aplikasi energi terbarukan lainnya seperti tenaga angin dan gelombang karena efisiensinya yang tinggi, persyaratan

perawatan yang rendah, dan kepadatan daya yang tinggi (García-Gracia et al., 2018). Penerapan PMSG dalam sistem konversi energi gelombang menggarisbawahi kesesuaiannya untuk operasi torsi dan kecepatan variabel, karakteristik penting untuk konversi energi pasang surut (Samb et al., 2022). Pemanfaatan PMSG dalam konversi energi terbarukan sejalan dengan penggunaannya yang umum dalam berbagai sistem energi terbarukan untuk pembangkit listrik yang efisien (Sjökvist et al., 2017).

Analisis kinerja PMSG yang digerakkan langsung dalam sistem konversi energi angin menunjukkan adopsi luas generator ini dalam aplikasi energi terbarukan (Mastanamma, 2019). Strategi pengendalian untuk sistem konversi energi angin berbasis PMSG lebih menekankan pentingnya PMSG dalam pembangkit energi terbarukan (Kumar & Anita, 2017). Desain sistem kontrol hibrida untuk konversi energi angin berbasis PMSG menyoroti fleksibilitas PMSG dalam konteks energi terbarukan yang berbeda (Feng et al., 2021).

Generator Sinkron Magnet Permanen (PMSG) memainkan peran penting dalam sistem konversi energi pasang surut karena efisiensi, keandalan, dan kepadatan daya tinggi. Integrasi PMSG dalam skema pembangkit listrik pasang surut, teknologi konversi arus laut, dan aplikasi energi terbarukan lainnya menggarisbawahi fleksibilitas dan efektivitasnya dalam memanfaatkan energi pasang surut dan mengubahnya menjadi listrik. Meluasnya penggunaan PMSG dalam berbagai sistem energi terbarukan semakin memperkuat posisi mereka sebagai komponen kunci dalam transisi menuju pembangkit energi berkelanjutan.

2.7 Sistem Konversi Energi Laut Off-grid Dan On-grid

Sistem *off-grid* dan *on-grid* merupakan komponen penting dari sistem konversi energi arus laut yang memanfaatkan tenaga laut untuk menghasilkan listrik. Dalam sistem ini, komponen dasar biasanya meliputi baling-baling, generator turbin, inverter, dan jaringan listrik (Lin dkk., 2020). Sistem *on-grid* dalam sistem ini mengacu pada pengaturan di mana energi laut yang dihasilkan terhubung ke jaringan listrik utama untuk didistribusikan ke konsumen. Sebaliknya, sistem *off-grid* beroperasi secara independen dari jaringan listrik utama, sering kali

digunakan di daerah terpencil atau pulau-pulau di mana menghubungkan ke jaringan listrik utama tidak praktis atau mahal (Almeida dan Moura, 2020).

Dalam bidang sistem konversi energi laut, generator sinkron magnet permanen umumnya digunakan karena kepadatan daya yang tinggi dan kemudahan pemeliharaan dalam sistem yang terhubung ke jaringan listrik (Belkhier dkk., 2021). Generator ini merupakan bagian integral dari pengaturan sistem *on-grid* dan *off-grid*. Integrasi generator jenis PMSG dalam sistem *on-grid* memungkinkan pembangkitan dan distribusi daya yang efisien, yang berkontribusi pada stabilitas dan keandalan jaringan. Dalam sistem *off-grid*, PMSG menyediakan sumber listrik yang andal untuk aplikasi mandiri, memastikan pasokan listrik yang konsisten di area tanpa akses ke jaringan utama.

Teori kontrol memainkan peran penting dalam mengoptimalkan kinerja sistem konversi energi laut, terlepas dari apakah itu pengaturan *on-grid* atau *off-grid*. Berbagai strategi kontrol, seperti kontrol tegangan berbasis pasif dan kontrol pengamat nonlinier berbasis energi, telah dikembangkan untuk meningkatkan efisiensi dan stabilitas sistem ini (Belkhier dan Achour, 2020; Belkhier dkk., 2021). Mekanisme kontrol ini sangat penting untuk mengatur pengoperasian turbin dan generator di PLTAL, mengoptimalkan proses konversi energi untuk menghasilkan output yang maksimal.

Dalam sistem *off-grid*, penggunaan superkapasitor telah dieksplorasi untuk mengurangi denyut torsi dan mengatasi fluktuasi daya jangka pendek yang mungkin timbul karena faktor lingkungan seperti turbulensi dan gelombang ombak (Sousounis dkk., 2019). Dengan memasukkan superkapasitor ke dalam sistem konversi arus laut di luar jaringan, stabilitas dan keandalan sistem dapat ditingkatkan, memastikan output daya yang konsisten bahkan dalam kondisi yang menantang.

Selain itu, keandalan pembangkit listrik tenaga laut tipe barrage, yang biasa digunakan baik dalam konfigurasi PLTAL *on-grid* maupun *off-grid*, telah dipelajari secara ekstensif (Ghaedi dan Mirzadeh, 2020). Menganalisis dampak variasi ketinggian laut terhadap keandalan pembangkit listrik tersebut sangat penting untuk memastikan pembangkit listrik yang berkelanjutan dan berkesinambungan,

terutama pada aplikasi *off-grid* di mana kegagalan sistem dapat menimbulkan konsekuensi yang signifikan terhadap pasokan energi.

Efisiensi adalah pertimbangan utama untuk konverter energi laut dalam sistem *on-grid* dan *off-grid*. Berbagai metode perhitungan telah dikembangkan untuk menilai efisiensi konversi konverter energi laut, dengan fokus pada memaksimalkan output energi (Xia dkk., 2022). Metode-metode ini sangat penting untuk mengoptimalkan kinerja sistem konversi energi laut, memastikan konversi energi laut yang efisien menjadi listrik yang dapat digunakan.

Kesimpulannya, sistem *off-grid* dan *on-grid* sangat penting untuk memanfaatkan energi laut dan mengubahnya menjadi listrik. Integrasi generator sinkron magnet permanen, strategi kontrol yang canggih, sistem penyimpanan energi, dan desain turbin yang efisien adalah komponen penting dari pengaturan PLTAL *on-grid* dan *off-grid*. Dengan memanfaatkan teknologi inovatif dan mekanisme kontrol, kedua jenis sistem ini dapat berkontribusi pada masa depan energi yang berkelanjutan dengan memanfaatkan sumber daya energi laut yang dapat diprediksi dan terbarukan.

2.8 Optimasi Berbasis TSR

Sama halnya dengan tenaga angin, tenaga mekanik arus laut bergantung pada massa jenis air laut (ρ dalam kg/m^3), kuadrat radius turbin (r dalam meter), dan pangkat dua dari kecepatan aliran air laut (v dalam m/s). Potensi aliran ini dapat dinyatakan sebagai

$$P_{tidal} = 0.5 \rho \pi R^2 v^3 \quad (2.8)$$

Oleh turbin, aliran air laut diubah menjadi energi mekanik $P_{turbine}$, yang dinyatakan sebagai

$$P_{turbine} = C_p(\lambda, \beta) P_{tidal} \quad (2.9)$$

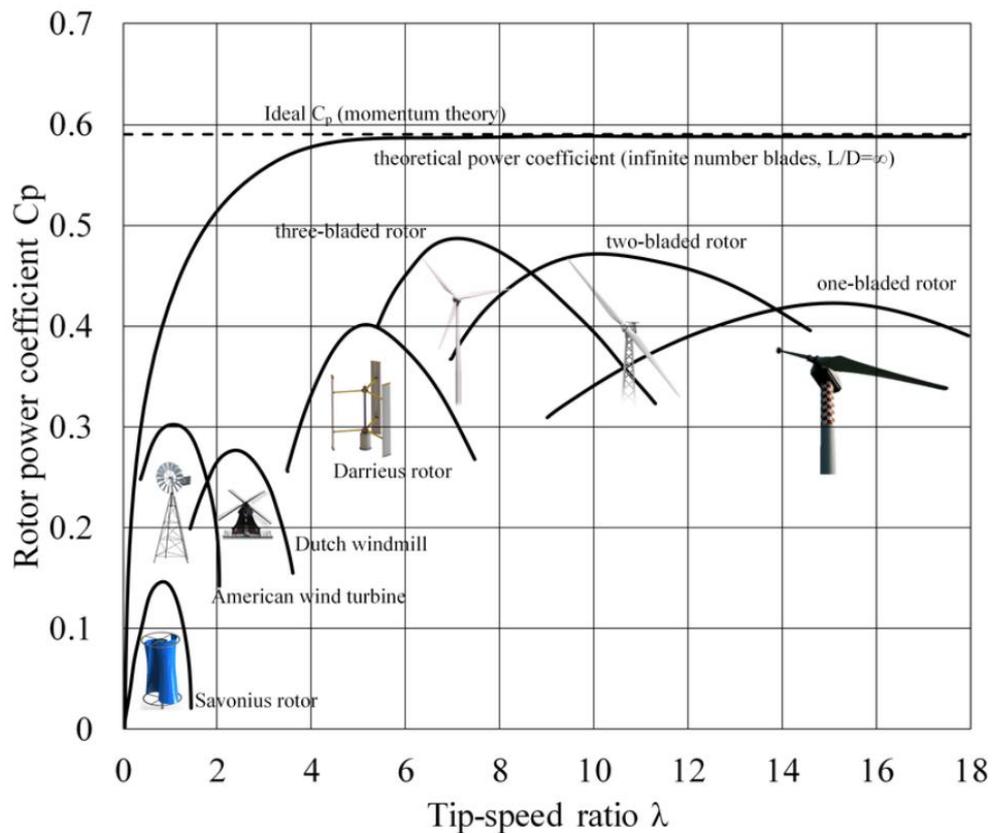
Dimana $C_p(\lambda, \beta)$ adalah koefisien daya turbin, yang merupakan fungsi dari *rasio* kecepatan ujung dan sudut pitch. *Kami* biasanya mengasumsikan bahwa sudut pitch adalah 0° . Rasio kecepatan ujung (TSR) dinyatakan sebagai

$$\lambda = \frac{R \omega_{turbine}}{v} \quad (2.10)$$

Di mana $\omega_{turbine}$ adalah kecepatan sudut rotasi dalam rad/s

Dari Persamaan (2.9), terlihat bahwa nilai C_p juga menunjukkan nilai efisiensi dari sebuah turbin arus laut. Lalu seberapa besar efisiensi yang dapat dihasilkan dari strategi kontrol sebesar ΔC_p . Upaya optimasi yang dilakukan adalah dengan menjaga nilai TSR secara dinamis sehingga mendekati nilai optimal.

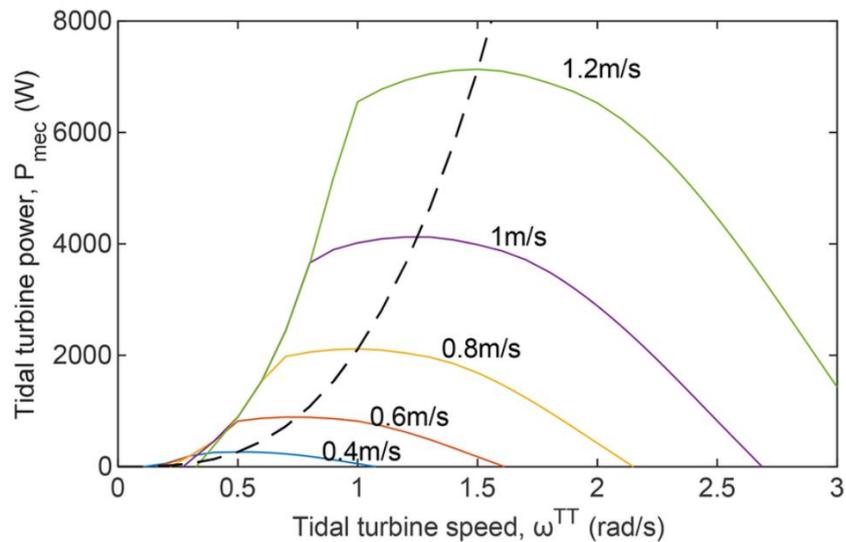
Nilai C_p diperoleh dari produsen turbin atau hasil pengujian. Jenis turbin yang berbeda memiliki nilai tipikal yang berbeda, tergantung pada jenis poros, jenis bilah, ukuran, dan material, seperti ditunjukkan gambar 2.11.



Gambar 2. 11 Kurva C_p – TSR untuk berbagai jenis turbin (Quintal, 2020)

Dari Persamaan (2.10), dapat dilihat bahwa nilai TSR bergantung pada kecepatan putar poros turbin atau poros generator. Sehingga dapat dikatakan bahwa daya output generator merupakan fungsi dari kecepatan putar poros. Oleh karena itu, untuk berbagai arus laut, daya sebagai fungsi kecepatan putar untuk turbin

tipikal dapat digambarkan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.12.

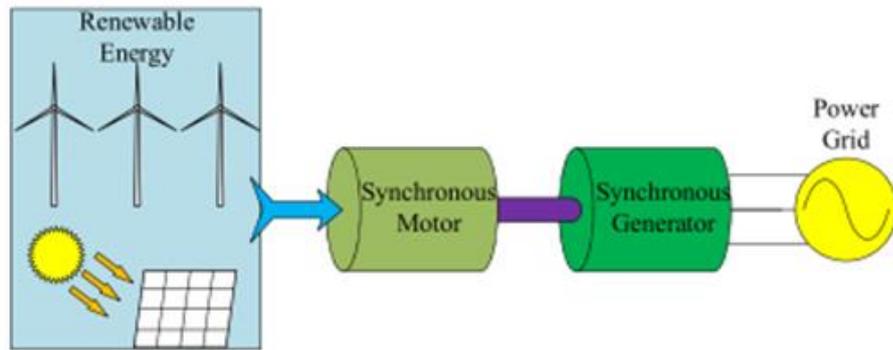


Gambar 2. 12 Contoh Khas Kurva Daya vs RPM untuk Kecepatan Arus laut yang Berbeda (Wen dan Srikanth, 2017)

Pada penelitian ini digunakan metode table look-up, dimana diasumsikan sistem telah memiliki data spesifikasi turbin, kurva koefisien daya, dan mode operasional turbin.

Pembahasan berikutnya adalah tentang konsep Pasangan Motor dan Generator. *Motor Generator Pair* (MGP) adalah pendekatan baru untuk sistem energi terbarukan on-grid yang memanfaatkan kombinasi motor dan generator untuk meningkatkan stabilitas dan kinerja sistem energi terbarukan (Gu et al., 2021). Sistem MGP dirancang untuk mengatasi kekurangan sistem energi terbarukan berbasis konverter elektronik, terutama ketika terjadi gangguan pada grid (Gu et al., 2021).

Sistem MGP terdiri dari motor dan generator yang terhubung secara seri (dalam satu poros), dengan motor terhubung ke sumber energi terbarukan dan generator terhubung ke jaringan listrik. Sistem MGP telah dipelajari dan dianalisis secara ekstensif melalui simulasi dan eksperimen, dengan hasil yang menjanjikan untuk energi terbarukan yang terhubung ke jaringan yang mengatasi tantangan dan keterbatasan sistem berbasis konverter (Gu et al., 2021)(Zhou et al., 2018). Gambar 2.13 mengilustrasikan konsep MGP.



Gambar 2. 13 Konsep Pasangan Generator Motor (Zhou et al., 2018)

Penelitian ini mengadaptasi sistem ini, dalam artian menggunakan motor listrik sebagai alat untuk mengatur TSR untuk mendapatkan koefisien daya maksimum.

Bab 3

Metodologi Penelitian

3.1 Prosedur Penelitian

Untuk mencapai tujuan penelitian maka disusunlah prosedur penelitian yang terdiri dari 4 langkah seperti yang digambarkan pada flowchart penelitian pada gambar 3.1.

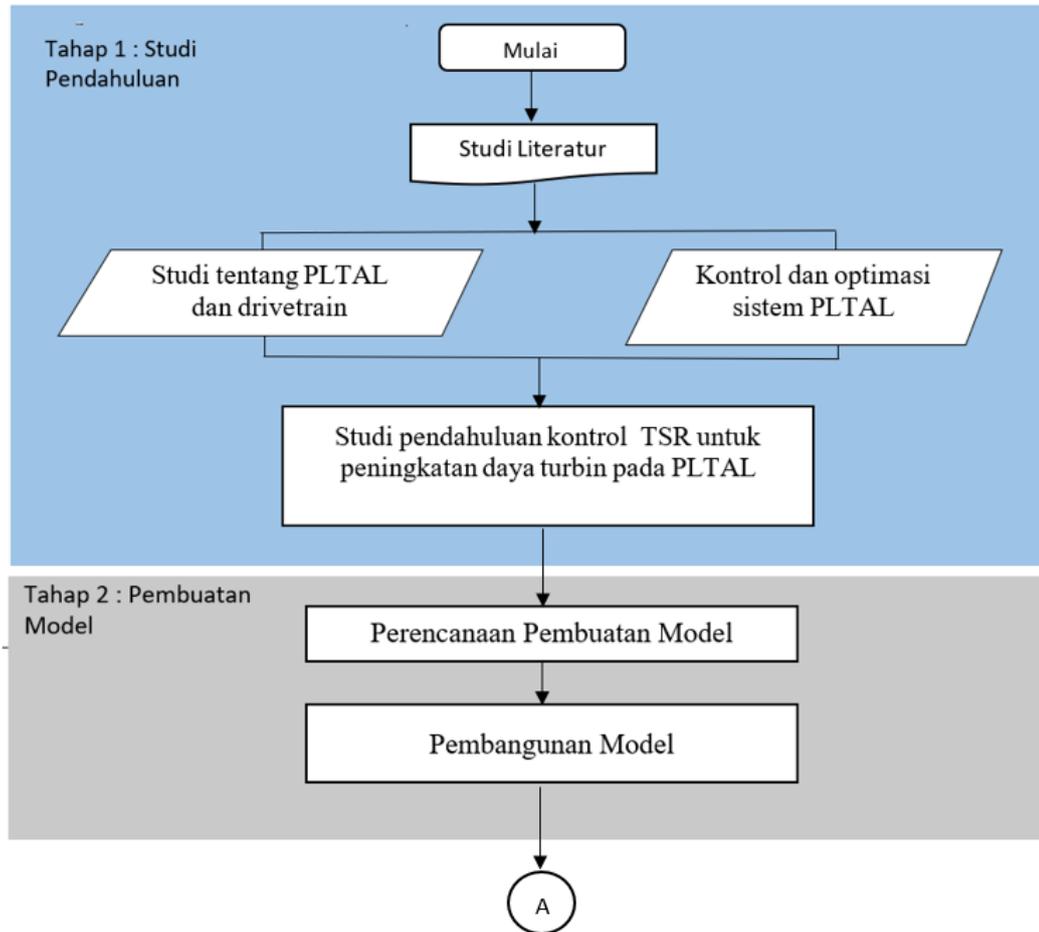
Penelitian ini terdiri dari 4 tahapan utama. Pertama yaitu studi literatur terkait dengan sistem pembangkitan energi listrik dari arus laut, potensi energi arus laut, turbin arus laut, sistem transmisi atau drivetrain, generator dan sistem on-grid dan off-grid pada PLTAL.

Tahap kedua adalah membangun model fisik PLTAL dengan skala yang relevan. Model fisik ini terdiri simulator turbin, sistem transmisi mekanik dan hidrolis yang dilengkapi dengan *freewheeling coupling*, motor bantu dan kontroler untuk mengatur motor bantu.

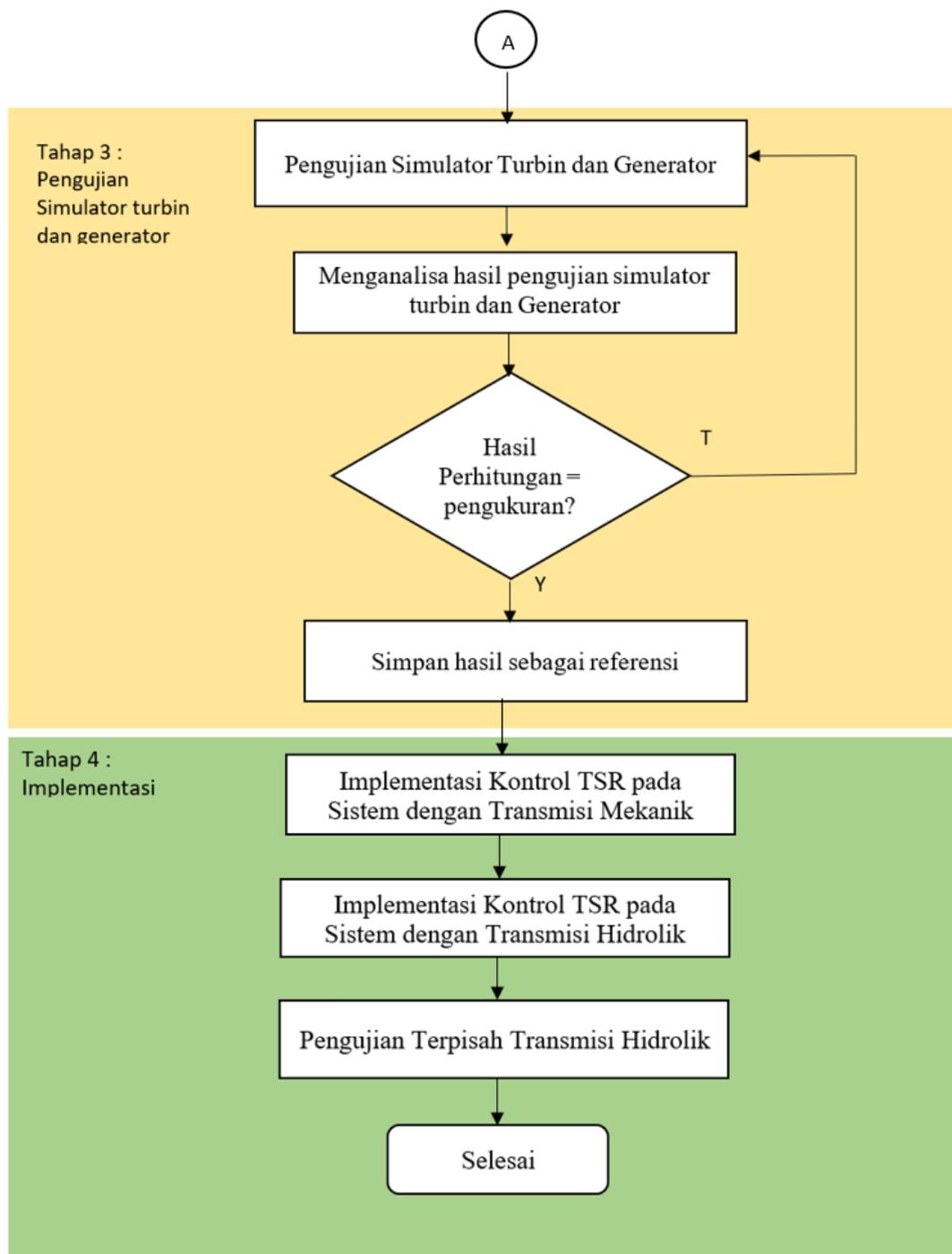
Tahap ketiga pengujian bagian simulator turbin dan generator, untuk memastikan bahwa kedua sistem penunjang ini berfungsi dengan baik. Simulator turbin bisa menghasilkan torsi sesuai dengan kecepatan arus yang diterima turbin. Diharapkan torsi hasil perhitungan dan hasil pengukuran dengan torsi meter dinamik memiliki nilai yang sama atau hampir sama. Sedangkan pada pengujian generator, diharapkan adanya karakteristik pembebanan yang serupa dengan generator yang diputar dengan turbin sebenarnya.

Tahap keempat adalah melakukan implementasi kontrol TSR untuk meningkatkan daya turbin. Pada tahap ini dilakukan pembuatan profil turbin yang menghasilkan kurva-kurva karakteristik turbin dan data besaran mekanis turbin untuk digunakan sebagai referensi dalam implementasi kontrol optimasi. Implementasi pertama dilakukan pada sistem dengan transmisi mekanik. Untuk menguji kemanfaatan dari sistem transmisi hidrolis berupa fleksibilitas penempatan komponen PLTAL, maka implementasi kontrol TSR kedua dilakukan pada sistem dengan sistem transmisi hidrolis. Dan pengujian terakhir dilakukan pada sistem

transmisi hidrolik secara terpisah untuk mengetahui efisiensi dari sistem transmisi ini.



Gambar 3. 1 Flowchart Prosedur Penelitian (bersambung)



Gambar 3. 1 Flowchart Prosedur Penelitian

3.2 Studi Literatur

Studi literatur yang dilakukan pada penelitian ini, merupakan tahapan untuk mematangkan konsep dan perumusan masalah yang akan diselesaikan sampai akhir tahapan penelitian. Studi literatur ini mencari informasi-informasi tentang

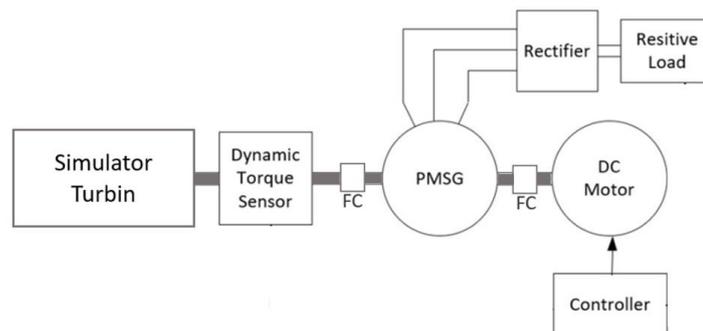
investigasi dalam penelitian terkait kontrol peningkatan daya turbin berbasis TSR dalam upaya memaksimalkan energi yang dihasilkan sistem konversi energi arus laut. Dalam studi literatur ini juga dilakukan pendalaman teori dan pemahaman akan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, baik penelitian lokal maupun dari jurnal internasional. Literatur-literatur tersebut yang nantinya akan menjadi acuan pengerjaan.

3.3 Pembangunan Model sistem PLTAL

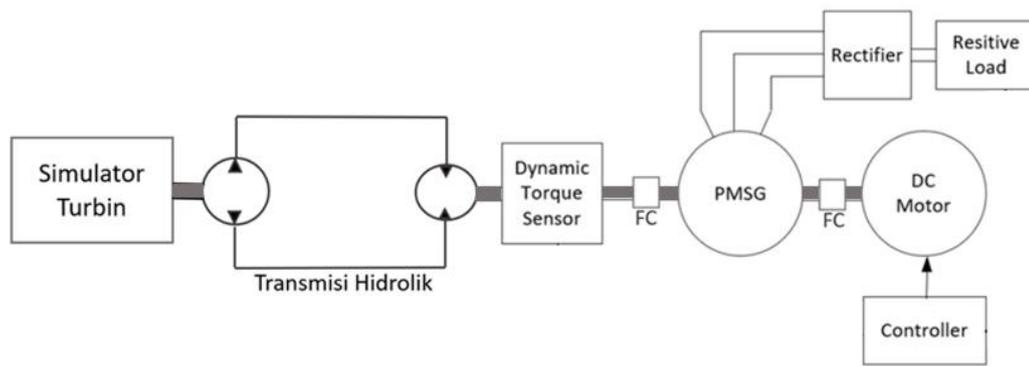
Pada tahap ini, dibangun sebuah model dengan komponen-komponen seperti digambarkan pada gambar 3.2 dan 3.3, dimana akan ditambahkan sebuah motor dc pada poros yang sama dengan motor hidrolis. Tidak seperti pengaturan pada sistem drivetrain hidrolis pada pembangkit listrik arus laut lainnya atau PLT angin, dimana umumnya *adjustment* kecepatan rotor dilakukan melalui kontrol pada motor hidroliknya, maka di sini kontrol optimasi bisa dilakukan pada motor arus searah.

Dengan penambahan ini, maka pengaturan optimasi ekstraksi daya maksimum berbasis *Tip Speed Ratio* (TSR) bisa lebih mudah dilakukan, dibandingkan dengan bila pengaturan dilakukan pada sisi sistem hidroliknya. Hal ini mengingat pengaturan speed dan torsi pada motor DC lebih mudah dilakukan yakni dengan pengaturan tegangan. Sistem transmisi hidrolis tetap dipertahankan agar sistem drive-train bisa berada di atas permukaan air yang akan memudahkan perawatan dan mengurangi biaya dibandingkan sistem terendam.

Untuk melakukan pengujian, maka nantinya akan digunakan penggerak rotasional berupa motor listrik yang diperlakukan sedemikian rupa sehingga bisa mensimulasikan putaran turbin sesuai dengan kecepatan arus laut dari data kecepatan arus laut.



Gambar 3. 2 Diagram Blok Model dengan Trasmisi Mekanik



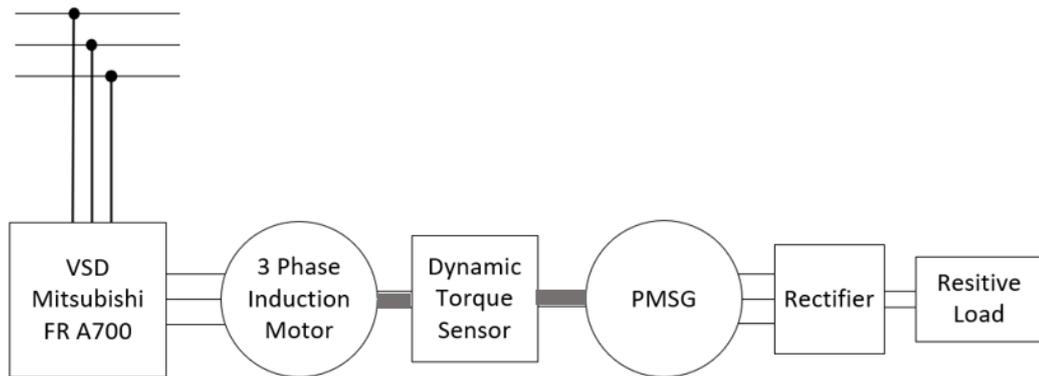
Gambar 3. 3 Diagram Blok Model Pengujian dengan Sistem Transmisi Hidrolik

3.4 Metode Pengujian Simulator Turbin Arus Laut

Penelitian ini menggunakan model fisik yang terdiri dari motor listrik induksi 3 fase yang dipasangkan dengan penggerak kecepatan variabel (VSD) yang mampu mengontrol torsi. Motor yang dipilih untuk percobaan ini adalah 1,5 kW, 400V, unit 3-fase dengan rentang kendali kecepatan 0,2 Hz hingga 400 Hz, memanfaatkan teknologi kendali vektor, yang juga dikenal sebagai *Field Oriented Control (FOC)*. Pengaturan sistem dirancang untuk mensimulasikan dinamika torsi yang khas pada turbin arus laut.

Poros motor terhubung langsung ke pengukur torsi dinamis, yang memiliki rentang pengukuran 0-100 N.m dengan toleransi kesalahan sebesar $\pm 5\%$. Pengukur ini mengukur torsi yang dihasilkan oleh motor, yang kemudian ditransfer ke Generator Sinkron Magnet Permanen 600W yang beroperasi pada kecepatan pengenal 500 rpm. Output listrik dari generator ini melewati penyearah jembatan dan kemudian diterapkan pada beban resistif murni, di mana ia diukur menggunakan wattmeter DC.

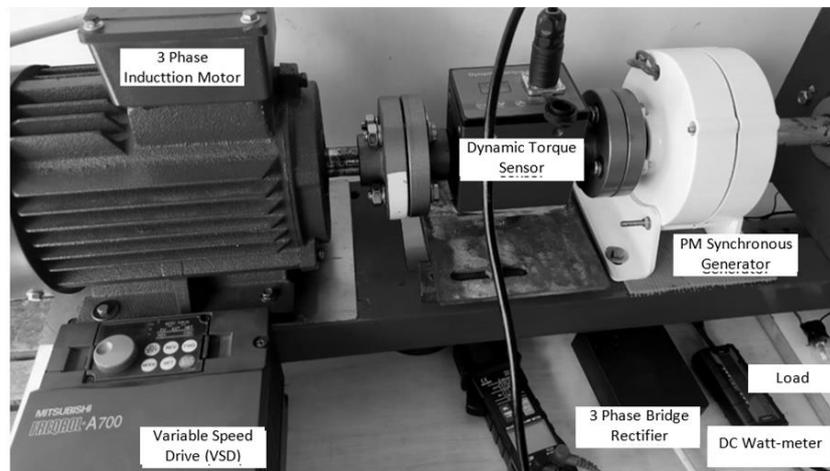
Berikut ini adalah gambaran umum dari model fisik yang dibangun untuk penelitian ini. Gambar 3.4 di bawah ini adalah diagram skematik dari model tersebut. Sedangkan Tabel 3.1 menunjukkan parameter motor. Dan Gambar 3.5 menunjukkan gambaran secara keseluruhan model pengujian simulator turbin ini.



Gambar 3. 4 Diagram Blok Model Simulator Turbin Laut

Tabel 3. 1 Parameter Motor Induksi 3-Fase yang digunakan pada Simulator

Deskripsi	Simbol	Nilai	Unit
Daya	P	1.5	kW
Kecepatan	n	1480	rpm
Kelas	C	C	-
Tegangan	V	220/380	Volt
Cos Phi	ϕ	0.78	-
Efisiensi	η	78.5%	-
Arus	I	6.4/3.7	A
IP	IP	55	-



Gambar 3. 5 Model Fisik Simulator Turbin Arus Laut

Dengan spesifikasi daya motor, maka dapat dihitung berapa torsi yang dapat disediakan oleh motor. Pada perangkat VSD, untuk menghasilkan torsi yang diinginkan, pengaturan yang harus dilakukan ditargetkan pada persentase torsi terukur. Sebagai contoh, pengaturan 100% berarti motor akan berputar dengan torsi 100% x torsi terukur. Jika pengaturan diubah menjadi 50% feeding, berarti motor akan menghasilkan torsi sebesar 50% dan seterusnya. *Variable speed drive* (VSD) yang digunakan dalam penelitian ini menyediakan hingga 400% dari torsi terukur. Namun, yang harus diingat adalah batas daya yang tersedia. Batas daya nominal yang tersedia pada motor adalah 1,5 kW. Dengan demikian, untuk meningkatkan nilai torsi melebihi torsi terukur pada VSD, kecepatan motor harus lebih rendah dari kecepatan putar terukur.

$$T_{rated}[N.m] = \frac{P_{motor} [Watt] \times Efficiency}{Speed [\frac{rad}{sec}]} \quad (3.1)$$

Dari perhitungan menggunakan rumus 3.2 diperoleh T_{rated} sebesar 7.45 N.m. Nilai ini digunakan sebagai pengaturan referensi dalam VSD untuk menghasilkan torsi yang diinginkan. Nilai T_{max} adalah 400%, sehingga torsi yang dapat dihasilkan oleh motor adalah 400% x 7,45 yaitu 29,8 N.m. Dengan mempertimbangkan batas daya, maka putaran maksimum yang diijinkan adalah P_{motor} x efisiensi dibagi torsi maksimum, dan didapatkan putaran maksimum 39,26 rad/s atau 375 rpm. Pada pengujian ini, untuk menghindari panas dan pertimbangan umur peralatan (de-rating), maka besarnya pengaturan torsi akan dilakukan hanya sampai 200%.

3.5 Metode pada Analisa Kinerja Generator

Model sistem pembangkit listrik tenaga arus laut dalam penelitian ini terdiri dari beberapa bagian, yaitu simulator turbin, sistem transmisi mekanik (*gearbox*) dan generator.

Pada pengujian generator ini digunakan simulator turbin sebagai penggerak utama generator. Penjelasan apa dan bagaimana simulator turbin bekerja telah dijelaskan dalam bab sebelumnya yakni sub bab sebelumnya.

Dalam studi ini, generator sinkron magnet permanen (PMSG) yang tersedia di pasaran digunakan. Tabel 3.2 berikut ini menunjukkan generator yang digunakan dengan data spesifikasi teknisnya. Keluaran daya elektrik dari generator berupa kabel 3 fasa yang mesti disearahkan sebelum digunakan. Maka di sini dibutuhkan penyearah 3 fasa untuk mengubahnya menjadi aliran listrik searah dan siap untuk diukur.

Tabel 3. 2 Spesifikasi Generator Magnet Permanen

Model	M-100
Daya Nominal	100 W
Daya Maks	110 W
Kecepatan Nominal	750 rpm
Tegangan Nominal	12 V
Torsi Awal	0.1 Nm
Torsi Nominal	1.7 Nm

Berikut ini adalah uraian proses dan hasil pengujian yang dilakukan pada model sistem PLTAL. Sebelum melakukan pengujian, agar peralatan terhindar dari masalah seperti arus lebih dan tegangan lebih yang dapat menyebabkan panas berlebih dan kerusakan, maka dilakukan perhitungan awal terhadap spesifikasi masing-masing komponen pada Model sistem ini. Setelah tahap ini, dilanjutkan dengan pengujian pertama, yaitu pengujian tanpa beban. Dari pengujian ini akan dilihat apakah putaran turbin dapat ditransmisikan dengan baik ke poros generator. Juga untuk melihat apakah putaran generator lebih besar dari putaran poros turbin sesuai dengan yang direncanakan. Pada pengujian kedua, generator akan dibebani dengan lampu pijar, secara bertahap untuk melihat perubahan tegangan, daya, dan juga kecepatan putar generator.

Perhitungan daya motor induksi 3 fasa dan variable speed drive (simulator turbin) diperlukan untuk mengetahui besarnya torsi yang dapat dihasilkan sesuai

dengan kapasitas daya motor. Dengan kapasitas 1,5 kW dan kecepatan nominal 1400 rpm. Maka besarnya torsi beban penuh dapat dihitung dengan rumus persamaan 3.1 . Dengan rumus di atas, torsi motor beban penuh dapat dihitung dan didapatkan hasilnya sebesar 9.55 Nm.

Dan jika faktor efisiensi motor diperhitungkan, yang tertera pada *nameplate* motor sebesar 0.785, maka didapatkan torsi beban penuh sebesar 7.5 Nm. Sedangkan untuk generator, dari Tabel 3.2 di atas dapat diketahui bahwa torsi nominal untuk mendapatkan daya nominal dibutuhkan torsi sebesar 1,7 Nm, maka beberapa nilai torsi bisa diberikan pada generator. Pada pengaturan torsi menggunakan VSD, input pengaturannya adalah % dari torsi beban penuh, kemudian dihitung dan diukur melalui torsimeter, yang hasilnya dapat dilihat pada Tabel 3.3 sebagai berikut.

Tabel 3. 3 Hasil Pengaturan Torsi untuk Pengujian

No.	Seting Simulator (%)	Hasil Perhitungan Torsi (Nm)	Torsi Hasil Pengukuran (Nm)
1	5%	0.37	0.30
2	10%	0.74	0.70
3	15%	1.12	1.10
4	20%	1.49	1.50
5	25%	1.86	1.80

Dari Tabel 3.3 di atas, dapat dilihat bahwa hasil perhitungan dan pengukuran torsi relatif tidak terlalu jauh berbeda. Menurut manual, pengaturan VSD dapat dilakukan hingga maksimal 400%, namun pada pengujian penambahan torsi sekitar 25% sesuai dengan kebutuhan torsi untuk generator.

3.6 Metode Implementasi Kontrol TSR pada Sistem dengan Transmisi

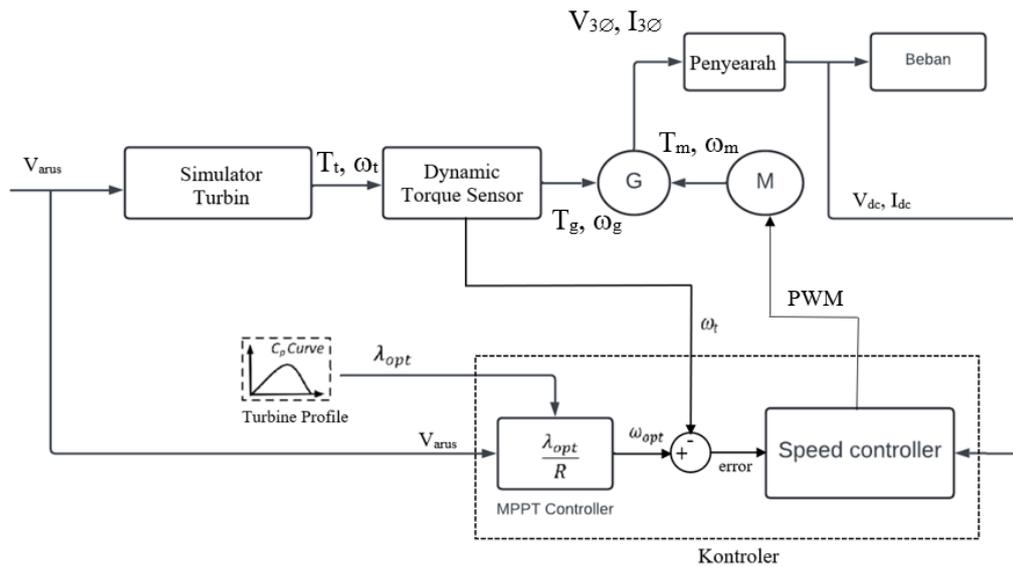
Mekanik

Pada penelitian ini, dilakukan beberapa tahapan, yaitu

- a. Membangun model uji yang terdiri dari simulator turbin, dynamic torque meter, generator PMSG, motor dc bantu, beban resistif dan kontroler
- b. Membangun turbine profile sebagai referensi untuk input dan output simulator turbin

- c. Menguji kinerja sistem untuk beberapa kondisi kecepatan arus
- d. Menguji sistem dengan perubahan beban untuk melihat perubahan nilai TSR dan C_p
- e. Menguji optimasi kontrol TSR dengan motor bantu

Pada penelitian ini dibangun sebuah model fisik yang diri dari simulator turbin, sebuah dynamic torque meter yang dipasang satu poros dengan simulator turbin dan generator, kemudian sebuah generator, sebuah motor listrik yang dihubungkan satu poros dengan generator, dan beban resistif murni yang dihubungkan ke generator PMSG melalui sebuah rectifier. Pada sistem ini diasumsikan simulator turbin mewakili turbin dan gearbox. Generator yang digunakan pada model ini memiliki spesifikasi daya 100W, 12V, tiga fasa dan putaran nominal sebesar 750 rpm. Gambar 3.6 di bawah menunjukkan diagram skematik model yang dibangun dalam riset ini. Sebuah *freewheeling coupling* (kopling satu arah) dipasang sebagai *shaft coupling* antara dynamic torque meter dan generator. Tujuannya adalah agar hanya turbin yang mempengaruhi secara langsung putaran generator dan tidak sebaliknya.



Gambar 3. 6 Diagram Blok Sistem Kontrol TSR dengan Motor Bantu

Pada tahap ini, dibuat sebuah profil karakteristik turbin arus laut yang terdiri dari beberapa parameter yang umumnya terdapat pada turbin arus laut. Umumnya karakteristik ini tergambar dari spesifikasi turbin dan kurva karakteristik yang disediakan oleh tidal turbine manufacturer. Berikut ini adalah contoh beberapa data spesifikasi turbine arus laut dari beberapa fabrikasi. Kurva-kurva tersebut biasa disebut dengan kurva operasional turbin.

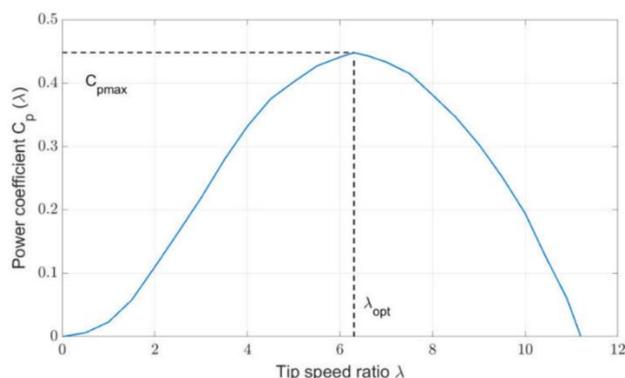
Pada Penelitian ini, model yang digunakan untuk simulator turbin adalah motor listrik AC yang dilengkapi dengan kontrol penggerak yang mendukung pengaturan torsi dengan kapasitas daya hanya sebesar 1.5 kW dan generator sebesar 100 W, maka pengujian dilakukan dengan skala 1:50 terhadap daya yang sebenarnya. Sedangkan gearbox ratio yang digunakan sebesar 1:5.

Di bawah ini adalah Tabel 3.4 spesifikasi turbin yang digunakan dalam perhitungan dalam membangun turbine profile

Tabel 3. 4 Spesifikasi Turbin

No.	Parameter	Ukuran	Satuan
1	Jari-jari turbin (R)	1	m
2	Massa jenis air laut (ρ)	1025	Kg/m ³
3	Kecepatan arus rated (V_{rated})	2	m/s
4	Daya rated (P_{rated})	5000	Watt
5	Kecepatan putar rated (ω_{rated})	12	Rad/s

Untuk bisa berfungsi layaknya turbin arus laut, maka simulator turbin mesti diset sedemikian rupa agar bisa menghasilkan torsi yang menggambarkan perubahan kecepatan arus laut. Untuk itu pada riset ini dibuat sebuah profil turbin berupa data kurva Power Coefficient (C_p) dan Tips Speed Ratio (TSR). Kurva ini diambil dari kurva tipikal sebuah turbin arus laut. Misalnya seperti ditunjukkan pada Gambar 3.7 di bawah.



Gambar 3. 7 Kurva Turbin Arus Laut Tipikal (3 Blade Horizontal Axis Turbine)

Dalam kondisi ideal, maka $C_p = C_{p_{max}}$ dan TSR atau $\lambda = \lambda_{opt}$. Dari Gambar 3.7 di atas, misal didapatkan nilai $C_{p_{max}} = 0.45$ dan $\lambda_{opt} = 6.3$, maka selanjutnya dapat dieksplorasi lebih lanjut karakteristik turbin arus laut di atas, untuk setiap kecepatan arus yang terjadi.

Dari kurva di atas, maka untuk mendapatkan nilai-nilai dalam kurva, maka di sini dilakukan pendekatan *plot digitizer*, untuk mengekstrak data dari kurva. Dengan memasukkan bentuk kurva, nilai min dan max, dan beberapa adjustment points, maka bisa didapatkan data dengan kerapatan yang diinginkan. Tabel 3.5 berikut ini adalah hasil dari *plot digitizer* tersebut.

Tabel 3. 5 Nilai Cp-TSR Dari Ekstraksi Data Kurva Menggunakan Plot digitizer

No.	TSR	Cp
1	0.010	0.000
2	0.694	0.011
3	1.183	0.035
4	1.751	0.083
5	2.308	0.144
6	2.710	0.186
7	3.332	0.259
8	3.864	0.317
9	5.068	0.408
10	6.286	0.448
11	6.776	0.439
12	7.771	0.398
13	8.444	0.351
14	9.046	0.297
15	9.574	0.243
16	10.079	0.182
17	10.631	0.097
18	11.189	0.010

Sementara itu TSR didefinisikan sebagai

$$\lambda = \frac{\omega \cdot R}{v} \quad (4.3)$$

Dari kurva karakteristik turbin di atas dan rumus TSR, maka bisa dibuat kurva daya sebagai fungsi kecepatan putar, untuk setiap nilai kecepatan arus.

Pada penelitian ini, akan dihitung dan diplot nilai daya turbin sebagai fungsi kecepatan putar poros untuk beberapa nilai kecepatan arus. Tabel 3.6 menampilkan sampel kecepatan arus yang diambil dari data kecepatan arus.

Tabel 3. 6 Sampel Kecepatan Arus Laut

No.	Value (m/s)
1	0.7
2	0.9
3	1.6
4	2
5	3

Dalam upaya untuk mengoptimalkan sistem konversi energi arus laut, pengaturan kecepatan poros generator sangat penting untuk mencapai Tip Speed Ratio (TSR) yang optimal. TSR optimal memungkinkan sistem untuk mencapai koefisien daya (C_p) maksimum, yang pada gilirannya memaksimalkan daya yang dihasilkan oleh turbin. Salah satu metode yang efektif untuk mencapai hal ini adalah dengan menggunakan motor listrik DC yang dikendalikan oleh kontroler berbasis Arduino dengan *Pulse Width Modulation* (PWM). Teknik kontrol ini dikenal sebagai algoritma kontrol berbasis TSR menggunakan PWM. Sub bab ini menjelaskan desain dan implementasi kontroler pengatur kecepatan motor DC dalam rangka mengatur TSR pada sistem PLTAL.

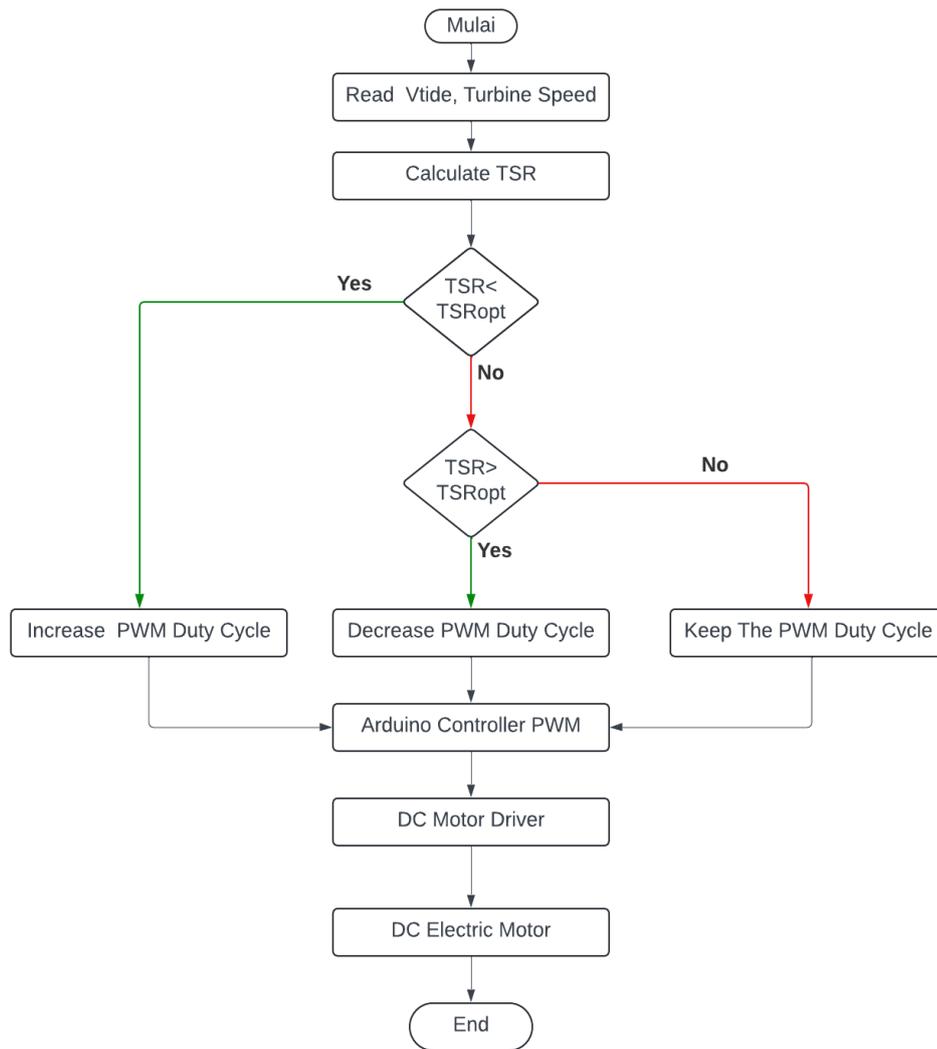
Pengaturan TSR yang efektif memerlukan pengukuran dan penyesuaian terus-menerus terhadap kecepatan rotasi poros generator. Pada penelitian ini, kontroler pengatur kecepatan motor DC dirancang untuk mengendalikan TSR dengan memberikan torsi tambahan pada poros generator melalui motor listrik DC. Kontroler ini menggunakan Arduino sebagai platform pemrosesan utama dan PWM

sebagai metode kontrol untuk mengatur kecepatan motor DC. Sistem kontrol ini bekerja dengan mengukur kecepatan rotasi turbin menggunakan sensor kecepatan. Data kecepatan ini kemudian digunakan untuk menghitung nilai TSR. Gambar 3.8 menjelaskan bagaimana algoritma kontrol TSR bekerja.

Nilai TSR yang dihitung kemudian dibandingkan dengan nilai TSR optimal yang telah ditentukan sebelumnya. Berdasarkan perbandingan ini, kontroler akan menyesuaikan duty cycle PWM yang dikirimkan ke driver motor DC. Jika TSR lebih rendah dari nilai optimal, duty cycle akan ditingkatkan untuk menambah kecepatan motor, dan sebaliknya, jika TSR lebih tinggi dari nilai optimal, duty cycle akan diturunkan untuk mengurangi kecepatan motor. Dengan demikian, kontroler ini mampu mempertahankan TSR pada nilai optimal meskipun terjadi perubahan beban atau kondisi arus laut.

Implementasi kontroler ini melibatkan beberapa komponen kunci, termasuk sensor kecepatan turbin, Arduino untuk pemrosesan data dan kontrol PWM, driver motor DC, dan motor listrik DC itu sendiri. Rangkaian ini memastikan bahwa kecepatan poros generator dapat diatur secara dinamis untuk mempertahankan kinerja optimal sistem PLTAL.

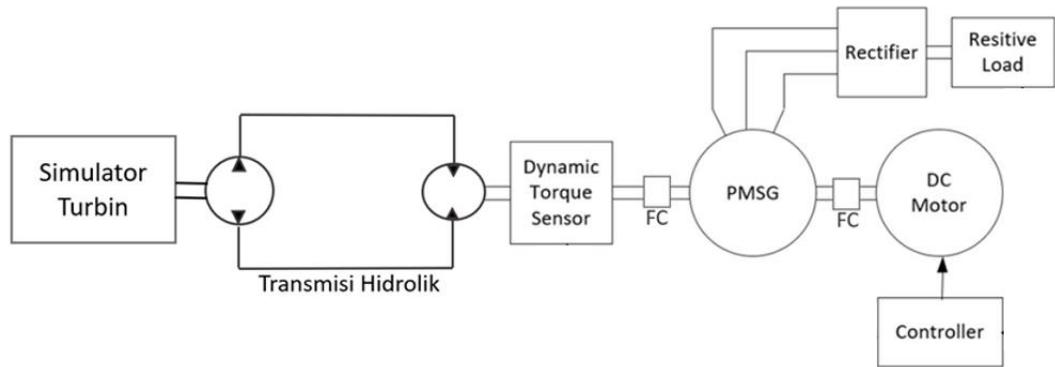
Dengan menggunakan kontroler pengatur kecepatan motor DC ini, penelitian ini berhasil menunjukkan peningkatan efisiensi sistem PLTAL melalui pengaturan TSR yang lebih presisi dan responsif. Hasilnya tidak hanya meningkatkan daya yang dihasilkan oleh sistem tetapi juga memperpanjang umur komponen mekanis dengan mengurangi keausan yang disebabkan oleh fluktuasi kecepatan yang tidak diinginkan.



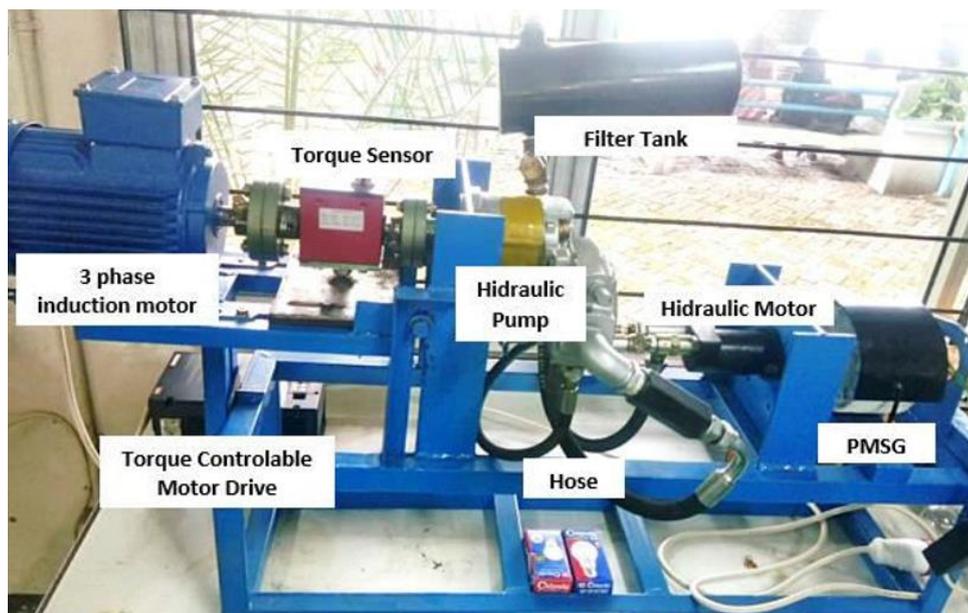
Gambar 3. 8 Flowchart Kontroler Pengatur Kecepatan Motor Bantu

3.7 Metode Implementasi Kontrol TSR pada Sistem dengan Transmisi Hidrolik

Berikut ini adalah gambaran umum model sistem konversi eEnergi arus laut. Beberapa komponen membentuk model sistem pembangkit listrik tenaga arus laut, seperti yang ditunjukkan pada diagram blok gambar 3.9 dan Gambar 3.10 sebagai gambaran keseluruhan sistem.



Gambar 3. 9 Diagram Blok Model PLTAL dengan Sistem Transmisi Hidrolik



Gambar 3. 10 Susunan Keseluruhan Model Sistem Pembangkit Arus Laut

Dalam percobaan ini, motor listrik menggantikan turbin atau turbin diarahkan (turbin dengan gearbox tambahan). Motor penggerak harus dapat meniru torsi dan kecepatan rotasi turbin. Penggerak kecepatan variabel (VSD) digunakan dalam percobaan ini untuk memungkinkan pengaturan kecepatan dan torsi independen dari motor listrik AC 3 fase yang menghasilkan masing-masing 2 tenaga kuda.

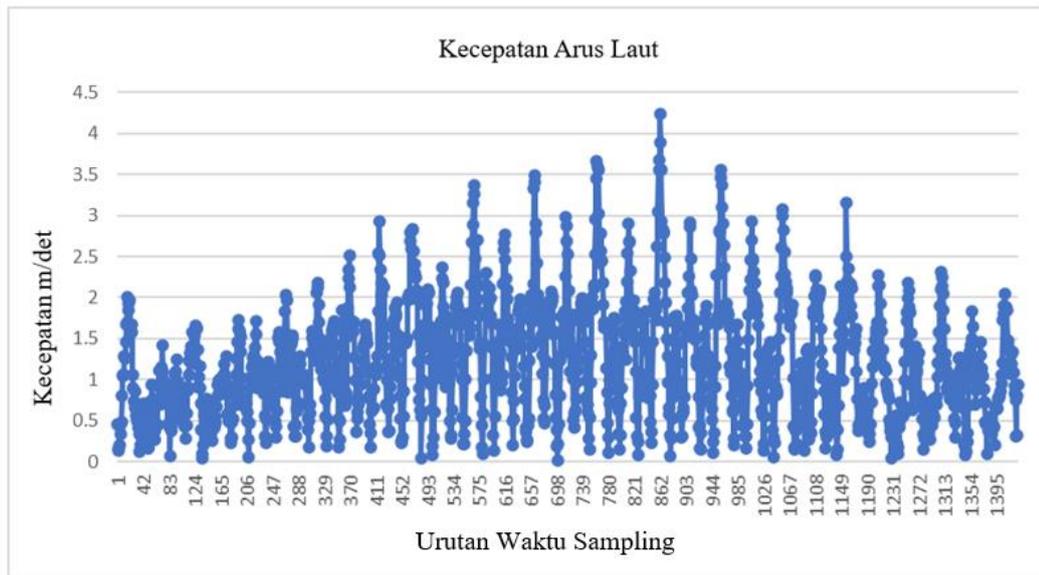
Turbin arus laut umumnya berputar pada kecepatan rendah 10-30 rpm. Untuk memenuhi kecepatan yang dibutuhkan oleh generator pada umumnya, diperlukan gearbox hingga tiga tahap untuk turbin angin skala utilitas (Engineering, n.d.). Pada penelitian ini diasumsikan sistem menggunakan gearbox (geared turbine) sedemikian rupa sehingga putarannya adalah kecepatan unit turbin. Pada

penelitian ini digunakan motor dan inverter untuk mendapatkan putaran turbin yang sebenarnya, yang dapat menghasilkan putaran dan torsi yang diinginkan. Torsi dan kecepatan putaran dari setiap kecepatan arus dihitung berdasarkan spesifikasi turbin dan kurva karakteristik yang ada.

Dalam investigasi ini, Transmisi Hidrostatik (HST) digunakan. Di sini, putaran turbin ditransfer ke generator. Sebuah pompa hidrolis dan motor disertakan dalam sistem ini, serta katup pelepas dan katup periksa. Kecepatan poros turbin atau pompa hidraulik dirancang tiga kali lebih cepat dari putaran motor hidraulik.

Model ini menggunakan generator jenis sinkron magnet permanen. Sebuah motor listrik ditempatkan pada satu poros dengan generator. Motor ini membantu generator berputar ketika diperlukan. Sebuah kopleng *freewheel* dipasang antara generator dan motor hidrolis untuk mencegah gangguan langsung pada siklus fluida dalam sistem transmisi hidrolis. Dengan demikian, putaran motor bantu hanya mempengaruhi putaran poros penggerak utama dengan mengurangi beban mekanis pada generator. Pengontrol mengatur kapan dan seberapa cepat motor berputar. Pengontrol mengatur putaran motor berdasarkan pembacaan sensor yang dipasang di sistem.

Bagian berikut ini menjelaskan profil turbin arus laut dalam penelitian ini. Bagian terpenting dari sistem ini adalah simulator turbin. Simulator ini harus dapat mensimulasikan pergerakan turbin akibat aliran arus laut, yang menghasilkan torsi dan kecepatan putar tertentu. Kurva daya dan data spesifikasi turbin dari pabrik pembuatnya, serta pengujian turbin, keduanya dapat memberikan informasi tentang karakteristik daya turbin. Kurva daya dapat berupa kurva daya terhadap arus atau kurva koefisien daya. Percobaan ini membuat beberapa asumsi yang berkaitan dengan data turbin dan parameter yang digunakan dalam simulator turbin.



Gambar 3. 11 Hasil Pengukuran Arus laut

Percobaan ini menggunakan data tipikal kecepatan arus di Indonesia. Gambar 3.11 menunjukkan salah satu hasil pengukuran langsung kecepatan arus di salah satu selat di Indonesia yaitu Selat Kepa. Data ini merupakan data rata-rata tiap 15 menit dan diukur selama 15 hari. Namun, dalam percobaan ini, hanya beberapa nilai yang digunakan untuk mewakili distribusi data simulator turbin dan rentang kapasitas motor. Sampel nilai kecepatan arus yang digunakan dalam pengujian dan pengukuran tercantum dalam Tabel 3.7.

Tabel 3. 7 Sampel Arus laut yang Digunakan Dalam Pengujian

No Tes	Kecepatan Arus (m/s)
1	0.87
2	1.28
3	1.52
4	1.75
5	1.91
6	2.05
7	2.19
8	2.45

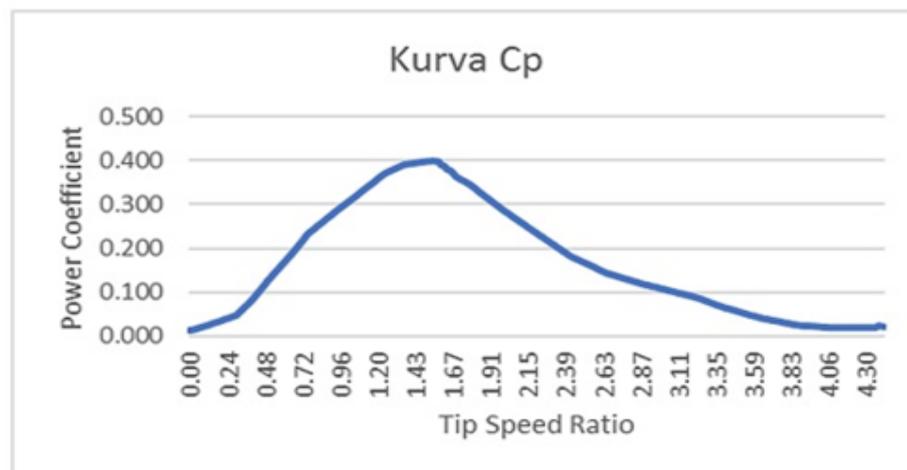
Dalam studi eksperimental ini, diasumsikan bahwa sistem memiliki data spesifikasi teknis, seperti yang tercantum dalam Tabel 3.8. Jari-jari turbin sangat kecil karena penyesuaian daya pengenal hanya 180 W. Kecepatan arus pengenal

adalah kecepatan arus yang menghasilkan daya berdasarkan kapasitas maksimum generator. Kecepatan arus laut yang lebih dari kecepatan arus pengenal menghasilkan daya maksimum yang sama dengan daya pengenal. Kecepatan cut-in adalah kecepatan minimum arus laut yang diperlukan untuk menghasilkan daya. C_p maksimum menunjukkan efisiensi turbin maksimum.

Tabel 3. 8 Spesifikasi Turbin Arus Laut

Parameter	Ukuran
Jari-jari turbin	14 cm
Kecepatan Arus Terukur	2,2 m/s
Kecepatan rotasi terukur	20 rad/s
Nilai Daya	180 W
C_p maks	0.4
Kecepatan Cut-in	0,87 m/s

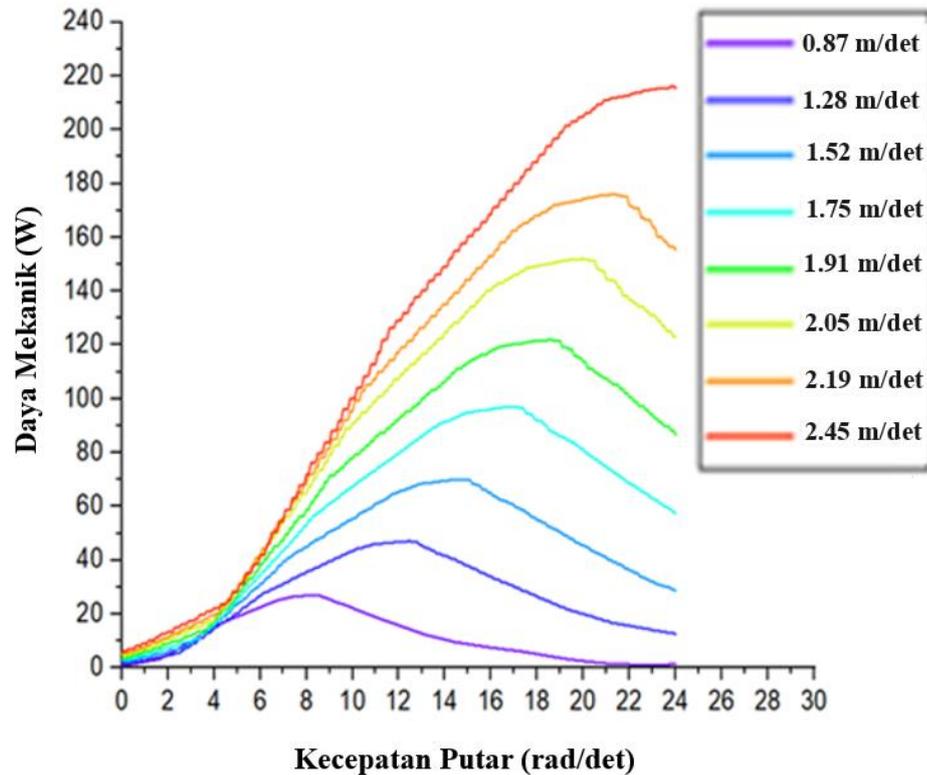
Langkah selanjutnya adalah membuat kurva koefisien daya dari turbin arus laut. Berdasarkan data dan spesifikasi di atas, kurva koefisien daya dihasilkan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.12.



Gambar 3. 12 Kurva C_p Turbin yang Disimulasikan

Dari kurva-kurva di atas dapat diturunkan kurva turunannya, yang akan digunakan sebagai acuan dalam percobaan ini. Yang pertama adalah kurva daya sebagai fungsi kecepatan putar untuk setiap kecepatan arus laut. Kurva ini dapat dibuat dengan memplotkan nilai ω untuk setiap nilai kecepatan arus sehingga diperoleh setiap nilai TSR. Dan dari kurva C_p pada Gambar 3.12, dapat diplot

besarnya nilai daya untuk setiap kecepatan putar. Dari perhitungan ini dapat diperoleh kurva daya seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.13 .



Gambar 3. 13 Kurva Daya sebagai Fungsi dari Kecepatan Putaran Poros Turbin untuk Setiap Kecepatan Arus

Dengan menurunkan kurva daya pada Gambar 3.12 dan 3.13 kurva daya dapat diturunkan sebagai fungsi dari kecepatan putar poros turbin. Terakhir adalah kurva torsi sebagai fungsi kecepatan arus, yang dapat diperoleh dari persamaan bahwa daya adalah hasil kali antara torsi dan kecepatan putar.

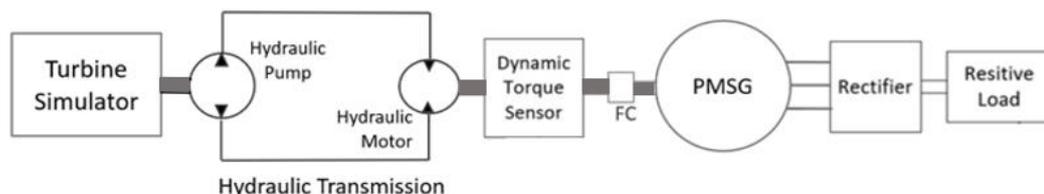
Berikutnya adalah pembahasan terkait langkah-langkah eksperimen. Percobaan dilakukan dalam dua mode. Yang pertama adalah sistem dijalankan dalam kondisi apa adanya. Dan yang kedua sistem kembali dibebani dengan beban yang sama dengan asumsi bahwa sistem mengalami kondisi tidak optimal, yang ditandai dengan nilai TSR di bawah nilai optimalnya. Nilai-nilai tersebut terdapat pada library program pada kontroler berbasis Arduino Mega 2560 yang dibangun untuk mengatur motor bantu.

Percobaan ini dilakukan menurut langkah-langkah berikut ini:

- a. Nilai-nilai dalam kurva dikonversi ke dalam Tabel. untuk digunakan sebagai nilai input dan referensi dalam percobaan ini. Oleh karena itu, metode pencarian Tabel. digunakan dalam penelitian ini.
- b. Untuk setiap nilai arus laut dalam percobaan ini, simulator turbin menghasilkan torsi dan kecepatan putar tertentu.
- c. Sensor torsi menangkap nilai rpm torsi, yang terjadi (turun karena beban), dan daya yang dihasilkan oleh putaran turbin.
- d. Selanjutnya, pengontrol memeriksa apakah daya yang dihasilkan sudah optimal. Jika tidak, pengontrol menggerakkan motor bantu untuk membantu memutar poros generator pada kecepatan tertentu, yang secara langsung mempengaruhi putaran turbin.
- e. Meningkatkan putaran turbin akan meningkatkan daya yang dihasilkan oleh turbin sesuai dengan kurva pada Gambar 3.13, yang berarti juga meningkatkan nilai C_p .
- f. Penambahan daya ini mendorong poros turbin berputar lebih cepat, yang mempengaruhi daya yang dibutuhkan oleh motor bantu.

3.8 Metode Pengujian Sistem Transmisi Hidrolik

Pada penelitian ini dibangun sebuah model sistem transmisi hidrolik untuk sistem konversi energi arus laut. Model ini terdiri dari beberapa bagian, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.14 di bawah ini.



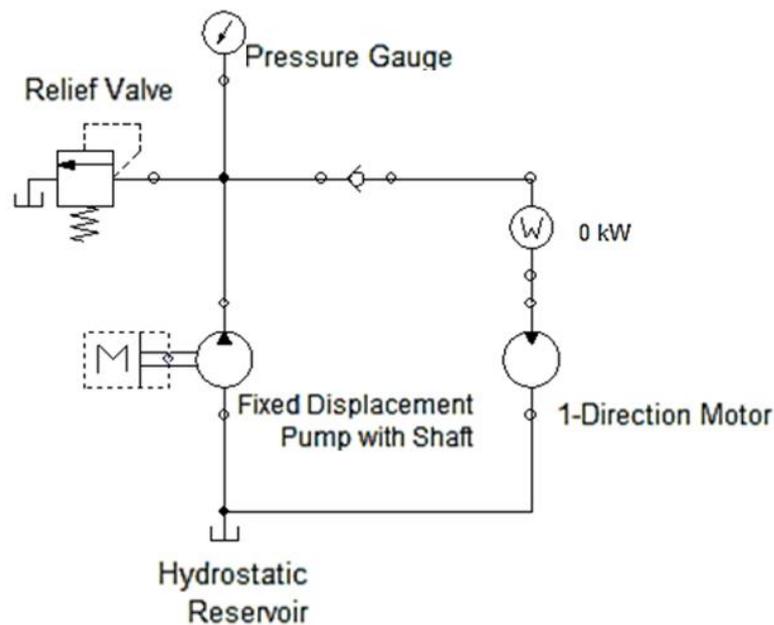
Gambar 3. 14 Diagram Blok Sistem Transmisi Hidrolik pada Model Pengujian

Bagian pertama adalah simulator turbin arus laut. Bagian utama dari

perangkat ini adalah motor AC tiga fase dengan kapasitas 1,5 kW yang dilengkapi dengan penggerak motor yang memiliki fitur pengaturan torsi. Pengaturan torsi ditetapkan sebagai persentase dari torsi pengenal. Pada pengujian ini, pengaturan yang diberikan adalah 50%, 75%, 100% dan 125% dari torsi terukur. Dari hasil pengukuran, torsi yang dihasilkan oleh simulator adalah 3,9 Nm, 5,9 Nm, 7,3 Nm dan 9,6 Nm. Hasil ini tidak jauh berbeda dengan perhitungan manual.

Bagian kedua adalah transmisi hidraulik yang terdiri dari pompa hidraulik dan motor hidraulik serta perangkat pendukungnya. Secara skematis, bagian ini ditunjukkan pada Gambar 3.15.

Turbin arus laut umumnya berputar pada kecepatan rendah 10-30 rpm. Untuk memenuhi kecepatan yang dibutuhkan oleh generator pada umumnya, diperlukan hingga tiga tahap gearbox pada turbin angin skala utilitas (Engineering, n.d.). Dalam studi ini, diasumsikan bahwa sistem menggunakan gearbox satu tahap dengan rasio 1:10, yang merupakan rasio yang umum di pasaran.



Gambar 3. 15 Skema Sistem Transmisi Hidraulik

Putaran motor hidrolik pada bagian ini dirancang agar lebih besar dari sekitar tiga

kali kecepatan turbin atau poros pompa. Spesifikasi sistem transmisi hidraulik ini ditunjukkan pada Tabel 3.9 di bawah ini.

Tabel 3. 9 Parameter Sistem Transmisi Hidraulik

Description	Symbol	Value	Units
Displacement of Pump	Dp	50	cm ³
Displacement of Motor	Dm	20	cm ³
Oil Tank Capacity	Vt	5	litre

Bagian ketiga adalah generator sinkron magnet permanen (PMSG). Kapasitas generator ini adalah 0,6 kW pada putaran nominal 700 rpm.

Selanjutnya, bagian pendukung termasuk sensor kuantitas mekanis yaitu torsi, kecepatan dan daya mekanis. Sensor-sensor ini ditempatkan pada poros simulator dan pompa hidrolis. Selain itu, kopel freewheeling juga ditambahkan di antara motor hidrolis dan generator. Dengan adanya komponen ini diharapkan pengaturan kecepatan generator dengan berbagai teknik yang dikembangkan lebih lanjut tidak akan mempengaruhi sirkulasi fluida pada sistem transmisi hidrolis.

Pengujian dalam percobaan ini dilakukan dalam 3 tahap. Tahap pertama adalah pengujian tanpa beban listrik. Yang kedua adalah pengujian dengan generator berbeban. Terakhir, kita dapat memeriksa input-output sistem transmisi secara langsung.

Pengujian tanpa beban adalah pengujian dalam kondisi di mana generator tidak dibebani. Pada pengujian ini, motor penggerak (simulator turbin) diputar pada frekuensi 10 Hz atau 300 rpm, karena tidak terhubung dengan beban mekanisnya. Pada sistem pembangkit listrik yang sebenarnya, dapat diartikan bahwa kecepatan turbin telah dipercepat oleh gearbox (*geared turbine*). Kecepatan ini merupakan kecepatan putar minimum, dimana diperkirakan sistem transmisi hidrolis memiliki tekanan yang cukup untuk menghasilkan aliran. Aliran ini kemudian mengalir untuk menghasilkan torsi yang cukup kuat pada motor hidrolis.

Pada pengujian dengan generator berbeban, hal ini dilakukan untuk mendapatkan daya keluaran generator. Dalam percobaan ini, beban resistif murni diukur dengan menggunakan Wattmeter.

Pengujian ketiga dilakukan dengan mengukur output motor hidrolik secara langsung dengan menempatkan posisi sensor kuantitas mekanis pada poros motor hidrolik. Pengukuran dilakukan dengan memberikan torsi yang berlawanan melalui proses pengereman. Hal ini dilakukan dengan memperhitungkan nilai torsi yang hanya akan muncul ketika ada beban mekanis pada poros yang diukur.

Bab 4

Hasil dan Pembahasan

Untuk menyelesaikan tujuan penelitian, dimana terdapat tiga tujuan maka dilakukan beberapa tahapan studi. Bab ini membahas tahapan-tahapan tersebut untuk mencapai setiap tujuan penelitian yang telah disampaikan pada Bab 1. Berikut ini adalah outline pembahasan dalam bab ini. Tujuan pertama yakni membangun model fisik yang telah dilakukan ditandai dengan adanya pengujian bagian-bagian penting dari model yaitu simulator turbin dan generator PMSG yang digunakan. Pengujian dan hasilnya disajikan dalam 2 sub bab awal. Sub bab berikutnya disajikan untuk menjawab tujuan penelitian kedua, yaitu menerapkan kontrol TSR untuk sistem dengan transmisi mekanik. Sedangkan 2 sub bab terakhir digunakan untuk menjawab tujuan penelitian ketiga yaitu menerapkan optimasi pengaturan TSR untuk meningkatkan daya turbin pada sistem PLTAL dengan transmisi hidrolik menggunakan bantuan motor listrik. Tabel 4.1 mengilustrasikan outline pembahasan dalam bab ini.

Tabel 4. 1 Outline Pembahasan Bab 4

No.	Tujuan Penelitian	Letak Pembahasan
1.	Membangun model fisik dan menguji sistem konversi energi arus laut, yang terdiri atas simulator turbin, sistem transmisi (hidrolik dan mekanik), serta generator untuk keperluan studi optimasi berbasis <i>Tip Sped Ratio (TSR)</i> untuk meningkatkan koefisien daya pembangkitan.	4.1 Pengujian Simulator Turbin Arus Laut 4.2 Analisa Kinerja Generator pada Sistem Konversi Energi Arus Laut
2	Menerapkan optimasi pengaturan TSR untuk meningkatkan daya turbin pada sistem PLTAL dengan transmisi mekanik menggunakan bantuan motor listrik	4.3 Kontrol Optimasi Berbasis TSR dengan Motor-Bantu pada Sistem dengan Transmisi Mekanik
3.	Menerapkan optimasi pengaturan TSR untuk meningkatkan daya turbin pada sistem PLTAL dengan transmisi hidrolik menggunakan bantuan motor listrik	4.4 Kontrol Optimasi Berbasis TSR dengan Motor-Bantu pada Sistem dengan Transmisi Hidrolik 4.5 Pengujian Transmisi Hidrolik pada Sistem Konversi Energi Arus Laut

4.1 Pengujian Simulator Turbin Arus Laut

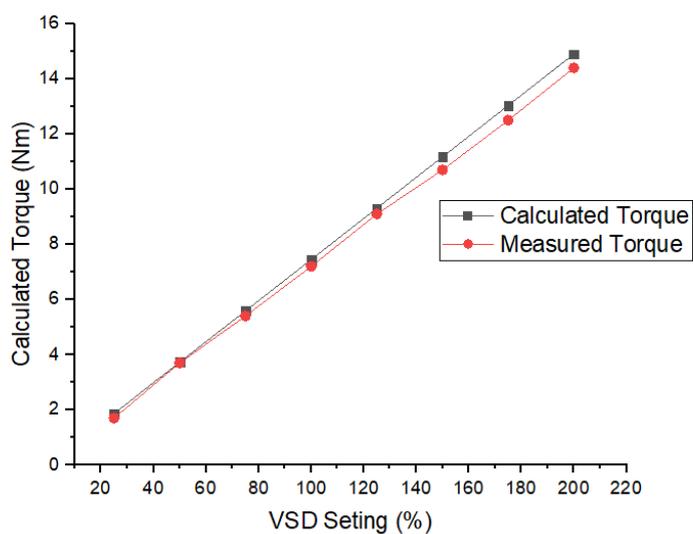
4.1.1 Hasil Pengujian

Tabel 4.2 di bawah ini merangkum hasil pengaturan dan juga pengukuran langsung dari besaran mekanis output simulator dan output daya listrik dari generator. Kolom % Torsi menampilkan nilai persentase dari torsi terukur generator. Nilai ini dimasukkan ke VSD. Hasil perhitungan persentase ini ditampilkan pada kolom berikutnya. Tiga kolom berikutnya adalah hasil pengukuran yang dihasilkan oleh sensor torsi dinamis. Dan kolom terakhir adalah daya listrik yang dihasilkan generator yang diukur dari alat ukur berupa watt-meter.

Tabel 4. 2 Hasil Pengaturan Torsi Dan Hasil Pengukuran

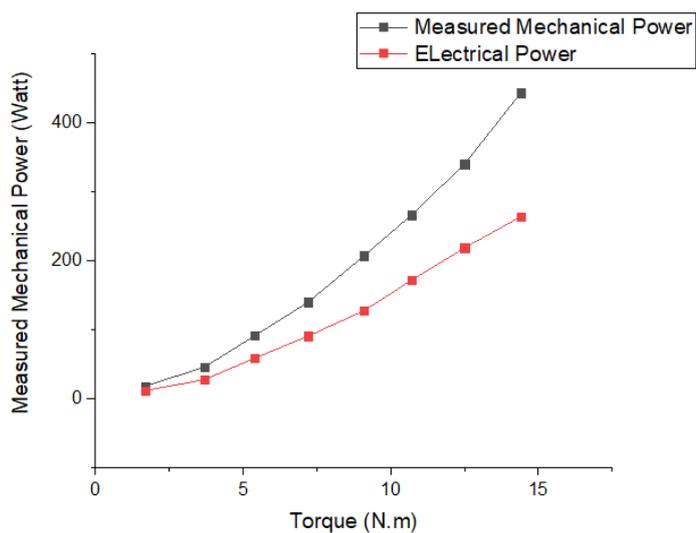
No	Perhitungan dan Pengaturan		Nilai Sensor Torsi			Daya Listrik (W)
	% Torsi	Nm	Torsi (Nm)	Daya (Watt)	Kecepatan (RPM)	
1	25	1.86	1.7	18.5	104	12
2	50	3.72	3.7	46.5	120	28
3	75	5.59	5.4	91.6	162	59
4	100	7.45	7.2	140.2	186	91
5	125	9.31	9.1	207.7	218	128
6	150	11.17	10.7	266.6	238	172
7	175	13.04	12.5	340.3	260	219
8	200	13.90	13.4	443.3	294	264

Untuk menjelaskan seberapa besar perbedaan antara hasil perhitungan dan pengaturan simulator dengan hasil pengukuran sensor torsi dinamis, di bawah ini adalah gambar 4.1 yaitu grafik torsi perhitungan dan torsi terukur. Tampak bahwa kedua grafik tersebut hampir berdekatan.



Gambar 4. 1 Grafik Torsi dari Hasil Perhitungan dan Pengukuran

Sementara itu, untuk melihat hasil akhir daya listrik yang dihasilkan, di bawah ini ditampilkan grafik daya mekanik dan daya listrik yang dihasilkan oleh simulator turbin dan generator. Hal ini seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.2 dibawah ini.



Gambar 4. 2 Grafik Daya Mekanik dan Daya Listrik

4.1.2 Diskusi

Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi keefektifan motor listrik induksi AC 3 fase, yang didukung oleh Variable Speed Drive (VSD) dengan

teknologi kontrol vektor, dalam mensimulasikan beban mekanis dinamis yang dialami oleh turbin arus laut. Temuan menunjukkan bahwa pengaturan simulator turbin ini dapat secara efektif meniru variasi torsi yang terkait dengan arus laut yang berbeda-beda, yang sangat penting untuk simulasi realistis sistem konversi energi arus laut. Berikut beberapa poin penting terkait hasil pengujian simulator turbin ini:

1. **Pengaturan Torsi:** Salah satu temuan mendasar adalah kemampuan motor untuk mensimulasikan torsi yang diinginkan melalui pengaturan VSD yang tepat. Kemampuan ini memungkinkan penyesuaian beban mekanis dalam lingkungan yang terkendali, meniru kondisi operasional turbin arus laut. Data eksperimental menunjukkan korelasi yang tinggi antara pengaturan VSD dan output torsi yang diukur, mengindikasikan kontrol yang efektif dan kemampuan simulasi yang akurat.
2. **Pengaturan dan Efisiensi Termal:** Eksperimen menyoroti batasan kritis mengenai manajemen termal. Ketika pengaturan output torsi melebihi 200% dari kapasitas pengenalan, motor menunjukkan pembentukan panas yang signifikan. Meskipun model teoretis mendukung output torsi hingga 400%, batasan praktis seperti efek termal dan kehilangan efisiensi pada pengaturan torsi yang lebih tinggi harus dipertimbangkan. Temuan ini sangat penting untuk merancang simulator turbin arus laut yang lebih kuat dan andal.
3. **Kerugian dan Efisiensi:** Penggunaan sensor torsi dinamis memberikan wawasan tentang total kerugian sistem, termasuk kerugian mekanis, elektrik, dan konversi. Kerugian meningkat seiring dengan output torsi yang lebih tinggi, yang sejalan dengan pengamatan termal yang dicatat. Kerugian ini signifikan karena mempengaruhi efisiensi keseluruhan proses konversi energi dalam sistem energi arus laut.

Penelitian ini mengidentifikasi beberapa celah dalam literatur yang ada. Studi sebelumnya lebih banyak berfokus pada penggunaan simulator untuk turbin angin, sementara penelitian yang serupa untuk turbin arus laut masih terbatas. Meskipun prinsip kerja keduanya hampir sama, perbedaan besar dalam kerapatan energi akibat perbedaan kerapatan air dan udara, serta kecepatan arus dan rentang

perubahan, menghasilkan torsi yang jauh lebih besar pada turbin arus laut. Oleh karena itu, studi mengenai besaran mekanis seperti torsi dalam konteks turbin arus laut harus mendapat perhatian lebih.

Penelitian ini menawarkan kebaruan berupa fokus pada variasi torsi yang dapat dihasilkan oleh motor dan VSD untuk mensimulasikan torsi dinamis turbin arus laut memberikan kontribusi baru dalam bidang ini. Dengan mengukur variasi torsi menggunakan sensor torsi dan mengkonversinya melalui generator menjadi daya listrik yang terukur, penelitian ini memberikan data konkret yang dapat digunakan untuk optimasi lebih lanjut.

4.2 Analisa Kinerja Generator pada Sistem Konversi Energi Arus Laut

4.2.1 Hasil Pengujian

Berikut ini adalah hasil pengujian generator yang diputar dengan beberapa nilai torsi yang mewakili rentang input torsi pada generator. Hasil pengujian ditunjukkan oleh Tabel 4.3. Dari tabel terlihat bahwa kecepatan poros generator yang sesuai seting simulator sebesar 750 rpm, terlihat memunculkan tegangan pada terminal generator. Torsi pada sensor torsi tampak kecil sebesar 0.1 Nm dan tanpa ada perubahan. Hal ini dikarenakan torsimeter membutuhkan torsi lawan agar nilai torsinya keluar. Karena beban nol, maka torsi lawan sangatlah kecil sehingga hanya memunculkan 0.1 Nm. Sementara nilai arus daya elektrik bernilai nol karena tidak adanya arus yang mengalir ke beban.

Tabel 4. 3 Hasil Pengujian Generator Tanpa Beban

No.	Seting Torsi (Nm)	Besaran Mekanis			Besaran Elektrik		
		Torsi (Nm)	Kecepatan Putar (rpm)	Daya (Watt)	Tegangan (Volt)	Arus (Ampere)	Daya (Watt)
1	0.37	0.1	701	7.34	12.9	0	0
2	0.74	0.1	708	7.41	13.2	0	0
3	1.12	0.1	722	7.56	13.8	0	0
4	1.49	0.1	754	7.89	14.2	0	0
5	1.86	0.1	769	8.05	14.5	0	0

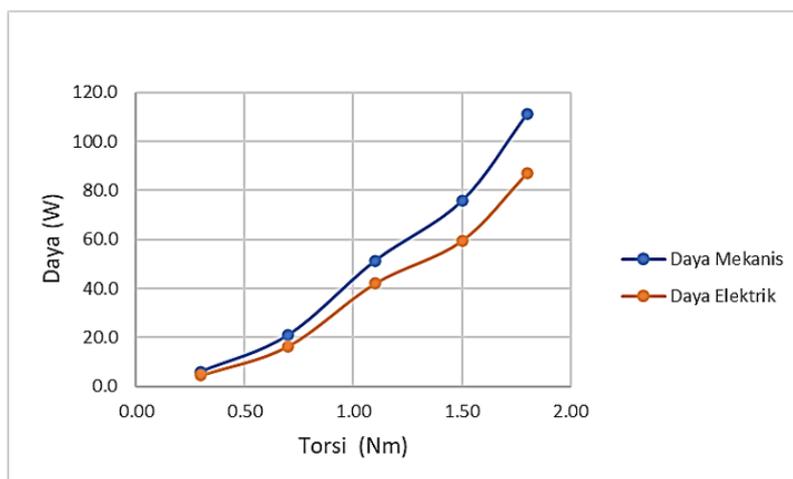
Pada pengujian generator berbeban, didapatkan hasil pengujian seperti ditunjukkan Tabel 4.4 di bawah ini. Setelah dibebani tampak bahwa nilai kecepatan

poros generator langsung turun. Torsimeter menunjukkan nilai torsi seiring dengan munculnya torsi lawan akibat adanya beban pada generator. Demikian juga dengan besaran elektrik, yang telah memunculkan arus dan daya yang terbaca pada alat ukur daya listrik.

Tabel 4. 4 Hasil Pengujian Generator Berbeban

No.	Seting Torsi	Besaran Mekanis			Besaran Elektrik		
		Torsi (Nm)	Kecepatan Putar (rpm)	Daya (Watt)	Tegangan (Volt)	Arus (Ampere)	Daya (Watt)
1	0.37	0.30	190	6.0	4.1	1.1	4.5
2	0.74	0.70	285	20.9	5.6	2.9	16.4
3	1.12	1.10	445	51.3	8.6	4.9	42.0
4	1.49	1.50	482	75.7	8.9	6.7	59.4
5	1.86	1.80	590	111.2	11.4	7.6	87.0

Dan bila digambarkan pada grafik, seperti pada Gambar 4.5 maka besarnya daya mekanis yang masuk ke poros generator dan daya elektrik yang keluar dari generator maka terjadi perbedaan akibat adanya efisiensi generator. Artinya daya yang masuk ke dalam generator tidak semua diubah menjadi daya listrik, namun sebagian berubah menjadi rugi-rugi mekanis maupun magnetis.



Gambar 4. 3 Grafik Daya Mekanis dan Daya Listrik

4.2.2 Diskusi

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja generator sinkron magnet permanen (PMSG) dalam sistem konversi energi arus laut, yang melibatkan pengujian tanpa beban dan dengan beban pada model sistem pembangkit listrik tenaga arus laut. Hasil pengujian menunjukkan bahwa PMSG memiliki kinerja yang memadai baik dalam kondisi tanpa beban maupun berbeban, dengan torsi dan kecepatan yang sesuai dengan parameter desain.

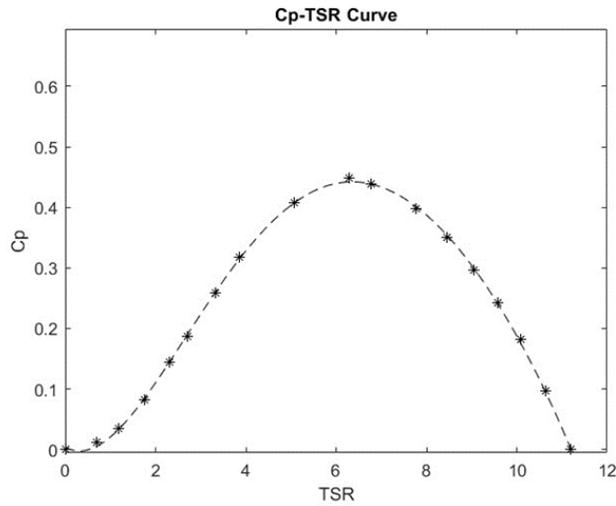
Penggunaan teknologi *Field Oriented Control* (FOC) pada Variable Speed Drive (VSD) untuk menghasilkan torsi tertentu dan bagaimana melakukan seting pada VSD juga belum banyak dieksplorasi dalam literatur. Teknologi FOC ini sangat cocok untuk menggambarkan operasi turbin arus laut, karena memungkinkan kontrol torsi yang lebih presisi dan efisien dalam berbagai kondisi operasi.

Dan temuan penting dari pengujian ini adalah bahwa kombinasi simulator turbin dengan pengaturan torsi dan generator jenis PMSG telah menggambarkan kondisi yang mirip dengan hubungan turbin dan generator terkait saturasi daya. Ketika beban generator naik maka tidak serta merta daya naik, akibat tarikan daya yang lebih besar oleh motor listrik pada simulator. Yang terjadi adalah daya turun akibat batasan torsi yang telah diseting menyesuaikan dengan kecepatan arus yang diterima oleh turbin.

4.3 Kontrol Optimasi Berbasis TSR dengan Motor-Bantu pada Sistem dengan Transmisi Mekanik

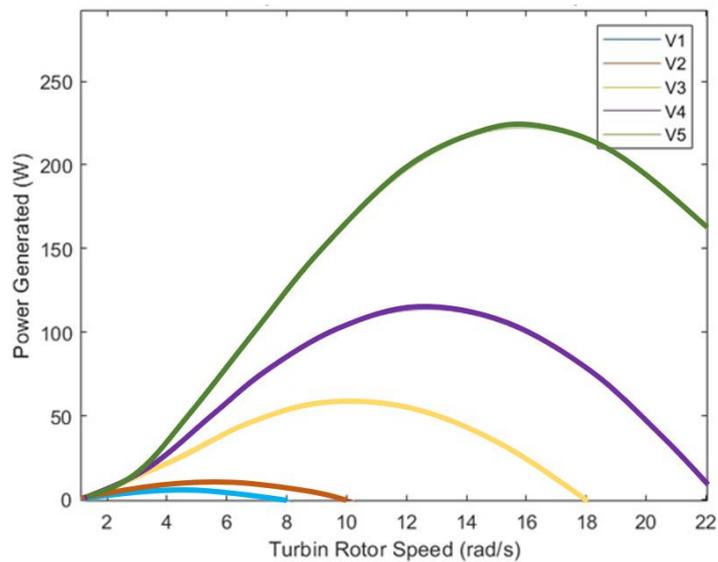
4.3.1 Hasil Pengujian

Berikut ini adalah turbine profile yang dibangun dari typical power curve sebuah turbin arus laut. Yang pertama adalah kurva C_p -TSR yang dibuat dengan pendekatan *plot digitizer* seperti ditampilkan pada Gambar 4.4. Selanjutnya dari kurva ini nantinya nilai C_p bisa didapatkan dari nilai TSR yang didapat. Caranya adalah dengan menghitung C_p melalui sebuah fungsi polinomial yang didapat dari kurva tersebut. Penggunaan fungsi polinomial ini digunakan untuk membentuk table lookup yang digunakan oleh kontroler untuk mengatur kecepatan motor bantu dalam kontrol TSR optimal.

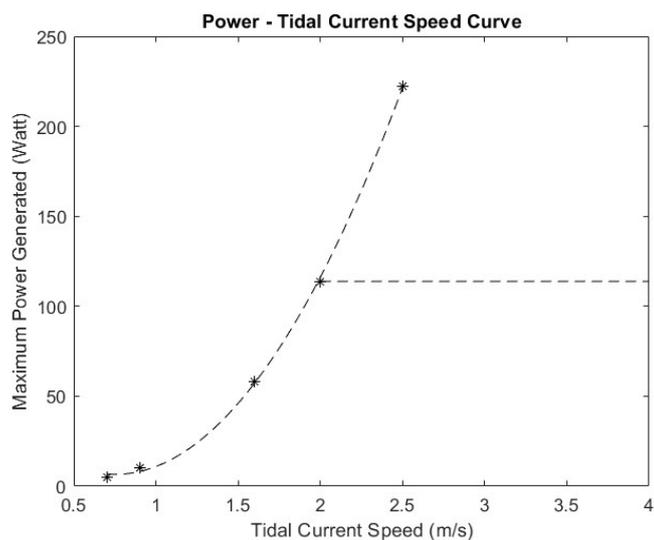


Gambar 4. 4 Kurva Cp-TSR

Dari kurva Cp-TSR, maka berikutnya dapat diturunkan kurva Daya-Kecepatan poros untuk tiap kecepatan arus laut yang sudah ditetapkan, seperti yang ditunjukkan Gambar 4.5. Titik-titik daya maksimum untuk tiap kecepatan arus, dapat dihubungkan dan membentuk dengan apa yang biasanya disebut dengan operational power curve Kurva ini ditunjukkan pada Gambar 4.6. Dari kurva operasional inilah pengaturan TSR optimal dilakukan.



Gambar 4. 5 Grafik Daya – Kecepatan Poros untuk tiap kecepatan arus



Gambar 4. 6 Kurva Daya Operasional

Pada pengujian ini simulator turbin diset untuk menghasilkan torsi dan kecepatan sesuai dengan perhitungan daya yang dihasilkan oleh kecepatan arus tertentu yang telah ditetapkan. Sedangkan daya turbin yang dihasilkan adalah dalam kondisi optimum, yaitu TSR optimal sebesar 6.3 dan C_p maksimum sebesar 0.45. Dan Kecepatan putar poros optimal yang semuanya diperoleh dari kurva-kurva pada turbine profile. Dan hasilnya didapatkan seperti ditunjukkan pada Tabel 4.5.

Nilai yang terukur tampak berbeda. Hal ini dikarenakan alat sensor torsi membutuhkan torsi lawan atau untuk bisa menunjukkan nilai, sehingga simulator harus dibebani sedemikian rupa sehingga akan muncul torsi lawan dan sensor menunjukkan nilainya.

Tabel 4. 5 Hasil Pengujian Pada Kondisi Optimum Dimana TSR Sekitar 6.3

No.	Vtide	Measured Mechanical Parameter			Calculated Value	
		Torque (Nm)	Speed (rpm)	Power (W)	TSR	C_p
1	0.7	0.2	208	4	6.22	0.445
2	0.9	0.3	267	8	6.21	0.444
3	1.6	1.0	479	50	6.27	0.448
4	2	1.6	597	100	6.25	0.447
5	3	2.9	789	240	6.12	0.441

Pengujian berikutnya adalah pengujian dengan beban. Tabel 4.6 menampilkan hasil pengujian itu. Dengan adanya beban ini maka, timbul torsi beban yang lebih besar, dan hal ini akan mengurangi kecepatan putar. Pada kondisi ini maka nilai TSR turun atau bergeser ke kanan. Dari TSR yang turun ini maka, bila dicari nilai Cp dari kurva Cp-TSR di atas maka di dapatkan penurunan nilai Cp yang cukup signifikan untuk kecepatan arus yang rendah. Sementara itu pada kecepatan arus yang lebih tinggi maka penurunan Cp tidak sebesar pada kecepatan yang rendah.

Tabel 4. 6 Hasil Pengujian Pada Kondisi Dimana Generator Dibebani

No.	V	Measured Mechanical Parameter			Calculated Value		Measured Electrical Power (W)
		Torque (Nm)	Speed (rpm)	Power (W)	TSR	Cp	
1	0.7	0.2	137	3	4.10	0.31	2.2
2	0.9	0.3	189	6	4.40	0.35	4.5
3	1.6	1.0	402	42	5.26	0.37	32.8
4	2	1.6	513	86	5.37	0.38	66.0
5	3	2.9	694	211	5.38	0.39	78.2

Pengujian berikutnya adalah optimasi yang dilakukan dengan pengaturan TSR melalui pemberian tambahan kecepatan untuk mencapai kecepatan poros optimal. Kontroler dengan input kecepatan arus, akan menjadikan kecepatan putar poros optimal dari turbine profile di atas, dan menjaganya konstan sampai kecepatan arus berubah. Tabel 4.7 menunjukkan dengan cara seperti ini maka hasilnya sistem bisa mendekati kembali kondisi optimumnya. Dan bila dinyatakan dengan persentase maka, peningkatan yang terjadi sebelum dan sesudah dioptimasi maka terjadi peningkatan sebesar 33,4%.

Tabel 4. 7 Hasil Optimasi Dengan Motor Bantu

No.	V	Measured Mechanical Parameter			Calculated		Measured Electrical Power (W)
		Torque (Nm)	Speed (rpm)	Power (W)	TSR	Cp	
1	0.7	0.2	210	4	6.28	0.443	3.4
2	0.9	0.3	271	9	6.31	0.445	6.5
3	1.6	1	481	50	6.30	0.447	39.2
4	2	1.6	602	101	6.30	0.447	78.7
5	3	2.9	793	241	6.15	0.440	101.0

4.3.2 Diskusi

Salah satu kesenjangan penelitian yang diidentifikasi adalah kurangnya eksplorasi teknik kontrol TSR yang spesifik untuk turbin arus laut, sementara sebagian besar studi sebelumnya lebih fokus pada sistem energi angin (Li dkk., 2014; Gorban dkk., 2001). Dalam penelitian ini, penggunaan motor bantu yang diletakkan satu poros dengan generator memungkinkan kontrol kecepatan putar poros yang lebih tepat dan responsif dibandingkan metode berbasis sensor atau metode tanpa sensor yang umumnya digunakan pada sistem energi angin (Munteanu dkk., 2008). Penggunaan kopling satu arah memastikan bahwa hanya turbin yang mempengaruhi langsung putaran generator, meningkatkan efisiensi transmisi daya dan mengurangi keausan pada komponen mekanis.

Penelitian ini juga menjawab gap dalam hal pembuatan dan implementasi profil turbin arus laut. Sebelumnya, penelitian yang mendetail tentang bagaimana profil turbin arus laut dibuat dan diimplementasikan pada model fisik masih terbatas. Dengan mengembangkan kurva C_p -TSR melalui pendekatan plot digitizer, penelitian ini memberikan panduan yang lebih akurat untuk optimasi TSR pada berbagai kondisi arus laut. Kurva ini digunakan untuk mengatur kecepatan motor bantu sehingga sistem dapat beroperasi pada kondisi optimal, mencapai nilai C_p maksimum pada TSR optimal.

Selain itu, pengujian pada berbagai kondisi kecepatan arus memberikan wawasan baru tentang perubahan nilai TSR dan power coefficient (C_p). Hasil pengujian menunjukkan bahwa penurunan TSR akibat pembebanan dapat dioptimalkan kembali dengan pengaturan kecepatan poros menggunakan motor bantu, mendekati kondisi optimum seperti yang ditunjukkan pada hasil pengujian.

Terkait dengan daya yang dikonsumsi oleh motor listrik selama proses optimasi maka dalam hal ini tidak dihitung karena diasumsikan beberapa hal, antara lain:

1. Fokus pada Optimasi TSR dan Koefisien Daya (C_p):

- Dalam praktek di lapangan sistem PLTAL tidak berdiri sendiri namun merupakan sistem on-grid dimana PLTAL bukan sebagai pemikul beban dasar.

- Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan Tip Speed Ratio (TSR) untuk meningkatkan koefisien daya (C_p) turbin. Fokus utamanya adalah pada peningkatan efisiensi konversi energi arus laut oleh turbin itu sendiri.
- Dengan mengoptimalkan TSR, tujuan utama adalah untuk memastikan bahwa turbin beroperasi pada kondisi yang mendekati optimum, yang secara teoritis akan meningkatkan output daya turbin.

2. Konsep dan Tujuan Penggunaan Motor Bantu:

- Motor bantu digunakan sebagai alat untuk mencapai optimasi TSR dengan memberikan torsi eksternal yang diperlukan untuk mencapai kecepatan putar turbin optimum.
- Dalam konteks ini, motor bantu dianggap sebagai bagian dari sistem kontrol yang tugas utamanya adalah mengatur kondisi operasi turbin, bukan sebagai komponen yang kontributif terhadap output daya langsung.

Pertimbangan Daya yang Diserap Motor Bantu

1. Efisiensi Keseluruhan Sistem:

- Dalam aplikasi praktis, penting untuk memperhitungkan efisiensi keseluruhan sistem, termasuk daya yang diserap oleh motor bantu.
- Efisiensi sistem dapat dihitung dengan membandingkan daya keluaran total dari sistem dengan total daya yang dikonsumsi, termasuk daya yang diserap oleh motor bantu.

2. Evaluasi Kinerja Motor Bantu:

- Perlu dilakukan analisis lebih lanjut untuk memastikan bahwa daya yang diserap oleh motor bantu tidak melebihi peningkatan daya yang dihasilkan oleh turbin.

Jika daya yang diserap lebih besar, ini menunjukkan bahwa sistem tidak efisien, dan perlu dilakukan optimasi lebih lanjut atau mempertimbangkan penggunaan teknologi atau metode alternatif.

Sementara itu terkait implementasi teknik ini, konsep optimasi kontrol Tip-Speed Ratio (TSR) untuk mendapatkan koefisien daya (C_p) maksimum memang

dapat diterapkan baik pada turbin angin poros horizontal (HAWT) maupun poros vertikal (VAWT), meskipun ada perbedaan dalam karakteristik operasional kedua jenis turbin ini.

Pada dasarnya, tujuan dari kontrol TSR adalah menjaga kecepatan putar turbin pada nilai optimal di mana C_p mencapai puncaknya. Ini melibatkan penyesuaian kecepatan putar turbin berdasarkan kecepatan angin yang terdeteksi. Namun, HAWT dan VAWT memiliki kurva C_p -TSR yang berbeda, yang berarti nilai TSR optimal untuk masing-masing jenis turbin berbeda. HAWT biasanya memiliki TSR optimal lebih tinggi (sekitar 6-12) dibandingkan dengan VAWT (sekitar 2-6).

4.4 Kontrol Optimasi Berbasis TSR dengan Motor-Bantu pada Sistem Dengan Transmisi Hidrolik

4.4.1 Hasil Pengujian

Pengujian tahap pertama ini merupakan pengujian saat sistem dibebani dan menunjukkan kondisi dimana koefisien daya berada pada kondisi belum maksimal. Hasilnya seperti ditampilkan dalam Tabel 4.8 di bawah ini. Tentang daya listrik yang dibangkitkan jauh lebih kecil dari daya mekanis, maka seperti telah dijabarkan pada bab sebelumnya bahwa efisiensi yang rendah dari sistem transmisi hidrolik dan juga generator sebagai penyebab dari rendahnya daya listrik yang dibangkitkan.

Tabel 4.8 Hasil Pengujian tanpa kontrol optimasi

V_{tide} (m/s)	Kekuatan Mekanis			Daya Listrik
	Daya (W)	Kecepatan Rotasi (rpm)	Torsi (Nm)	(W)
0.87	27	80	3.2	1.4
1.28	47	117	3.9	3.3
1.52	70	139	4.8	7.2
1.75	97	160	5.9	11.4
1.91	122	175	6.7	16.8
2.05	152	188	7.3	23.5
2.19	176	201	8.4	31.2
2.45	216	225	9.6	40.1

Sementara itu pada pengujian berikutnya, dilakukan pengaturan TSR sesuai dengan

nilai kecepatan poros optimal atau TSR optimal dari data turbine profile yang sebelumnya dibuat. Hasilnya seperti ditampilkan pada Tabel 4.9 di bawah ini.

Tabel 4. 9 Hasil pengujian dengan kontrol optimasi

Varus (m/s)	Kekuatan Mekanis			Daya Listrik yang Dibangkitkan
	Daya (W)	Kecepatan Rotasi (rpm)	Torsi (Nm)	(W)
0.87	31	93	3.2	1.7
1.28	55	137	3.9	3.8
1.52	85	165	4.8	8.5
1.75	116	190	5.9	14.2
1.91	147	206	6.7	20.1
2.05	184	223	7.3	28
2.19	180	239	8.4	34
2.45	180	265	9.6	34

Hasil ini menunjukkan bahwa terjadi peningkatan daya pada sistem pembangkitan dengan adanya putaran motor bantu, yang mengarahkan kecepatan poros turbin mendekati kecepatan putar optimal untuk mendapatkan nilai Cp yang maksimal, dengan mengacu pada parameter yang telah dibuat pada profil turbin sebelumnya.

Tabel 4. 10 Daya Listrik yang Dihasilkan

Kecepatan Arus Laut (m/s)	Sebelum Dioptimalkan (W)	Setelah Dioptimalkan (W)	Perubahan (%)
0.87	1.4	1.7	21.43
1.28	3.3	3.8	15.15
1.52	7.2	8.5	18.06
1.75	11.4	14.2	24.56
1.91	16.8	20.1	19.64
2.05	23.5	28	19.15
2.19	32	34	6.25
2.45	32	34	6.25

Ketika diukur dengan jumlah daya mekanis yang mampu dihasilkan oleh turbin, nilai listrik yang dihasilkan tampaknya cukup rendah. Alasannya adalah efisiensi sistem transmisi dan generator yang kurang bagus. Penjelasan lain yang mungkin adalah efektivitas sistem transmisi hidraulik, yang membutuhkan jumlah putaran yang cukup besar untuk menghasilkan jumlah tekanan yang memadai

untuk menghasilkan torsi yang signifikan pada motor hidraulik. Tabel 4.10 di atas menunjukkan hasil setelah kontrol optimasi dilakukan dengan menggunakan motor bantu.

Terlepas dari masalah-masalah tersebut, temuan ini menunjukkan bahwa penggunaan motor bantu dapat efektif dalam mempertahankan nilai TSR yang optimal pada turbin angin, bahkan dalam kondisi angin yang bervariasi. Penelitian ini menyajikan bukti empiris tentang potensi untuk meningkatkan efisiensi sistem pembangkit listrik tenaga angin melalui pendekatan kontrol TSR dengan motor bantu. Dari tabel 4.10 didapatkan peningkatan daya naik rata-rata sebesar 16.3%.

Temuan dari penelitian ini diharapkan dapat berimplikasi pada pengembangan sistem pembangkit listrik tenaga arus laut. Model eksperimental dapat digunakan sebagai platform untuk pengembangan algoritma kontrol optimasi secara real time baik yang berbasis TSR maupun yang berbasis strategi lain dengan memanfaatkan keberadaan simulator torsi, daya dan kecepatan serta sensor-sensor dalam suatu model yang terintegrasi.

Namun demikian, penelitian ini memiliki keterbatasan dan memerlukan penyempurnaan, termasuk studi khusus terkait sistem transmisi, pemilihan generator yang lebih efisien dan juga pemilihan motor untuk kontrol.

4.4.2 Diskusi

Hasil eksperimen dan analisis menunjukkan bahwa penerapan konsep kontrol TSR (*Tip Speed Ratio*) optimal dengan bantuan motor pada turbin angin dapat memberikan manfaat dalam meningkatkan koefisiensi daya turbin pada konversi energi arus laut. Penelitian ini berhasil mengisi kesenjangan dalam literatur terkait penggunaan motor bantu untuk mengendalikan TSR pada turbin angin.

Kesenjangan penelitian (research gap) yang diisi oleh studi ini terletak pada kurangnya eksplorasi mengenai pengendalian TSR menggunakan motor bantu, khususnya pada turbin arus laut. Sebagian besar penelitian sebelumnya berfokus pada pengaturan beban elektronik melalui konverter daya untuk mencapai optimasi. Pendekatan pengiriman torsi langsung yang digunakan dalam penelitian ini merupakan inovasi yang belum banyak dieksplorasi dalam literatur.

Penemuan ini memiliki implikasi penting dalam pengembangan sistem pembangkit listrik tenaga arus laut. Penggunaan motor tambahan sebagai pengendali eksternal memungkinkan turbin untuk tetap beroperasi pada titik TSR yang optimal, sehingga meningkatkan produksi energi listrik secara signifikan. Hal ini menunjukkan potensi besar dalam peningkatan efisiensi sistem pembangkit listrik tenaga arus laut.

Kebaruan dari penelitian ini adalah penggunaan pendekatan *Motor Generator Pair* (MGP) yang diadaptasi untuk optimasi daya dengan pengaturan TSR. Pendekatan ini tidak hanya menawarkan peningkatan efisiensi tetapi juga memberikan dasar untuk pengembangan algoritma kontrol optimasi real-time yang lebih canggih di masa depan. Temuan ini memberikan dasar penting untuk penelitian lebih lanjut dalam pengembangan sistem pembangkit listrik tenaga arus laut yang lebih efisien dan berkelanjutan.

Namun, penelitian ini juga memiliki keterbatasan yang perlu diperhatikan dalam studi-studi selanjutnya. Keterbatasan tersebut termasuk studi khusus terkait sistem transmisi, pemilihan generator yang lebih efisien, dan pemilihan motor untuk kontrol. Penelitian lanjutan diperlukan untuk menyempurnakan model ini dan meningkatkan efektivitas serta efisiensi sistem pembangkit listrik tenaga arus laut. Alasan tentang mengapa daya motor bantu tidak dihitung telah dijelaskan pada sub bab sebelumnya.

4.5 Pengujian Transmisi Hidrolik pada Sistem Konversi Energi Arus Laut

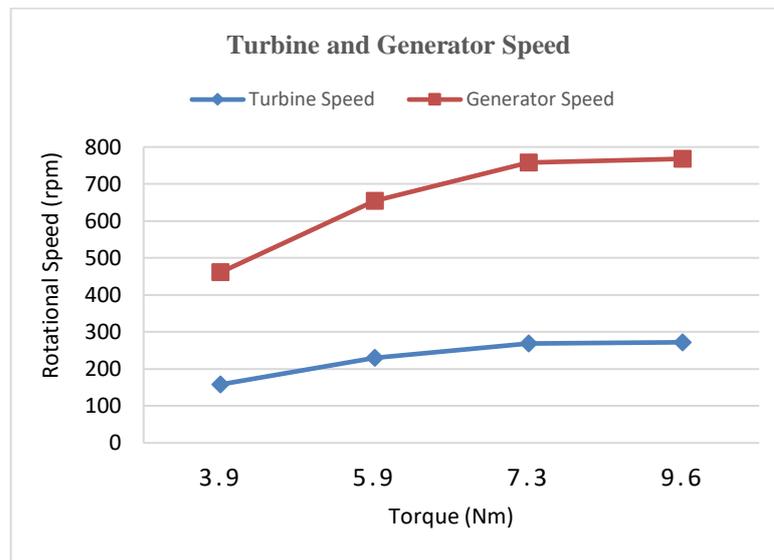
4.5.1 Hasil Pengujian

Pengujian tanpa beban menghasilkan data seperti yang ditunjukkan pada tabel 4.11. Pengujian ini dimaksudkan untuk melihat kinerja sistem transmisi hidrolik dalam mentransmisikan putaran turbin menuju generator. Fokus perhatian ditujukan ke kecepatan turbin, kecepatan generator dan tegangan keluaran generator.

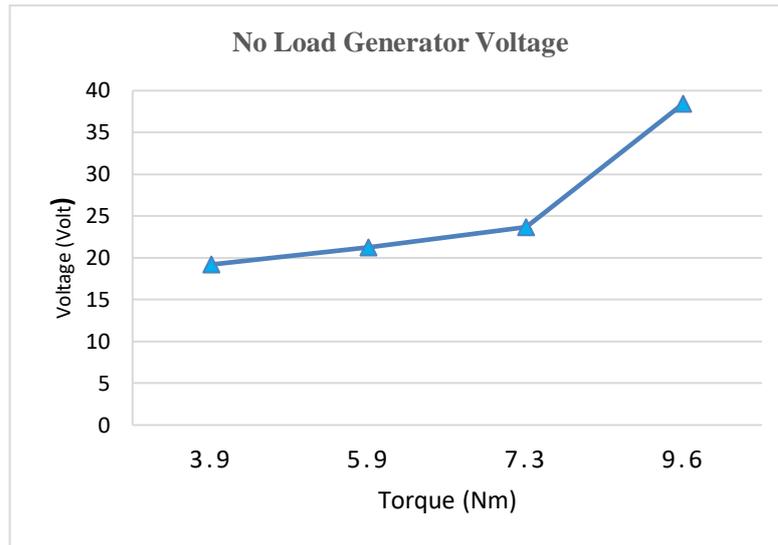
Tabel 4. 11 Pengujian tanpa beban

No.	Torsi (N.m)	Kecepatan Turbin (RPM)	Kecepatan Generator (RPM)	Tegangan (V)
1	7.9	158	461	19.2
2	5.9	230	654	21.26
3	7.3	272	768	27.7
4	9.6	268	758	38.46

Pada pengujian pertama ini, di mana generator tidak dibebani, dapat dilihat bahwa kecepatan putar poros turbin sebanding dengan torsi yang diberikan. Gambar 4.9 menunjukkan kecepatan sebagai fungsi torsi. Dan kecepatan poros generator lebih besar rata-rata 2,85 kali kecepatan poros turbin. Dan tingkat tegangan output generator meningkat dengan meningkatnya kecepatan seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.10



Gambar 4. 7 Kecepatan rotasi dan hubungan torsi



Gambar 4. 8 Tegangan Terminal Generator Dan Hubungan Torsi

Pengujian dengan generator berbeban ditunjukkan pada tabel 4.12. Hasil ini menunjukkan bahwa terjadi penurunan kecepatan putar, baik pada sisi poros turbin maupun pada sisi poros generator, rata-rata hanya sekitar 25%. Namun daya listrik yang dihasilkan sangat kecil dibandingkan dengan daya mekanik yang dihasilkan oleh turbin, yaitu rata-rata hanya 12%. Kecilnya nilai efisiensi pada pengujian ini dapat disebabkan oleh rendahnya efisiensi sistem transmisi atau efisiensi generator. Untuk itu dilakukan pengujian ketiga.

Tabel 4. 12 Hasil Pengujian dengan Generator yang dibebani

No.	Pengukuran Mekanis			Kecepatan Generator (RPM)	Daya Keluaran (W)
	Torsi (Nm)	Daya Input (W)	Kecepatan Pompa (RPM)		
1	7.9	46	117	391	4.4
2	5.9	94	156	408	10.7
3	7.3	175	215	474	21.9
4	9.6	213	212	527	29.3

Pengujian ketiga dilakukan dengan mengukur secara langsung hubungan antara daya mekanik input dan daya mekanik output. Hasil yang diperoleh seperti yang ditunjukkan pada tabel 4.13

Tabel 4. 13 Hasil Pengujian Sistem Transmisi Hidrolik

No.	Torsi (Nm)	Daya Input (W)	Daya Keluaran (W)	Efisiensi (%)
1	7.9	65	11.9	18
2	5.9	139	31.4	23
3	7.3	207	50.9	25
4	9.6	269	67.2	24

Dan tabel 4.13 menyajikan hasil di mana bila dirata-ratakan, efisiensi dalam mengukur input-output sistem transmisi hidrolik adalah 22%.

4.5.4 Diskusi

Hasil dari pengujian tiga tahap pada prototipe sistem transmisi hidrolik untuk konversi energi arus laut memberikan wawasan mengenai performa dan efisiensi sistem tersebut. Penelitian ini menunjukkan bahwa sistem transmisi hidrolik dapat digunakan untuk memisahkan komponen yang terendam dan yang berada di atas permukaan laut. Transmisi melalui selang hidrolik berhasil mentransfer daya dari turbin ke generator, dan rasio gearbox efektif yang dicapai adalah 1:2,8.

Namun, beberapa kekurangan dan tantangan teknis terlihat dalam hasil pengujian ini. Efisiensi rata-rata sistem transmisi hidrolik yang dicapai hanya sekitar 22%, yang cukup rendah dibandingkan dengan efisiensi sistem transmisi lain seperti gearbox konvensional. Faktor-faktor yang mungkin menyebabkan rendahnya efisiensi termasuk ketidaktepatan kesejajaran poros, keausan internal pada pompa hidrolik, kebocoran pada pengaturan katup, dan kualitas viskositas oli hidrolik. Pengujian lebih menyeluruh diperlukan untuk menemukan faktor-faktor yang menyebabkan rendahnya efisiensi ini. Misalnya, meskipun beberapa penelitian menunjukkan bahwa efisiensi peralatan hidrolik, terutama pompa hidrolik, pada kecepatan rendah dapat mencapai lebih dari 60%, hasil pengujian dalam penelitian ini belum mencapainya.

Penelitian ini juga mengidentifikasi beberapa celah dalam literatur yang ada. Meskipun transmisi hidrolik telah diaplikasikan dalam sistem turbin angin, penelitian komprehensif mengenai aplikasinya dalam sistem turbin arus laut masih

sangat terbatas. Terutama, efisiensi yang lebih rendah dibandingkan dengan sistem gearbox menunjukkan perlunya penelitian lebih lanjut dalam mengoptimalkan desain dan konfigurasi sistem transmisi hidraulik guna meningkatkan efisiensi dan keandalan, serta mengurangi potensi kebocoran dan masalah perawatan. Selain itu, kurangnya penelitian yang mendetail mengenai pengaruh kualitas dan viskositas oli hidrolis serta material komponen terhadap performa sistem transmisi hidraulik dalam kondisi operasional yang bervariasi juga merupakan area yang perlu dieksplorasi lebih lanjut.

Namun demikian, penelitian ini juga menawarkan beberapa kebaruan yang signifikan. Ini adalah salah satu yang pertama menguji kinerja sistem transmisi hidraulik pada konversi energi arus laut dengan menggunakan pompa roda gigi, yang umumnya menggunakan pompa piston dengan variable displacement. Selain itu, penggunaan pendekatan eksperimental dengan simulator turbin motor listrik AC tiga fasa yang memiliki fitur pengaturan torsi untuk menguji kinerja sistem transmisi hidraulik memberikan data konkret yang dapat digunakan untuk optimasi lebih lanjut. Penelitian ini juga menunjukkan potensi pemisahan generator set dari komponen yang terendam, yang dapat mempermudah pemeliharaan dan meningkatkan keandalan sistem secara keseluruhan.

Dengan demikian, penelitian ini membuka jalan bagi pengembangan lebih lanjut dalam desain dan optimasi sistem transmisi hidraulik untuk aplikasi energi arus laut. Data dan temuan yang diperoleh memberikan dasar yang kuat untuk penelitian lanjutan dalam meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem tersebut, serta menawarkan solusi inovatif untuk tantangan-tantangan yang ada dalam pemanfaatan energi arus laut.

Bab 5

Penutup

5.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan, beberapa kesimpulan utama dapat ditarik sebagai berikut:

1. Penelitian ini yang bertujuan meningkatkan efisiensi sistem konversi energi arus laut melalui pengembangan model menggunakan konsep *Generator-Motor Pair*, di mana motor bantu digunakan untuk mengatur TSR agar optimal telah selesai dilaksanakan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa model fisik sistem konversi telah selesai dibangun untuk keperluan studi optimasi daya berbasis pengaturan TSR, dengan sub riset pada simulator turbin dan generator. Penggunaan motor listrik induksi 3-fase dengan VSD efektif mensimulasikan turbin. Analisis kinerja menunjukkan torsi yang dihitung sesuai dengan pengukuran. Pengujian generator menunjukkan bahwa hubungan generator dengan penggerak utamanya, dalam hal ini simulator turbin sudah sesuai dengan yang diharapkan. Artinya simulator turbin berfungsi dengan baik menggantikan turbin, terkait dengan torsi yang tetap sesuai dengan kecepatan arus laut.
2. Implementasi kontrol optimasi berbasis TSR yang diterapkan pada sistem dengan transmisi mekanik, menunjukkan peningkatan efisiensi yang lebih baik. Sistem mencapai kondisi mendekati optimal dengan nilai C_p sebesar rata-rata 0.44 pada TSR sebesar rata-rata 6.27, berkat pengaturan kecepatan putar poros generator yang lebih tepat. Peningkatan daya yang didapatkan sebesar rata-rata 33%.
3. Untuk mendapatkan kelebihan sistem transmisi hidrolis yang diharapkan yaitu fleksibilitas dalam hal penempatan komponen PLTAL, maka dilakukan juga penerapan kontrol TSR optimal dengan motor bantu pada turbin arus laut dengan sistem transmisi hidrolis. Hasil yang didapatkan adalah peningkatan daya listrik pada pengujian sebesar rata-rata 16,3%,

sebelum dan sesudah optimasi. Temuan ini diharapkan memberikan kontribusi penting untuk pengembangan sistem pembangkit listrik tenaga arus laut yang lebih efisien dan berkelanjutan, meskipun diperlukan penyempurnaan lebih lanjut terkait adanya efisiensi sistem transmisi yang rendah dan pemilihan generator yang lebih efisien.

5.2 Saran Perbaikan untuk Penelitian Selanjutnya

Dalam penelitian ini, konsumsi daya yang diserap oleh motor listrik bantu untuk mengatur TSR belum diperhitungkan secara menyeluruh. Berikut adalah beberapa saran perbaikan untuk penelitian selanjutnya:

- a. **Pengukuran dan Analisis Konsumsi Daya Motor Listrik Bantu:**
 - **Pengukuran Konsumsi Daya:** Pengukuran konsumsi daya motor listrik bantu harus dilakukan secara terperinci selama berbagai kondisi operasional. Ini termasuk pengukuran daya selama fase startup, operasi stabil, dan perubahan kecepatan arus.
 - **Analisis Efisiensi:** Analisis efisiensi motor listrik bantu harus dilakukan untuk memahami berapa banyak daya yang diserap oleh motor dan bagaimana hal ini mempengaruhi efisiensi total sistem PLTAL. Perhitungan ini penting untuk menentukan rasio antara daya yang dihasilkan oleh turbin dan daya yang dikonsumsi oleh motor listrik bantu.
- b. **Optimasi Penggunaan Motor Listrik Bantu:**
 - **Pengembangan Algoritma Kontrol:** Algoritma kontrol yang lebih canggih harus dikembangkan untuk mengoptimalkan penggunaan motor listrik bantu. Algoritma ini harus mampu menyesuaikan torsi dan kecepatan motor dengan perubahan kondisi arus laut secara efisien, meminimalkan konsumsi daya motor.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, M., Yatim, A. H., And Tan, C. W. (2014). An Online Optimum-Relation-Based Maximum Power Point Tracking Algorithm For Wind Energy Conversion System. In 2014 Australasian Universities Power Engineering Conference, Aupec 2014 - Proceedings. <https://doi.org/10.1109/Aupec.2014.6966524>
- Abo-Khalil, A. G., And Alghamdi, A. S. (2021). MPPT Of Permanent Magnet Synchronous Generator In Tidal Energy Systems Using Support Vector Regression. *Sustainability (Switzerland)*, 13(4), 1–15. <https://doi.org/10.3390/Su13042223>
- Abouloifa, A., Noussi, K., Elbouchikhi, E., Katir, H., Lachkar, I., And Aroudi, A. E. (2022). High-Gain Observer-Based Advanced Nonlinear Control Of A Grid-Connected Wind Energy Conversion System With Sensorless Maximum Power Point Tracking. *Machines*. <https://doi.org/10.3390/Machines10111074>
- Aguilar, G., And Bayona, J. I. Y. (2021). Tidal Energy Potential In The Center Zone Of The Colombian Pacific Coast. *Inge Cuc*. <https://doi.org/10.17981/Ingecuc.17.2.2021.07>
- Aljarhizi, Y., Nouaiti, A., Ibrahim, E., Boutahiri, C., Hassoune, A., And Mesbahi, A. (2023). Optimized Wind Turbine Emulator Based On An Ac To Dc Motor Generator Set. *Engineering Technology And Applied Science Research*, 13(2), 10559-10564. <https://doi.org/10.48084/Etasr.5775>
- Aly, H. (2016). Dynamic Modeling And Control Of The Tidal Current Turbine Using Dfig And Ddpmsg For Power System Stability Analysis. *International Journal Of Electrical Power And Energy Systems*, 83, 525–540. <https://doi.org/10.1016/J.Ijepes.2016.03.055>
- Aly, H. H., Alhaddad, F. M., And El-Hawary, M. E. (2019). A Proposed Adaptive Intelligent Controllers For Tidal Currents Turbine Driving Ddpmsg For Improving The Output Power Generated. 2019 IEEE Electrical Power And Energy Conference, Epec 2019, 3. <https://doi.org/10.1109/Epec47565.2019.9074801>
- Amirouche, E., Ghedamsi, K., And Aouzellag, D. (2019). Tidal Power Systems: A Review. <https://doi.org/10.6084/M9.Figshare.14541687>
- Arredondo-Galeana, A., And Brennan, F. (2021). Floating Offshore Vertical Axis Wind Turbines: Opportunities, Challenges And Way Forward. *Energies*. <https://doi.org/10.3390/En14238000>
- Arrieta, E. L. C., And Clemente, A. R. (2019). Computational Fluid Dynamic Simulation Of Vertical Axis Hydrokinetic Turbines (G. Ji And J. Zhu (Eds.); P. Ch. 9). *Intechopen*. <https://doi.org/10.5772/Intechopen.89184>
- Artal, O., Pizarro, O., And Sepúlveda, H. H. (2019). The Impact Of Spring-Neap Tidal-Stream Cycles In Tidal Energy Assessments In The Chilean Inland Sea. *Renewable Energy*, 139, 496–506. <https://doi.org/10.1016/J.Renene.2019.02.092>
- Baig, M. S., Uddin, Z., And Insaf, A. (2021). The Parametric Estimation Of Tidal Potential Power Density Using Modeling Strategies At Hajambro Creek Of Indus Delta, Pakistan. *Proceedings Of Pakistan Academy Of Sciences A Physical And Computational Sciences*. [https://doi.org/10.53560/Ppasa\(58-2\)600](https://doi.org/10.53560/Ppasa(58-2)600)
- Baker, N., Hodge, E., Cawthorne, S., And Spooner, E. (2014). Modelling Of The Generator For Openhydro's Tidal Energy System. In 7th Iet International Conference On Power

- Electronics, Machines And Drives, Pemd 2014 (Vol. 2014).
<https://doi.org/10.1049/Cp.2014.0386>
- Ballestín-Bernad, V., Sevil, J., Domínguez-Navarro, J., And Bernal-Agustín, J. (2022). Low-Cost Variable-Speed Wind Turbines Design By Recycling Small Electrical Machines. Arrangement Of Permanent Magnets In The Rotor. *Renewable Energy And Power Quality Journal*, 20, 833-838. <https://doi.org/10.24084/Repqj20.450>
- Band, S. S., Taherei Ghazvinei, P., Bin Wan Yusof, K., Hossein Ahmadi, M., Nabipour, N., And Chau, K. W. (2021). Evaluation Of The Accuracy Of Soft Computing Learning Algorithms In Performance Prediction Of Tidal Turbine. *Energy Science And Engineering*, 9(5), 633–644. <https://doi.org/10.1002/Ese3.849>
- Bian, F., Meng, K., Jia, Y., Ma, J., And Hai, R. (2022). Application Of Effective Wind Speed Estimation And New Sliding Mode Observer In Wind Energy Conversion System. *Mathematical Problems In Engineering*.
<https://doi.org/10.1155/2022/8863163>
- Blunden, L. S., Bahaj, A. S., And Aziz, N. S. (2013). Tidal Current Power For Indonesia? An Initial Resource Estimation For The Alas Strait. *Renewable Energy*, 49, 137–142. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.01.046>
- Bogandov, D., Ram, M., Aghahosseini, A., Gulagi, A., Oyewo, A. S., Child, M., Caldera, U., Sadovskaia, K., Farfan, J., De Souza Noel Simas Barbosa, L., Fasihi, M., Khalili, S., Traber, T., And Breyer, C. (2021). Low-Cost Renewable Electricity As The Key Driver Of The Global Energy Transition Towards Sustainability. *Energy*, 227. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120467>
- Brochard, T., Shiono, M., & Fujimura, K. (2013). Development of a new freewheel coupling for hybrid wind turbines. *Renewable Energy*, 57, 313-321.
- Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., & Bossanyi, E. (2011). *Wind Energy Handbook*. John Wiley & Sons.
- Chen, H., Zhu, Y., Wang, Q., & Wang, C. (2015). An improved MPPT control strategy for rapid changing environment in standalone tidal energy systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 65, 59-68.
- Chen, W., Wang, X., Zhang, F., Liu, H., And Lin, Y. (2020). Review Of The Application Of Hydraulic Technology In Wind Turbine. *Wind Energy*, 23(7), 1495–1522. <https://doi.org/10.1002/we.2506>
- Chowdhury, M. S., Rahman, K. S., Selvanathan, V., Nuthammachot, N., Suklueng, M., Mostafaeipour, A., Habib, A., Akhtaruzzaman, M., Amin, N., And Techato, K. (2021). Current Trends And Prospects Of Tidal Energy Technology. *Environment, Development And Sustainability*, 23(6), 8179–8194. <https://doi.org/10.1007/S10668-020-01013-4>
- Chowdhury, S., Rahman, K. S., Ahmed, S. And Rahman, M. M. (2012). Tidal Energy: Utilization And Environmental Concerns. *Procedia Engineering*, 49, 696-704.
- Clarke, J. A., Connor, G., Grant, A. D., & Johnstone, C. M. (2007). Design and testing of a contra-rotating tidal current turbine. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 221(2), 171-179.
- Deldar, M., Izadian, A., And Anwar, S. (2015). Reconfiguration Of A Wind Turbine With Hydrostatic Drivetrain To Improve Annual Energy Production. 2015 IEEE Energy Conversion Congress And Exposition, Ecce 2015, 4, 6660–6666. <https://doi.org/10.1109/Ecce.2015.7310592>

- Dixit, S., And Badgaiyan, P. (2022). Analyzing Tidal Energy Scheme With Variable Inputs That Are Affected By Tides. *Smart Moves Journal Ijoscience*. <https://doi.org/10.24113/Ijoscience.V8i2.472>
- Dong, Y., Zhao, Y., Zhu, W., Zhang, X., And Guo, J. (2017). Development Of A Simple Power Controller For Horizontal-Axis Standalone Tidal Current Energy Generation System. *International Journal Of Global Energy Issues*, 40(1–2), 117–127. <https://doi.org/10.1504/Ijgei.2017.080748>
- Elghali, S. E. Ben, Benbouzid, M., And Charpentier, J. F. (2007). Marine Tidal Current Electric Power Generation Technology: State Of The Art And Current Status. <https://doi.org/10.1109/Iemdc.2007.383635>
- Emeara, M. S., Abdelgawad, A. F., And Ahmed, E. M. (2021). Hybrid Renewable Energy System For A Sustainable House-Power-Supply. *Journal Of Advanced Research In Fluid Mechanics And Thermal Sciences*. <https://doi.org/10.37934/Arfmts.87.1.91107>
- Engineering, W. (N.D.). How Are Gears And Gearboxes Used In Wind Turbines? Retrieved June 6, 2022, From <https://www.windpowerengineering.com/how-are-gears-gearboxes-used-in-wind-turbines/>
- Erwandi, A. K., Sasoko, P., Rina, W. B., Marta, E., And Rahuna, D. (2011). Vertical Axis Marine Current Turbine Development In Indonesian Hydrodynamic Laboratory-Surabaya For Tidal Power Plant. *International Conference And Exhibition On Sustainable Energy And Advanced Materials (Ice Seam 2011)*. Solo, Indonesia, 15–23.
- Felix, A., Hernández-Fontes, J. V, Lithgow, D., Mendoza, E., Posada, G., Ring, M., And Silva, R. (2019). Wave Energy In Tropical Regions: Deployment Challenges, Environmental And Social Perspectives. *Journal Of Marine Science And Engineering*. <https://doi.org/10.3390/Jmse7070219>
- Firdaus, A. M., Houlsby, G. T., And Adcock, T. A. A. (2020). Tidal Energy Resource In Larantuka Strait, Indonesia. *Proceedings Of The Institution Of Civil Engineers - Energy*, 173(2), 81–92. <https://doi.org/10.1680/Jener.19.00042>
- Fraenkel, P. (2002). Power from marine currents. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 216(1), 1-14.
- Gan, Z., Tang, H., Treadway, E., Gillespie, R. B., And Remy, C. D. (2020). Modeling And Experimental Evaluation Of A Variable Hydraulic Transmission. *IEEE/Asme Transactions On Mechatronics*, 25(2), 750–761. <https://doi.org/10.1109/Tmech.2019.2963880>
- Ganon, M. (2021). Rating The Real Performance Of Hydraulic Pumps. <https://www.mobilehydraulictips.com/rating-the-real-performance-of-hydraulic-pumps/>
- Ghefiri, K., Garrido, I., Bouallègue, S., Haggège, J., And Garrido, A. J. (2018). Hybrid Neural Fuzzy Design-Based Rotational Speed Control Of A Tidal Stream Generator Plant. *Sustainability (Switzerland)*, 10(10), 1–26. <https://doi.org/10.3390/Su10103746>
- Gorban, A. N., Gorlov, A. M., And Silantyev, V. M. (2001). Limits Of The Turbine Efficiency For Free Fluid Flow. *Journal Of Energy Resources Technology*, 123(4), 311-317.

- Gu, H., Liu, W., Gao, Q., And Zhang, Y. (2021). A Review On Wind Turbines Gearbox Fault Diagnosis Methods. *Journal Of Vibroengineering*, 23(1), 26-43. <https://doi.org/10.21595/jve.2020.20178>
- Gu, Y., Huang, Y., Li, C., Guan, F., Fu, W., Zhan, Y., And Zhao, H. (2021). Effects Of Motor–Generator Pair System On Improving Inertial Response And Primary Frequency Regulation Capability Of Renewable Energy. *Iet Renewable Power Generation*, 15. <https://doi.org/10.1049/rpg2.12025>
- Guevara-Munoz, A., Hincapie-Zuluaga, D., Sierra-Del Rio, J., Rodriguez-Cabal, M. A., And Torres-Lopez, E. (2023). Numerical Comparison And Efficiency Analysis Of Three Vertical Axis Turbine Of H-Darrieus Type. *Eureka Physics And Engineering*. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2023.002593>
- Gui, X. (2023). Optimization Of Heat Dissipation And Control Scheme For Wind Turbine Gearbox Based On Flomaster-Simulink Co-Simulation. *Journal Of Physics Conference Series*, 2584(1), 012049. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2584/1/012049>
- Güner, F., And Zenk, H. (2020). Experimental, Numerical And Application Analysis Of Hydrokinetic Turbine Performance With Fixed Rotating Blades. *Energies*. <https://doi.org/10.3390/en13030766>
- Handoko, C. R., & Mukhtasor. (2021). The development of power take-off technology in wave energy converter systems: A Review. *{IOP} Conference Series: Earth and Environmental Science*, 739(1), 12081. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/739/1/012081>
- Handoko, C. R., Mukhtasor, & Koenhardono, E. S. (2023). TSR-BASED OPTIMIZATION USING AUXILIARY MOTOR IN TIDAL ENERGY CONVERSION SYSTEM . In *AN EXPERIMENTAL STUDY* (Vol. 18, Issue 22, pp. 2507–2514). <https://doi.org/10.59018/1123302>
- Handoko, C. R., Mukhtasor, And Koenhardono, E. S. (2023). Performance Evaluation Of Permanent Magnet Synchronous Generator (Pmsg) On Tidal Power Generation Optimization. *Iop Conference Series: Earth And Environmental Science*, 1166(1), 12023. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1166/1/012023>
- Hidayati, N., Mahmudi, M., Saputra, D. K., Musa, M., And Purnawali, H. S. (2016). Ocean Currents Energy For Electricity Generation And Its Potential In East Java Water, Indonesia. *Journal Of Enviromental Engineering And Sustainable Technology*. <https://doi.org/10.21776/Ub.Jeest.2017.003.02.6>
- Hoffert, M. I., Caldeira, K., Benford, G., Criswell, D. R., Green, C., Herzog, H., ... And Schlesinger, M. E. (2002). Advanced Technology Paths To Global Climate Stability: Energy For A Greenhouse Planet. *Science*, 298(5595), 981-987.
- Hua, Y., Li, Y., And Li, X. (2015). Hydrostatic Transmission Technology For Wind Turbine: A Review. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 45, 689–696.
- Huang, T., Yi, C., Hao, Z., And Xiao, H. (2022). Adaptive Window Rotated Second-Order Synchroextracting Transform And Its Application In Fault Diagnosis Of Wind Turbine Gearbox. *Measurement Science And Technology*, 34(2), 024005. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ac9cfb>

- Idrissi, I., Chafouk, H., Bachtiri, R., And Khanfara, M. (2019). Modeling And Simulation Of The Variable Speed Wind Turbine Based On A Doubly Fed Induction Generator.. <https://doi.org/10.5772/intechopen.83690>
- Ikhwan, M., Rizal, S., Ramli, M., Muchlisin, Z. A., And Munzir, S. (2021). Hydrodynamics And Tidal Turbine Generator Stability Analysis In Several Wave Variations. *International Journal Of Differential Equations*. <https://doi.org/10.1155/2021/6682407>
- Isaksson, N., Cleasby, I. R., Owen, E., Williamson, B., Houghton, J. D., Wilson, J., And Masden, E. A. (2021). The Use Of Animal-Borne Biologging And Telemetry Data To Quantify Spatial Overlap Of Wildlife With Marine Renewables. *Journal Of Marine Science And Engineering*. <https://doi.org/10.3390/jmse9030263>
- Isaksson, N., Masden, E. A., Williamson, B., Costagliola-Ray, M. M., Slingsby, J., Houghton, J. D. R., And Wilson, J. I. (2020). Assessing The Effects Of Tidal Stream Marine Renewable Energy On Seabirds: A Conceptual Framework. *Marine Pollution Bulletin*. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111314>
- Jain, A., Shankar, S., And Vanitha, V. (2018). Power Generation Using Permanent Magnet Synchronous Generator (Pmsg) Based Variable Speed Wind Energy Conversion System (Weecs): An Overview. *Journal Of Green Engineering*, 7(4), 477–504. <https://doi.org/10.13052/jge1904-4720.742>
- Jia, Y., Liu, Y., And Li, X. (2020). Hydrostatic Transmission Technology For Offshore Wind Turbine. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 135(11043), 1.
- Kai, L. Y., Sarip, S., Kaidi, H. M., Ardila-Rey, J. A., Samsuddin, N. M., Muhtazaruddin, M. N., Muhammad-Sukki, F., And Aziz, S. A. (2021). Current Status And Possible Future Applications Of Marine Current Energy Devices In Malaysia: A Review. *IEEE Access*. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3088761>
- Khan, M. J. (2022). An Aiapo MPPT Controller Based Real Time Adaptive Maximum Power Point Tracking Technique For Wind Turbine System. *Isa Transactions*, 123, 492–504. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2021.06.008>
- Kishore, R. A., Choudhury, P., & Gupta, R. (2016). Sensorless MPPT for tidal energy conversion systems using fast converging algorithms. *Renewable Energy*, 85, 149-157.
- Korane, K. (2016). Offshore Hydraulics Is Key To Electricity From The Sea. [https://www.fluidpowerworld.com/offshore-hydraulics-is-key-to-electricity-from-the-sea/#:~:text=According To The Paris-Based,Demand Of About 20%2c000 Twh](https://www.fluidpowerworld.com/offshore-hydraulics-is-key-to-electricity-from-the-sea/#:~:text=According%20to%20the%20Paris-based,demand%20of%20about%2020%20TWh).
- Koutroulis, E., And Kalaitzakis, K. (2006). Design Of A Maximum Power Tracking System For Wind-Energy-Conversion Applications. *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, 53(2), 486-494.
- Kurdi, A., Alhazmi, N., Alhazmi, H., And Tabbakh, T. (2020). Practice Of Simulation And Life Cycle Assessment In Tribology—A Review. *Materials*. <https://doi.org/10.3390/ma13163489>
- Li, D., Zhao, Y., And Zhao, Y. (2022). A Dynamic-Model-Based Fault Diagnosis Method For A Wind Turbine Planetary Gearbox Using A Deep Learning Network. *Protection And Control Of Modern Power Systems*, 7(1). <https://doi.org/10.1186/s41601-022-00244-z>

- Li, G., And Zhu, W. (2022). A Review On Up-To-Date Gearbox Technologies And Maintenance Of Tidal Current Energy Converters. *Energies*, 15(23). <https://doi.org/10.3390/en15239236>
- Li, G., And Zhu, W. (2023). Tidal Current Energy Harvesting Technologies: A Review Of Current Status And Life Cycle Assessment. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 179, 113269. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113269>
- Li, H., Chen, Z., & Polinder, H. (2010). Optimization of multibrid permanent-magnet wind generator systems. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 25(3), 795-803.
- Li, H., Wang, H., And Han, B. (2013). Optimal Control Strategy For Maximum Power Point Tracking In Wind Energy Conversion Systems. *Renewable Energy*, 60, 195-203.
- Li, Y., Liu, H., Lin, Y., Li, W., And Gu, Y. (2019). Design And Test Of A 600-Kw Horizontal-Axis Tidal Current Turbine. *Energy*, 182, 177–186. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.05.154>
- Li, Y., Tieleman, H., And Yuan, Z. (2014). Control Strategy Of Tidal Current Turbine Under Different Flow Conditions. *Energy Procedia*, 61, 182-186.
- Lin, Y.-C., Balas, V. E., Yang, J., And Chang, Y.-H. (2020). Adaptive Takagi–Sugeno Fuzzy Model Predictive Control For Permanent Magnet Synchronous Generator-Based Hydrokinetic Turbine Systems. *Energies*. <https://doi.org/10.3390/en13205296>
- Liu, H. W., Li, W., Lin, Y. G., And Ma, S. (2011). Tidal Current Turbine Based On Hydraulic Transmission System. *Journal Of Zhejiang University: Science A*, 12(7), 511–518. <https://doi.org/10.1631/jzus.A1000334>
- Liu, H., Li, W., Lin, Y., And Ma, S. (2011). Tidal Current Turbine Based On Hydraulic Transmission System. *Journal Of Zhejiang University: Science A*, 12, 511–518. <https://doi.org/10.1631/jzus.A1000334>
- Liu, X., Chen, Z., Si, Y., Qian, P., Wu, H., Cui, L., And Zhang, D. (2021). A Review Of Tidal Current Energy Resource Assessment In China. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 145, 111012. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111012>
- Liu, X., Yu, A., Qin, A., And Zhai, J. (2019). Highly Integrated Triboelectric Nanogenerator For Efficiently Harvesting Raindrop Energy. *Advanced Materials Technologies*. <https://doi.org/10.1002/admt.201900608>
- Liu, Y., Jia, Y., And Li, X. (2016). Hydrostatic Transmission Technology For Tidal Turbine. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 57, 1235–1244.
- Liu, Z., Houari, A., Machmoum, M., Benkhoris, M. F., And Tang, T. (2020). An Active Ftc Strategy Using Generalized Proportional Integral Observers Applied To Five-Phase Pmsg Based Tidal Current Energy Conversion Systems. *Energies*, 13, 6645. <https://doi.org/10.3390/en13246645>
- Liu, Z., Tang, T., Houari, A., Machmoum, M., And Benkhoris, M. F. (2021). An Ftc Design Via Multiple Sogis With Suppression Of Harmonic Disturbances For Five-Phase Pmsg-Based Tidal Current Applications. *Journal Of Marine Science And Engineering*. <https://doi.org/10.3390/jmse9060574>
- Mahato, A., And Ghoshal, S. (2019). Various Power Transmission Strategies In Wind Turbine: An Overview. *International Journal Of Dynamics And Control*, 7. <https://doi.org/10.1007/s40435-019-00543-8>

- Mao, Z., Huang, W., Yang, C., Cui, R., And Sharma, S. (2015). Maximum Power Tracking Control For Current Power System Based On Fuzzy-Pid Controller. https://doi.org/10.1007/978-3-319-22879-2_7
- Maradin, D. (2021). Advantages And Disadvantages Of Renewable Energy Sources Utilization. *International Journal Of Energy Economics And Policy*. <https://doi.org/10.32479/ijee.11027>
- Marks-Bielska, R., Bielski, S., Pik, K., And Kurowska, K. (2020). The Importance Of Renewable Energy Sources In Poland's Energy Mix. *Energies*. <https://doi.org/10.3390/en13184624>
- Mbabazi, S. (2010). Modelling And Control Of A Variable- Speed Subsea Tidal Turbine Equipped With Permanent Magnet Synchronous Generator. August 2010, 11.
- Mison, N., Saini, L. M., Aris, I., Aravind, C. V, And Hanamoto, T. (2020). Simplified Design Of Magnetic Gear By Considering The Maximum Transmission Torque Line. *Applied Sciences*. <https://doi.org/10.3390/app10238581>
- Mohanty, B., And Stelson, K. A. (2022). Experimental Validation Of A Hydrostatic Transmission For Community Wind Turbines. *Energies*. <https://doi.org/10.3390/en15010376>
- Moon, S. H., Park, B. G., Kim, J. W., And Kim, J. M. (2020). Maximum Power-Point Tracking Control Using Perturb And Observe Algorithm For Tidal Current Generation System. *International Journal Of Precision Engineering And Manufacturing - Green Technology*, 7(4), 849–858. <https://doi.org/10.1007/S40684-019-00162-W>
- Morfin, O., Ruiz-Cruz, R., Hernández, J., Castañeda, C., Ramírez-Betancour, R., And Valenzuela, F. (2021). Real-Time Sensorless Robust Velocity Controller Applied To A Dc-Motor For Emulating A Wind Turbine. *Energies*, 14(4), 868. <https://doi.org/10.3390/en14040868>
- Moussa, I., Bouallegue, A., And Khedher, A. (2019). New Wind Turbine Emulator Based On Dc Machine: Hardware Implementation Using Fpga Board For An Open-Loop Operation. *Iet Circuits Devices And Systems*, 13(6), 896-902. <https://doi.org/10.1049/iet-cds.2018.5530>
- Mukhtasor. (2014). *Mengenal Energi Laut (1st Ed.)*. Asosiasi Energi Laut Indonesia (Aseli).
- Munteanu, I., Bratcu, A. I., Cutululis, N. A., And Ceanga, E. (2008). *Optimal Control Of Wind Energy Systems: Towards A Global Approach*. Springer-Verlag London Limited.
- Musa, M. S. (2021). Effects Of Tourism, Financial Development, And Renewable Energy On Environmental Performance In Eu-28: Does Institutional Quality Matter? *Environmental Science And Pollution Research*.
- Mussilimov, K., Ibraev, A., And Wójcik, W. (2019). Development Of Wind Energy Complex Automation System. *Informatyka Automatyka Pomiary W Gospodarce I Ochronie Środowiska*, 9(2), 36-40. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0013.2545>
- Novico, F., Sudjono, E. H., Egon, A., Menier, D., Methew, M., And Pratama, M. B. (2021). Tidal Current Energy Resources Assessment In The Patinti Strait, Indonesia. *International Journal Of Renewable Energy Development*, 10(3), 517–525. <https://doi.org/10.14710/ijred.2021.35003>
- Omokhafa James, T., Jacob, T., Eugene Okenna, A., Edwin Albert, U., And Yahaya Asizehi, E. (2022). Modeling And Simulation Of Marine Current Energy Conversion

- System With Six-Phase Permanent Magnet Synchronous Generator. The Eurasia Proceedings Of Science Technology Engineering And Mathematics. <https://doi.org/10.55549/Epstem.1224038>
- Orhan, K., And Mayerle, R. (2020). Potential Hydrodynamic Impacts And Performances Of Commercial-Scale Turbine Arrays In The Strait Of Larantuka, Indonesia. *Journal Of Marine Science And Engineering*, 8. <https://doi.org/10.3390/Jmse8030223>
- Ortega, A., Tomy, J. P., Shek, J., Paboeuf, S., And Ingram, D. (2020). An Inter-Comparison Of Dynamic, Fully Coupled, Electro-Mechanical, Models Of Tidal Turbines. *Energies*. <https://doi.org/10.3390/En13205389>
- Patel, S. (N.D.). First Turbine Deployed At French Tidal Power Farm. Retrieved October 27, 2021, From <https://www.powermag.com/first-turbine-deployed-french-tidal-power-farm/>
- Peeters, J., Vanderniepen, P., & Van Paepegem, W. (2006). Experimental investigation of the dynamic behavior of a freewheel mechanism for wind turbines. *Renewable Energy*, 31(11), 1735-1751.
- Pelc, R., And Fujita, R. M. (2002). Renewable Energy From The Ocean. *Marine Policy*, 26(6), 471-479.
- Qian, P., Feng, B., Liu, H., Tian, X., Si, Y., And Zhang, D. (2019). Review On Configuration And Control Methods Of Tidal Current Turbines. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 108(March), 125–139. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.03.051>
- Qin, H., Xu, H., And Li, G. (2014). MPPT Control For Tidal Current Turbine System With Permanent Magnet Synchronous Generator. *Renewable Energy*, 71, 42-51.
- Qiu, S. (2023). Marine Power Generation Methods And Future Developments. *Highlights In Science Engineering And Technology*. <https://doi.org/10.54097/Hset.V46i.7687>
- Rapp, J., And Turesson, J. (2015). Hydrostatic Transmission In Wind Turbines: Development Of Test Platform: Vol. Independen. <http://liu.diva-portal.org/smash/get/diva2:851478/fulltext01.pdf>
- Saavedra, A., Galvis, N. A., Mesa, F., Banguero, E., Castaneda, M., Zapata, S., And Aristizábal, A. J. (2021). Current State Of The Worldwide Renewable Energy Generation: A Review. *International Journal On Engineering Applications*, 9(3), 115–127. <https://doi.org/10.15866/Irea.V9i3.19987>
- Satrio, D., And Utama, I. K. A. P. (2021). Experimental Investigation Into The Improvement Of Self-Starting Capability Of Vertical-Axis Tidal Current Turbine. *Energy Reports*, 7, 4587–4594. <https://doi.org/10.1016/j.egyrs.2021.07.027>
- Seixas, G., Pessoa, A. S., & Lopes, R. S. (2018). Adaptive control strategy for a hybrid hydro-wind energy system. *Renewable Energy*, 115, 877-887.
- Shao, M., Zhao, Y., Sun, J., Han, Z., And Shao, Z. (2023). A Decision Framework For Tidal Current Power Plant Site Selection Based On Gis-Mcdm: A Case Study In China. *Energy*, 262, 125476. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125476>
- Song, Y. And Paek, I. (2020). Prediction And Validation Of The Annual Energy Production Of A Wind Turbine Using Windsim And A Dynamic Wind Turbine Model. *Energies*, 13(24), 6604. <https://doi.org/10.3390/En13246604>

- Tan, J., Zhu, C., Song, C., Han, H., And Li, Y. (2019). Effects Of Flexibility And Suspension Configuration Of Main Shaft On Dynamic Characteristics Of Wind Turbine Drivetrain. *Chinese Journal Of Mechanical Engineering*, 32(1). <https://doi.org/10.1186/S10033-019-0348-4>
- Teng, W., Ding, X., Tang, S., Xu, J., And Shi, B. (2021). Vibration Analysis For Fault Detection Of Wind Turbine Drivetrains—A Comprehensive Investigation. *Sensors*, 21(5), 1686. <https://doi.org/10.3390/S21051686>
- Thomas, O. E. (2021). Mathematical Modelling And Simulation Of Tidal Energy. In *International Journal Of Science And Engineering Applications (Ijsea)* (Vol. 10, Issue 3, Pp. 21–28).
- Touimi, K., Benbouzid, M., And Chen, Z. (2020). Optimal Design Of A Multibrid Permanent Magnet Generator For A Tidal Stream Turbine. *Energies*, 13(2), 487. <https://doi.org/10.3390/En13020487>
- Touimi, K., Benbouzid, M., And Tavner, P. (2018). Tidal Stream Turbines: With Or Without A Gearbox?. *Ocean Engineering*, 170, 74-88. <https://doi.org/10.1016/J.Oceaneng.2018.10.013>
- Val, D. V, Chernin, L., And Yurchenko, D. (2021). Updatable Probabilistic Evaluation Of Failure Rates Of Mechanical Components In Power Take-Off Systems Of Tidal Stream Turbines. *Energies*. <https://doi.org/10.3390/En14206586>
- Vanitha, V., Resmi, R., And Kumar, K. (2022). Fabrication And Mathematical Modeling Of The Brushless Doubly Fed Induction Generator-Based Wind Electric Conversion System. *Mathematical Problems In Engineering*, 2022, 1-14. <https://doi.org/10.1155/2022/2998210>
- Walker, S., Thies, P. R., And Johanning, L. (2022). Comparative Life Cycle Assessment Of Tidal Stream Turbine Blades. *International Marine Energy Journal*. <https://doi.org/10.36688/Imej.5.249-256>
- Wall, W., Khalid, B., Urbański, M., And Kot, M. (2021). Factors Influencing Consumer's Adoption Of Renewable Energy. *Energies*. <https://doi.org/10.3390/En14175420>
- Wang, T., Xie, J., Yang, J., And Gao, G. (2022). A Mechanism-Based Automatic Fault Diagnosis Method For Gearboxes. *Sensors*. <https://doi.org/10.3390/S22239150>
- Wang, X., Li, Y., And Li, X. (2019). Hydrostatic Transmission System Design For Tidal Turbine. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 108, 786–794.
- Wani, F., Dong, J., And Polinder, H. (2020). Tidal Turbine Generators. *Advances In Modelling And Control Of Wind And Hydrogenerators*, 1–15. <https://doi.org/10.5772/Intechopen.90433>
- Wei, N., Brownstein, I., Cardona, J. L., Howland, M. F., And Dabiri, J. O. (2021). Near-Wake Structure Of Full-Scale Vertical-Axis Wind Turbines. *Journal Of Fluid Mechanics*. <https://doi.org/10.1017/Jfm.2020.578>
- Wen, M., And Srikanth, N. (2017). Maximum Power Point Tracking For Tidal Turbine Generator. *2017 Asian Conference On Energy, Power And Transportation Electrification*, Acept 2017, 2017-Decem, 1–5. <https://doi.org/10.1109/Acept.2017.8168579>
- Wen, M., And Srikanth, N. (2017). Maximum Power Point Tracking For Tidal Turbine Generator. *2017 Asian Conference On Energy, Power And Transportation Electrification*, Acept 2017, 2017-Decem, 1–5. <https://doi.org/10.1109/Acept.2017.8168579>

- Wijaya, F. D., Pribadi, K. D., And Sarjiya. (2017). Maximum Power Point Tracking Using Particle Swarm Optimization Algorithm For Hybrid Wind-Tidal Harvesting System On The South Coast Of Java. *International Journal Of Electrical And Computer Engineering*, 7(2), 659–666. <https://doi.org/10.11591/ijece.v7i2.pp659-666>
- Xia, H., Wang, X., Li, Q., And Jia, N. (2022). Comparative Analysis Of Calculation Methods For Conversion Efficiency Of Tidal Energy Converters. <https://doi.org/10.3233/atde220291>
- Xiao, D., Chen, B., Li, Z., Fu, X., Wei, C., And Lu, D. (2023). Editorial: Control, Operation, And Trading Strategies For Intermittent Renewable Energy In Smart Grids. *Frontiers In Energy Research*. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1139238>
- Ye, Z., And Gu, W. (2022). A Comparative Study Of Methods For Calculating The Exploitable Amount Of Tidal Energy. *Journal Of Physics Conference Series*. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2399/1/012002>
- Yin, L.-P., Lai, L., Zhu, Z., And Li, T. (2022). Maximum Power Point Tracking Control For Non-Gaussian Wind Energy Conversion System By Using Survival Information Potential. *Entropy*. <https://doi.org/10.3390/e24060818>
- Yin, X., And Zhao, X. (2019). Adv Preview Based Nonlinear Predictive Control For Maximizing Power Generation Of A Tidal Turbine With Hydrostatic Transmission. *IEEE Transactions On Energy Conversion*, 34(4), 1781–1791. <https://doi.org/10.1109/tec.2019.2938062>
- Yin, X., And Zhao, X. (2020). Sensorless Maximum Power Extraction Control Of A Hydrostatic Tidal Turbine Based On Adaptive Extreme Learning Machine. *IEEE Transactions On Sustainable Energy*, 11(1), 426–435. <https://doi.org/10.1109/tste.2019.2894064>
- Yuen, K., Thomas, K., Grabbe, M., Deglaire, P., Bouquerel, M., Österberg, D., And Leijon, M. (2009). Matching A Permanent Magnet Synchronous Generator To A Fixed Pitch Vertical Axis Turbine For Marine Current Energy Conversion. *Oceanic Engineering, IEEE Journal Of*, 34, 24–31. <https://doi.org/10.1109/joe.2008.2010658>
- Zhang, C., Wang, L., And Li, H. (2020). Experiments And Simulation On A Late-Model Wind-Motor Hybrid Pumping Unit. *Energies*, 13(4), 994. <https://doi.org/10.3390/en13040994>
- Zhang, J., Chen, W., Ai, C., Yang, Y., Shang, S., And Zhou, Q. (2022). Research On High Precision Control Of Maximum Power Point Tracking For Offshore Hydraulic Wind Turbine. <https://doi.org/10.1115/fpmc2022-89567>
- Zhang, Q., Guo, Y., Li, Y., And Li, Y. (2019). A Review Of Turbine Design And Materials For Tidal Stream Energy Conversion. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 110, 709–725.
- Zhang, Q., Kong, X., Yu, B., Ba, K., Jin, Z., And Kang, Y. (2020). Review And Development Trend Of Digital Hydraulic Technology. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(2). <https://doi.org/10.3390/app10020579>
- Zhang, X. (2023). Reliability Improvement Method Of Wind Turbine Gearbox.. <https://doi.org/10.1117/12.2689878>
- Zhou, L., Song, Y., And Li, X. (2018). Hydrostatic Transmission System Design For Wind Turbine. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 91(1–14), 689–696.

- Zhou, Y., Xu, G., Wei, S., Zhang, X., And Huang, Y. (2018). Experiment Study On The Control Method Of Motor-Generator Pair System. *IEEE Access*, 6, 925–936. <https://doi.org/10.1109/Access.2017.2776974>
- Zhu, D., Jin, F., Hu, Z., Luo, Y., And Xiao, R. (2022). Influence Of Tip Clearance Inclination On The Performance Of Axial Flow Impeller In Storage Mode. *Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers Part A Journal Of Power And Energy*. <https://doi.org/10.1177/09576509221131222>