



PROYEK TUGAS AKHIR
TEKNOLOGI REKAYASA KONSTRUKSI PERKAPALAN

STUDI KOMPARATIF PERFORMA AERODINAMIKA TURBIN
ANGIN *DARRIEUS* (VAWT) DAN *FIBONACCI* (HAWT) MELALUI
SIMULASI CFD UNTUK APLIKASI LISTRIK CADANG DI KAPAL
***OFFSHORE* (FPSO)**

Diajukan Untuk Memenuhi Sebagai Persyaratan
Memperoleh Gelar Sarjana Terapan

Disusun Oleh :

Addelia Abigael
40040422650020

PROGRAM STUDI SARJANA TERAPAN
TEKNOLOGI REKAYSA KONSTRUKSI PERKAPALAN
DEPARTEMEN TEKNOLOGI INDUSTRI
SEKOLAH VOKASI
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEMARANG

2026

LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN

Peneliti yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Addelia Abigael

NIM : 40040422650020

Fakultas : Sekolah Vokasi

Program Studi : Teknologi Rekayasa Konstruksi Perkapalan

Judul Skripsi : Studi Komparatif Performa Aerodinamika Turbin Angin *Darrieus* (Vawt) Dan *Fibonacci* (Hawt) Melalui Simulasi CFD Untuk Aplikasi Listrik Cadang Di Kapal *Offshore (FPSO)*

Dengan penuh ketulusan, peneliti menyatakan bahwa karya tulisproposal Tugas Akhir ini sepenuhnya merupakan buah dari riset, ide, dan uraian yang peneliti susun sendiri. Hal ini berlaku baik untuk isi laporan maupun kegiatan yang tercakup dalam proposal Tugas Akhir ini. Apabila terdapat karya pihak lain, sumbernya akan peneliti cantumkan secara jelas.

Pernyataan ini peneliti buat dengan kesadaran penuh. Jika kelak ditemukan kekeliruan atau ketidaksesuaian fakta dalam pernyataan ini, peneliti bersedia menerima konsekuensi akademis, termasuk pencabutan gelar yang telah peneliti peroleh dari Tugas Akhir ini, serta sanksi lain yang sesuai dengan ketentuan Universitas Diponegoro. Pernyataan ini peneliti buat tanpa tekanan atau paksaan dari pihak mana pun.

Semarang, 6 Mei 2026
Yang membuat pernyataan,



Addelia Abigael
NIM 40040422650020

Halaman ini sengaja dikosongkan

HALAMAN PENGESAHAN TUGAS AKHIR

Studi Komparatif Performa Aerodinamika Turbin Angin *Darrieus* (VAWT) Dan *Fibonacci* (HAWT) Melalui Simulasi CFD Untuk Aplikasi Listrik Cadang Di Kapal *Offshore* (FPSO)

Tugas Akhir diajukan kepada
Program Studi Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Konstruksi Perkapalan
Departemen Teknologi Industri
Sekolah Vokasi
Universitas Diponegoro

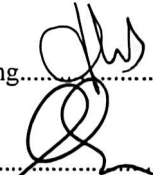
Oleh :

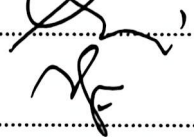
Addelia Abigael
40040422650020

Diajukan pada
Sidang Tugas Akhir
6 Mei 2026

Dinyarakan Lulus/Tidak Lulus
Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Konstruksi Perkapalan

M. Sawal Baital, S.T., M.T.

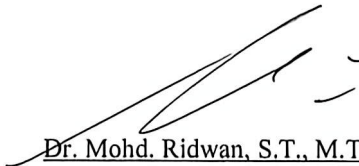
Pembimbing.....

Prof. Dr.Eng. Ahmad Fauzan Zakki, S.T., M.T., IPM., MRINA Penguji I.....

Dr. Aulia Windyandari S.T., M.T.

Penguji II.....

Mengetahui,
Ketua Program Studi
Teknologi Rekayasa Konstruksi Perkapalan
Sekolah Vokasi Universitas Diponegoro


Dr. Mohd. Ridwan, S.T., M.T.
NIP 197008271999031002

Halaman ini sengaja dikosongkan

ABSTRAK

Penelitian ini melakukan analisis komparatif terhadap performa aerodinamika turbin angin Darrieus (VAWT) dan Fibonacci-Spiral (HAWT) untuk aplikasi kelistrikan cadangan pada kapal offshore (FPSO). Simulasi Computational Fluid Dynamics (CFD) dilaksanakan menggunakan ANSYS Fluent dengan pendekatan RANS, menerapkan model turbulensi $k-\varepsilon$ Realizable untuk turbin Darrieus dan $k-\omega$ SST untuk turbin Fibonacci-Spiral, pada kecepatan angin 2, 4, dan 10 m/s berdasarkan data BMKG dengan luas sapuan rotor yang setara (630.000 mm²). Hasil simulasi menunjukkan bahwa turbin Darrieus menghasilkan koefisien daya rata-rata $C_p = 0,576$ (97,1% dari batas Betz), koefisien torsi $C_t = 0,318$, dan TSR yang stabil di 1,813. Di sisi lain, turbin Fibonacci-Spiral mencapai C_p rata-rata 0,254 dengan tren peningkatan (0,250–0,259), $C_t = 0,165$, dan TSR 1,539 yang terus meningkat, menunjukkan bahwa turbin tersebut belum mencapai titik operasi optimal. Meskipun Darrieus lebih unggul dalam efisiensi konversi energi, Fibonacci-Spiral memiliki keunggulan dalam self-starting pada kecepatan angin rendah ($C_t = 0,171$ pada 2 m/s), RPM tinggi (80–437 RPM), dan desain yang kompak (diameter 700 mm). Hipotesis mengenai keunggulan Fibonacci-Spiral tidak sepenuhnya terbukti, namun temuan ini memberikan kontribusi pada pemahaman ilmiah mengenai pendekatan biomimetik dalam pengembangan energi terbarukan di maritim Indonesia.

Kata Kunci: Turbin Angin, *Darrieus*, *Fibonacci-Spiral*, CFD, Aerodinamika

Halaman ini sengaja dikosongkan

ABSTRACT

This study conducts a comparative analysis of the aerodynamic performance of Darrieus (VAWT) and Fibonacci-Spiral (HAWT) wind turbines for backup power applications on offshore vessels (FPSOs). CFD simulations were performed using ANSYS Fluent with the RANS approach, applying the $k-\epsilon$ Realizable model for the Darrieus turbine and the $k-\omega$ SST model for the Fibonacci-Spiral turbine, at wind speeds of 2, 4, and 10 m/s based on BMKG data with equivalent rotor swept areas. Results show the Darrieus turbine produces an average C_p of 0.576 (97.1% of the Betz limit), C_t of 0.318, and a stable TSR of 1.813. The Fibonacci-Spiral turbine achieved an average C_p of 0.254 with an increasing trend, C_t of 0.165, and a rising TSR of 1.539, indicating it has not reached its optimal point. Although the Darrieus turbine is superior in efficiency, the Fibonacci-Spiral turbine has advantages in self-starting at low wind speeds, high RPM, and a compact design. The hypothesis of Fibonacci-Spiral superiority is not fully proven, but these findings contribute to biomimetic renewable energy development in Indonesia's maritime sector, current and future practical applications.

Keywords: Wind Turbine, Darrieus, Fibonacci-Spiral, CFD, Aerodynamics

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis haturkan kepada Tuhan YME, Tuhan Yesus Kristus, atas kasih dan bimbingan-Nya yang setia menemani setiap langkah dalam perjalanan panjang ini. Tidak ada satu pun bagian dari proses ini yang penulis jalani tanpa pertolongan-Nya, mulai dari hari pertama duduk di bangku perkuliahan, melewati ujian-ujian yang kadang terasa tidak adil, hingga akhirnya mencapai titik ini penyelesaian skripsi sebagai penutup dari sebuah babak yang sangat berharga. Skripsi yang berjudul " Studi Komparatif Performa Aerodinamika Turbin Angin *Darrieus* (VAWT) Dan *Fibonacci* (HAWT) Melalui Simulasi CFD Untuk Aplikasi Listrik Cadang Di Kapal *Offshore* (FPSO)" ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Terapan pada Program Studi Teknologi Rekayasa Konstruksi Perkapalan, Sekolah Vokasi, Universitas Diponegoro.

Proses penyusunannya tidak selalu berjalan dengan lancar. Terdapat masa-masa ketika semangat terasa menurun, saat data tidak memberikan hasil seperti yang diharapkan, dan ketika satu hari terasa tidak cukup untuk menyelesaikan semua yang harus dituntaskan. Namun, justru dalam proses tersebut penulis banyak belajar, tidak hanya mengenai ilmu, tetapi juga tentang ketekunan, tanggung jawab, dan makna dari sebuah komitmen. Penulis sepenuhnya menyadari bahwa skripsi ini tidak akan terwujud tanpa bantuan, bimbingan, dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, dengan sepuh hati, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada mereka yang telah berkontribusi dalam perjalanan ini.

1. Kepada Kepala Program Studi Teknologi Rekayasa Konstruksi Perkapalan Bapak Dr. Mohd. Ridwan, S.T., M.T. , penulis mengucapkan terima kasih atas kepemimpinan yang Bapak berikan kepada seluruh mahasiswa.
2. Kepada Dosen Pembimbing Bapak M. Sawal Baital, S.T., M.T. penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih yang mendalam. Kesabaran Bapak dalam menghadapi setiap pertanyaan, setiap revisi, dan setiap ketidakpastian yang penulis bawa ke meja bimbingan adalah sesuatu yang akan selalu diingat oleh penulis. Terima kasih telah mempercayai kemampuan penulis, bahkan ketika penulis sendiri masih meragukannya.
3. Kepada Dosen Penguji Prof. Dr.Eng. Ahmad Fauzan Zakki, S.T., M.T., IPM., MRINA dan Dr. Aulia Windyandari S.T., M.T. yang telah menilai, mengevaluasi dan memberikan arahan serta masukan guna menyempurnakan hasil akhir dari Tuhas Akhir.
4. Kepada seluruh asisten dosen di laboratorium Komputer TRKP, penulis mengucapkan terima kasih atas waktu dan kesediaan kalian dalam membantu penulis selama proses penelitian berlangsung.
5. Kepada Bapak Sarman Hendrik Marpaung, papa yang paling hebat dan penulis cintai. Ada banyak hal yang ingin penulis katakan, tetapi rasanya kata-kata tidak pernah cukup untuk mewakili semuanya. Papa tidak pernah banyak bicara tentang pengorbanan dan mungkin justru karena itulah penulis memahaminya lebih dalam. Penulis melihatnya dari hal-hal yang kecil, dari Papa yang berangkat pagi dan pulang malam tanpa keluhan, dari Papa yang selalu memastikan semuanya baik-baik saja meski penulis tidak pernah bertanya secara langsung. Kepercayaan Papa adalah beban yang penulis pilih dengan senang hati untuk dipikul, karena di dalamnya tersimpan cinta yang nyata. Terima kasih, Papa. Semoga skripsi ini bisa menjadi satu dari sekian banyak hal yang membuat Papa tersenyum bangga.
6. Kepada Ibu Ramsida Pakpahan, Mama yang paling penulis sayangi. Penulis tumbuh dalam doa-doa Mama yang tidak selalu penulis dengar secara langsung, tetapi selalu penulis rasakan dampaknya. Mama adalah orang yang pertama kali penulis ingin kabari ketika ada kabar baik dan orang yang paling penulis cari ketika sesuatu terasa berat. Terima kasih sudah menjadi tempat penulis pulang, bukan hanya secara fisik, tetapi juga dalam pikiran, di hari-hari ketika jauh terasa sangat jauh. Terima kasih sudah menjadi

sahabat terbaik yang selalu mau mendengarkan. Ketenangan Mama mengajarkan penulis bahwa tidak semua hal perlu direspons dengan panik, dan bahwa kasih sayang yang tulus selalu menemukan jalannya. Penulis menyayangi Mama, lebih dari yang pernah penulis ungkapkan.

7. Kepada adik-adik yang terkasih, Dea dan Pangeran, penulis mengucapkan terima kasih karena telah menjadi bagian dari rumah yang selalu penulis rindukan. Mungkin kalian tidak menyadarinya, tetapi kehadiran kalian adalah salah satu alasan mengapa penulis ingin segera menyelesaikan ini dan kembali.
8. Kepada sahabat sekaligus manusia terdekat penulis, Nuur Luthfia Setyaningtyas, penulis tidak yakin banyak orang yang dapat melewati fase maba, organisasi, magang komprehensif hingga skripsi dengan satu orang yang sama. Kita telah melakukannya dan penulis percaya itu bukanlah kebetulan. Terima kasih telah hadir sejak hari pertama hingga di empat tahun perjalanan akademik ini. Kamu tahu persis kapan penulis membutuhkan dorongan, kapan butuh didengarkan, dan kapan hanya butuh seseorang yang duduk diam bersama tanpa perlu berbicara. Persahabatan seperti ini tidak datang dua kali, dan penulis bersyukur telah menemukanmu di sini.
9. Kepada Dewi dan Iqbal, teman magang yang membuat hari-hari kerja terasa lebih ringan dan berarti. Kenangan-kenangan kecil yang kita lalui bersama selama masa magang, baik yang menyenangkan maupun yang melelahkan, akan selalu penulis ingat. Kepada seluruh keluarga besar Engineering VME PROCESS (Pak Rizal, Pak Gunawan dan Kak Yunus), terima kasih atas pengalaman, ilmu, dan suasana kerja yang menjadi bekal penulis hingga saat ini. Penulis banyak belajar dari lingkungan yang kalian ciptakan.
10. Kepada semua anggota Pengurus Harian BEM SV 2024 dan PPI 2023, terima kasih atas setiap proses yang telah kita jalani bersama. Berorganisasi di tengah kesibukan akademik tidak selalu mudah, tetapi di sinilah penulis belajar banyak hal yang tidak diajarkan di dalam kelas tentang komunikasi, tentang pengambilan keputusan di bawah tekanan, dan tentang bagaimana sebuah tim yang baik berfungsi.
11. Kepada Salma, Savira, Nadine, dan Audy, terima kasih telah menjadi ruang yang aman untuk mengekspresikan diri. Di tengah segala kesibukan dan tekanan yang datang silih berganti, kalian adalah momen tenang yang sangat dibutuhkan penulis.
12. Kepada keluarga Mendua, lingkaran Wakil Ketua BEM Undip 2024, penulis mengucapkan terima kasih atas ikatan yang terbentuk dari tanggung jawab yang kita jalani bersama. Kebersamaan kalian adalah salah satu hal yang membuat penulis mengenang masa-masa itu dengan senyuman.
13. Kepada Kak Nadra dan Kak Fera, sahabat sekaligus sosok kakak bagi penulis, yang sudah setia menemani penulis sejak masa pencarian kampus hingga di fase ini.
14. Kepada seluruh keluarga Teknologi Rekayasa Konstruksi Perkapalan NASA 2022, angkatan yang penulis banggakan sejak hari pertama. Penulis merasa bahagia bisa menjadi bagian dari angkatan ini, dari awal yang canggung hingga akhir yang mengharukan. Semoga setelah ini, kita semua menemukan jalan masing-masing dan tetap membawa nama angkatan ini dengan baik.
15. Serta seluruh pihak yang telah membantu dalam proses penulisan laporan tugas akhir ini baik secara langsung maupun tidak langsung.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih memiliki keterbatasan dan jauh dari sempurna. Kritik serta saran yang membangun akan penulis terima dengan terbuka sebagai bahan perbaikan di masa mendatang. Penulis berharap karya ini dapat memberikan manfaat, sekecil apa pun, bagi pembaca dan bagi perkembangan ilmu pengetahuan di bidang yang penulis tekuni.

DAFTAR ISI

LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN	i
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
TUGAS AKHIR.....	iii
ABSTRAK	v
ABSTRACT.....	vii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR TABEL.....	xvii
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR ISTILAH	xxi
DAFTAR RUMUS DAN PERSAMAAN.....	xxiii
DAFTAR NOTASI	xxv
BAB I.....	2
1.1 Latar Belakang.....	2
1.2 Rumusan Masalah.....	4
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Manfaat Penelitian	4
1.5 Batasan Masalah.....	5
1.6 Hipotesis.....	6
1.7 Luaran Penelitian.....	6
BAB II.....	8
2.1. Energi Angin	8
2.1.1. Energi Angin.....	8
2.1.2. Potensi Angin Laut Indonesia	8
2.1.3. Kecepatan Angin dan Keterkaitannya dengan Operasi Turbin Angin	10
2.2 Turbin Angin	11
2.2.1. Turbin Angin Modern	11
2.2.2. Komponen Turbin.....	12
2.2.3. Jenis Turbin Berdasarkan Letak Sumbu Rotor.....	14
2.3 Turbin Angin Darrieus	16

2.3.1.	Sejarah dan Pengembangan Turbin Darrieus	16
2.3.2.	Prinsip Kerja Dan Dominasi Gaya Angkat Dengan Profil Bilah NACA.	17
2.3.3.	Penelitian Terdahulu tentang Aerodinamika Turbin Darrieus	18
2.4	Turbin Angin Fibonacci-Spiral.....	18
2.4.1.	Deret Fibonacci dan Golden Ratio	18
2.4.2.	Sejarah dan Pengembangan Turbin Angin Fibonacci-Spiral	19
2.4.3.	Prinsip Kerja Turbin Angin Fibonacci	20
2.4.4.	Penelitian Terdahulu tentang Aerodinamika Turbin Fibonacci	20
2.5	AIRFOILS	21
2.5.1.	Bagian Bagian Airfoils.....	21
2.5.2.	Airfoil NACA (National Advisory Committee for Aeronautics).....	22
2.5.3.	Sifat-sifat Airfoil.....	22
2.6	Computational Fluid Dynamics (CFD)	23
2.7	ANSYS FLUENT.....	23
2.7.1.	Jenis – Jenis Elemen Mesh.....	24
2.7.2.	Model – Model Turbulensi.....	27
2.8	Formulasi Matematis Yang Digunakan	28
2.8.1	Prinsip Dasar Konversi Energi Angin.....	28
2.8.2	Daya Turbin Angin	29
2.8.3	Tip Speed Ratio (TSR).....	29
2.8.4	Koefisien Daya (C_p)	30
2.8.5	Koefisien Torsi (C_t)	30
2.8.6	Teori Momentum dan Model Actuator Disc	32
2.8.7	Faktor Induksi Aksial.....	32
2.8.8	Koefisien Lift dan Drag	33
2.8.9	Batas Betz	34
BAB III	36
3.1	Flow Chart	36
3.1.1	Studi Literatur	36
3.1.2	Pengumpulan Data	37
3.1.3	Pemodelan 3D Model.....	37
3.1.4	Mesh Generation.....	37
3.1.5	Simulasi Ansys.....	37

3.1.6	Mesh Independence Test.....	37
3.1.7	Analisa dan Kesimpulan	37
3.2	Metode Penelitian	38
3.3	Jenis Penelitian	38
3.4	Variabel Penelitian	38
3.4.1	Variabel Bebas	38
3.4.2	Variabel Terikat	38
3.4.3	Variabel Kontrol	38
3.5	Tempat Pelaksanaan Penelitian	38
3.6	Jadwal Kegiatan.....	39
3.7	Teknik Pengumpulan Data	39
3.8	Teknik Analisis Data	41
3.8.1	Evaluasi Parameter Kinerja (Cp & Ct).....	41
3.8.2	Visualisasi Aerodinamika (Streamline Analysis).....	41
3.8.3	Interpretasi Untuk Aplikasi Kapal	41
3.9	Instrumen Penelitian.....	41
3.9.1.	Perangkat Keras (Hardware).....	41
3.9.2.	Perangkat Lunak (Software)	42
3.9.3.	Database Lingkungan.....	42
BAB IV	44
4.1	Hasil Pemodelan 3D	44
4.1.1.	Pemodelan 3D Turbin Fibonacci-Spiral (HAWT).....	44
4.1.2.	Pemodelan 3D Turbin Darrieus (VAWT).....	44
4.2	Simulasi RPM Turbin Fibonacci-Spiral	45
4.2.1.	Alur Umum Simulasi CFD Menggunakan Ansys Fluent.....	45
4.2.2.	Hasil Geometry	46
4.2.3.	Proses Mesh	46
4.2.4.	Setup Yang Digunakan	46
4.2.5.	Validasi Mesh Independence & RPM.....	48
4.3	Simulasi RPM Turbin Darrieus	50
4.3.1.	Alur Umum Simulasi CFD Menggunakan Ansys Fluent.....	50
4.3.2.	Hasil Geometry	50
4.3.3.	Proses Mesh	51

4.3.4.	Setup Yang Digunakan	51
4.3.5.	Validasi Mesh Independence & RPM.....	52
4.4	Simulasi Torsi Turbin Fibonacci-Spiral	54
4.4.1.	Alur Umum Simulasi CFD Menggunakan Ansys Fluent.....	54
4.4.2.	Hasil Geometry	54
4.4.3.	Proses Mesh	54
4.4.4.	Setup Yang Digunakan	54
4.4.5.	Hasil Simulasi	55
4.5	Simulasi Torsi Turbin Darrieus	55
4.5.1.	Alur Umum Simulasi CFD Menggunakan Ansys Fluent.....	55
4.5.2.	Hasil Geometry	55
4.5.3.	Proses Mesh	56
4.5.4.	Setup Yang Digunakan	56
4.5.5.	Hasil Simulasi	56
4.6	Hasil Simulasi Aerodinamika Turbin Fibonacci-Spiral (HAWT)	58
4.6.1.	Konvergensi Residual Simulasi	58
4.6.2.	Karakteristik Tekanan pada Bilah Turbin Fibonacci-Spiral.....	62
4.6.3.	Koefisien Torsi (Ct) Turbin Fibonacci-Spiral.....	64
4.6.4.	Koefisien Daya (Cp) dan Tip Speed Ratio	66
4.7	Hasil Simulasi Aerodinamika Turbin Darrieus (VAWT).....	68
4.7.1.	Konvergensi Residual Turbin	68
4.7.2.	Karakteristik Tekanan pada Bilah Turbin Darrieus	72
4.7.3.	Koefisien Torsi (Ct) Turbin Darrieus.....	73
4.7.4.	Koefisien Daya (Cp) dan Tip Speed Ratio	76
4.8	Analisis Perbandingan Kinerja Turbin Fibonacci-Spiral dan Darrieus.....	77
4.8.1.	Perbandingan Nilai Cp	77
4.8.2.	Perbandingan Nilai Ct.....	78
4.8.3.	Perbandingan Nilai TSR	78
4.9	Pembahasan	79
4.9.1.	Kesetaraan Luas Sapuan Sebagai Basis Perbandingan	79
4.9.2.	Implikasi Perbedaan Model Turbulensi Terhadap Keandalan Hasil	79
4.9.3.	Interpretasi Hasil terhadap Hipotesis Penelitian	80
4.9.4.	Keunggulan dan Keterbatasan Masing-Masing Desain Turbin.....	81

4.9.5. Implikasi Hasil untuk Aplikasi di Kapal Offshore (FPSO).....	82
BAB V	84
5.1. Kesimpulan.....	84
5.2. Saran.....	84
DAFTAR PUSTAKA	86
LAMPIRAN	92

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Kecepatan Angin Laut Rata Rata di beberapa Wilayah Indonesia.....	9
Tabel 2. 2 Kecepatan Angin Berdasarkan Sujitno Ah.M.G, 1978	10
Tabel 2. 3 Golden Ratio dan Deret Fibonacci	19
Tabel 3. 1 Jadwal Kegiatan Proyek Penelitian Komperatif Aerodinamika Turbin Darrieus dan Turbin Fibonacci-Spiral	39
Tabel 3. 2 Data Kecepatan Angin offshore Jeneponto (sumber : BMKG Stasiun Meteorologi Maritim Paotere)	40
Tabel 3. 3 Data Geometri Turbin Darrieus & Turbin Fibonacci - Spiral	41
Tabel 3. 4 CFD METODOLOGI	42
Tabel 4. 1 Ukuran Utama Turbin Fibonacci-Spiral.....	44
Tabel 4. 2 Ukuran Utama Turbin Darrieus.....	44
Tabel 4. 3 Perbandingan antara 2 Turbin	45
Tabel 4. 4 Ukuran Domain.....	46
Tabel 4. 5 Mesh Independence Turbin Fibonacci-Spiral	49
Tabel 4. 6 Hasil Simulasi I Turbin Fibonacci-Spiral.....	50
Tabel 4. 7 Mesh Independence Test.....	52
Tabel 4. 8 Hasil Simulasi I Turbin Darrieus	53
Tabel 4. 9 Hasil Simulasi I Turbin Fibonacci-Spiral & Turbin Darrieus	53
Tabel 4. 10 Ukuran Mesh Simulasi Torsi Turbin Fibonacci-Spiral	54
Tabel 4. 11 Hasil Simulasi II Turbin Fibonacci-Spiral	55
Tabel 4. 12 Hasil Simulasi II Turbin Fibonacci-Spiral	57
Tabel 4. 13 Hasil Simulasi Turbin Fibonacci-Spiral & Turbin Darrieus	57
Tabel 4. 14 Variabel Residual dalam Simulasi Fibonacci-Spiral.....	58
Tabel 4. 15 Rangkuman Hasil Simulasi II Turbin Fibonacci-Spiral	62
Tabel 4. 16 RPM, Torsi, TSR dan Ct Turbin Fibonacci-Spiral.....	66
Tabel 4. 17 Hubungan Cp - TSR Turbin Fibonacci-Spiral	67
Tabel 4. 18 Perbandingan Daya yang Dihasilkan Turbin Fibonacci-Spiral dengan Betz Limit...67	67
Tabel 4. 19 Parameter Residual Simulasi Darrieus	68
Tabel 4. 20 Rangkuman Hasil Simulasi II Turbin Darrieus	71
Tabel 4. 21 RPM, Torsi, TSR, dan Ct Turbin Darrieus.....	75
Tabel 4. 22 Hubungan Cp – TSR Turbin Darrieus.....	76
Tabel 4. 23 Perbandingan Daya yang Dihasilkan Turbin Darrieus dengan Betz Limit	77
Tabel 4. 24 Perbandingan Hasil antara Turbin Fibonacci-Spiral & Turbin Darrieus.....	79
Tabel 4. 25 Perbandingan antara Hasil Penelitian dan Hipotesis Penelitian	80
Tabel 4. 26 Keunggulan dan Keterbatasan Masing Masing Turbin	82

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Wind-Powered Cargo Ships the Future of the Shipping Industry	2
Gambar 2. 1 Komponen VAWT	14
Gambar 2. 2 Komponen HAWT	14
Gambar 2. 3 Jenis – Jenis Turbin Angin <i>Darrieus</i>	17
Gambar 2. 4 Turbin Angin Fibonacci	20
Gambar 2. 5 Bagian bagian potongan pada <i>airfoil</i>	21
Gambar 2. 6 <i>Airfoil</i> NACA 0015	22
Gambar 2. 7 Gaya <i>lift</i> , <i>drag</i> , dan <i>pitching</i>	33
Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian	36
Gambar 4. 1 Tampak Depan Turbin Fibonacci-Spiral	44
Gambar 4. 2 Tampilan Isometrik Dari Turbin Fibonacci-Spiral	44
Gambar 4. 3 Iso view Turbin Darrieus	45
Gambar 4. 4 Tampak Depan Turbin Darrieus	45
Gambar 4. 5 Pemilihan Mesh Final Turbin Fibonacci-Spiral	49
Gambar 4. 6 Pemilihan Mesh Final Turbin Darrieus	52
Gambar 4. 7 Grafik Simulasi II Turbin Fibonacci-Spiral 2 m/s Konvergensi di iterasi 818	59
Gambar 4. 8 Grafik Simulasi II Turbin Fibonacci-Spiral 4 m/s Konvergensi di iterasi 886	60
Gambar 4. 9 Grafik Simulasi II Turbin Fibonacci-Spiral 10 m/s Konvergensi di iterasi 895	61
Gambar 4. 10 Pressure Turbin Fibonacci-Spiral Pada Kecepatan 2 m/s	63
Gambar 4. 11 Pressure Turbin Fibonacci-Spiral Pada Kecepatan 4 m/s	63
Gambar 4. 12 Pressure Turbin Fibonacci-Spiral Pada Kecepatan 10 m/s	64
Gambar 4. 13 Grafik Moment Simulasi II Turbin Fibonacci-Spiral Kecepatan 2 m/s	64
Gambar 4. 14 Grafik Moment Simulasi II Turbin Fibonacci-Spiral Kecepatan 4 m/s	65
Gambar 4. 15 Grafik Moment Simulasi II Turbin Fibonacci-Spiral Kecepatan 10 m/s	65
Gambar 4. 16 Grafik Simulasi II Turbin Darrieus Kecepatan 2 m/s Konvergensi di iterasi 624	69
Gambar 4. 17 Grafik Simulasi II Turbin Darrieus Kecepatan 4 m/s Konvergensi di iterasi 697	70
Gambar 4. 18 Grafik Simulasi II Turbin Darrieus Kecepatan 10 m/s Konvergensi di iterasi 71	71
Gambar 4. 19 Pressure Turbin Darrieus kecepatan 2 m/s	72
Gambar 4. 20 Pressure Turbin Darrieus kecepatan 4 m/s	73
Gambar 4. 21 Pressure Turbin Darrieus kecepatan 10 m/s	73
Gambar 4. 22 Grafik Momen Simulasi II Turbin Darrieus Kecepatan 2 m/s	74
Gambar 4. 23 Grafik Momen Simulasi II Turbin Darrieus Kecepatan 4 m/s	74
Gambar 4. 24 Grafik Momen Simulasi II Turbin Darrieus Kecepatan 10 m/s	75

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISTILAH

<i>Darrieus</i>	= Jenis Turbin Angin Sumbu Vertikal (VAWT)
Fibonacci	= Deret Bilangan Dengan Pola Penjumlahan Dua Suku Sebelumnya.
Golden Ratio	= Rasio Matematis Bernilai $\pm 1,618$.
VAWT	= <i>Vertical Axis Wind Turbine</i>
HAWT	= <i>Horizontal Axis Wind Turbine</i>
IMO	= <i>International Maritime Organization</i>
<i>Net-Zero Emission</i>	= Keseimbangan Emisi Gas Rumah Kaca.
<i>Offshore</i>	= Area Atau Instalasi Yang Berada Di Laut.
<i>Onshore</i>	= Area Atau Instalasi Yang Berada Di Darat.
FPSO	= <i>Floating Production Storage And Offloading</i>
<i>Self-Starting</i>	= Kemampuan Turbin Untuk Mulai Berputar Tanpa Bantuan Eksternal.
<i>Compact</i>	= Desain Dengan Ukuran Relatif Kecil Dan Efisien Terhadap Ruang.
TSR	= <i>Tip Speed Ratio</i>
<i>Omnidirectional</i>	= Mampu Menerima Aliran Angin Dari Segala Arah.
<i>Drag</i>	= Gaya Hambat Yang Bekerja Sejajar Arah Aliran Fluida.
<i>Lift</i>	= Gaya Angkat Yang Bekerja Tegak Lurus Terhadap Arah Aliran Fluida.
<i>Green Shipping</i>	= Konsep Pelayaran Ramah Lingkungan Dengan Pengurangan Emisi.
CFD	= <i>Computational Fluid Dynamics</i>
<i>Wind Shear</i>	= Perubahan Kecepatan Atau Arah Angin Terhadap Ketinggian.
<i>Overspeed</i>	= Kondisi Kecepatan Putar Turbin Melebihi Batas Aman Operasi.
<i>Drag-Based</i>	= Prinsip Kerja Turbin Yang Memanfaatkan Gaya Hambat (<i>Drag</i>).
<i>Lift-Based</i>	= Prinsip Kerja Turbin Yang Memanfaatkan Gaya Angkat (<i>Lift</i>).
NACA	= <i>National Advisory Committee For Aeronautics</i>
<i>Betz Limit Theory</i>	= Teori Batas Maksimum Efisiensi Konversi Energi Angin 59,3%.
<i>Solidity</i>	= Perbandingan Luas Total Sudu Terhadap Luas Sapuan Rotor.
<i>Meshing</i>	= Proses Pembagian <i>Domain</i> Simulasi Menjadi Elemen-Elemen Kecil.
K- Ω SST	= Model Turbulensi Yang Menggabungkan Model K- Ω Dan K-E.
<i>Boundary Layer</i>	= Lapisan aliran fluida dekat permukaan benda.
<i>Grid</i>	= Jaringan elemen pada <i>domain</i> simulasi.
<i>Incompressible</i>	= Kondisi fluida dengan densitas konstan.

URANS = *Unsteady Reynolds-Averaged Navier–Stokes*
RANS = *Reynolds-Averaged Navier–Stokes*

DAFTAR RUMUS DAN PERSAMAAN

- (2.1) = Rumus Kecepatan Angin Pada Ketinggian Z
- (2.2) = Rumus Deret Fibonacci
- (2.3) = Rumus Golden Ratio
- (2.4) = Rumus Hubungan Deret Fibonacci & Goldem Ratio
- (2.5) = Rumus Energi Kinetik
- (2.6) = Rumus Daya
- (2.7) = Rumus Laju Aliran Udara
- (2.8) = Rumus Total Daya
- (2.9) = Rumus Daya Yang Dihasilkan Turbin
- (2.10) = Rumus Dasar Tip Speed Ratio
- (2.11) = Rumus Persamaan Tip Speed Ratio
- (2.12) = Rumus Koefisien Daya
- (2.13) = Rumus Hubungan Koefisien Daya & Koefisien Momen
- (2.14) = Rumus Koefisien Torsi
- (2.15) = Rumus Hubungan Koefisien Torsi & Koefisien Daya
- (2.16) = Rumus Gaya Tangensial Bilah Ke-N
- (2.17) = Rumus Torsi Pada Bilah Ke-N
- (2.18) = Rumus Torsi Total Untuk Turbin *Fibonacci-Spiral* Dengan N
- (2.19) = Rumus Rata-Rata Torsi Total
- (2.20) = Rumus Koefisien Torsi Total
- (2.21) = Rumus Gaya Dorong
- (2.22) = Rumus Kecepatan Rata-Rata Di Bidang Rotor
- (2.23) = Rumus Energi Mekanik Yang Diserap Oleh Rotor
- (2.24) = Rumus Kecepatan Angin Di Bidang Rotor
- (2.25) = Rumus Kecepatan Di Belakang Rotor
- (2.26) = Rumus Daya Yang Diserap Rotor
- (2.27) = Rumus Koefisien *Lift*
- (2.28) = Rumus Koefisien Drag
- (2.29) = Rumus RPM

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR NOTASI

$v(z)$	= Kecepatan Angin Pada Ketinggian z ,
$v(z_{\text{Ref}})$	= Kecepatan Angin Pada Ketinggian Referensi,
α	= Koefisien <i>Wind Shear</i>
$K E$	= Energi Kinetik
P	= Daya
ρ	= Densitas Udara
A	= Area
T	= Torsi (N.M)
ω	= Kecepatan Sudut (Rad/S)
λ	= Tip Speed Ratio
N	= Kecepatan Sudut Rotor Turbin (Rad/S)
R	= Jari-Jari Rotor (M)
C_p	= Koefisien Daya
C_m	= Koefisien Momen
C_T	= Koefisien Torsi
$F_{t,n}$	= Gaya Tangensial Bilah Ke-N (N)
L_n	= Gaya Angkat Bilah Ke-N (N)
D_n	= Gaya Hambat Bilah Ke-N (N)
ϕ_n	= Sudut Relatif Antara Arah Angin Dan Bidang Rotasi Bilah ($^\circ$)
r_n	= Jarak Radial Posisi Bilah Ke-N Dari Pusat Rotor.
$F_{t,n}$	= Gaya Tangensial Bilah Ke-N (N)
T	= Gaya Dorong (N)
$\dot{m} (\rho A v)$	= Laju Massa Udara Melewati Rotor (Kg/S)
V_1	= Kecepatan Angin Sebelum Rotor (/S)
V_2	= Kecepatan Angin Setelah Rotor (M/S)
A	= Faktor Induksi Aksial ($0 \leq A \leq 0.5$)
C_D	= Koefisien <i>Drag</i>
C_L	= Koefisien <i>Lift</i>
r_c	= Panjang <i>Airfoil</i> , Chord (m)
V_0	= Kecepatan Awal Udara (m/s)
F_L	= Gaya <i>Lift</i> (N)
F_D	= Gaya <i>Drag</i> (N)

Halaman ini sengaja dikosongkan