



PROYEK TUGAS AKHIR
TEKNOLOGI REKAYASA KONSTRUKSI PERKAPALAN
STUDI KOMPARATIF PERFORMA AERODINAMIKA TURBIN
ANGIN FIBONACCI DAN SAVONIUS SEBAGAI ENERGI
ALTERNATIF *AUXILIARY POWER BULK CARRIER AT BERTH*:
PENDEKATAN CFD

Diajukan sebagai persyaratan
untuk memperoleh gelar Sarjana Terapan

Disusun oleh:

Nuur Luthfia Setyaningtyas
40040422650038

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

2026

LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN

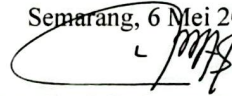
Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Nuur Luthfia Setyaningtyas
NIM : 40040422650038
Fakultas : Sekolah Vokasi
Prodi : Teknologi Rekayasa Konstruksi Perkapalan
Judul Penelitian Terapan : Studi Komparatif Performa Aerodinamika Turbin Angin Fibonacci dan Savonius Sebagai Energi Alternatif *Auxiliary Power Bulk Carrier At Berth*: Pendekatan CFD

Dengan ini saya menyatakan bahwa Laporan Tugas Akhir yang saya susun adalah sepenuhnya hasil karya saya sendiri, tanpa adanya penjiplakan atau plagiasi dari karya orang lain, baik sebagian maupun keseluruhan. Semua sumber data, teori, dan kutipan yang digunakan dalam penulisan ini telah dicantumkan dengan jelas sesuai dengan kaidah penulisan ilmiah.

Apabila di kemudian hari terbukti bahwa Laporan Tugas Akhir ini merupakan hasil plagiasi atau terdapat pelanggaran terhadap etika akademik, maka saya bersedia menerima segala bentuk sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di institusi saya. Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya untuk digunakan sebagaimana mestinya.

Semarang, 6 Mei 2026



Nuur Luthfia Setyaningtyas
NIM. 40040422650038

Halaman ini sengaja dikosongkan

HALAMAN PENGESAHAN TUGAS AKHIR

Studi Komparatif Performa Aerodinamika Turbin Angin Fibonacci Dan Savonius Sebagai Energi Alternatif *Auxiliary Power Bulk Carrier At Berth*: Pendekatan CFD

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

Oleh:

Nuur Luthfia Setyaningtyas

40040422650038

Diajukan pada
Sidang Tugas Akhir
Tanggal 6 Mei 2026

Dinyatakan Lulus/Tidak Lulus
Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Konstruksi Perkapalan

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

Pembimbing



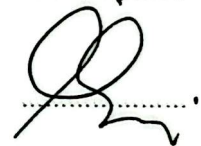
Dr. Aulia Windyandari, S.T., M.T.

Penguji 1



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

Penguji 2



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

Kapal *bulk carrier* memerlukan *auxiliary power* saat berlabuh yang signifikan namun bergantung pada generator diesel yang tidak efisien dan menghasilkan emisi tinggi. Turbin Savonius memiliki keunggulan *self-starting* dan struktur sederhana, namun efisiensi koefisien daya (C_p) rendah akibat torsi negatif dan vortex shedding intensif. Geometri spiral Fibonacci berbasis *golden ratio* mempunyai transisi kelengkungan yang halus, yang dapat mengurangi gradien tekanan yang merugikan dan menunda pemisahan aliran.

Metode penelitian yang digunakan adalah simulasi Computational Fluid Dynamics (CFD) dengan ANSYS Fluent, menggunakan model turbulensi $k-\omega$ SST, serta pendekatan Multiple Reference Frame (MRF) *steady-state*. Dua konfigurasi turbin dengan dimensi yang setara disimulasikan pada kecepatan angin 2-5 m/s, berdasarkan data aktual dari Pelabuhan Tanjung Perak. Parameter yang dievaluasi mencakup koefisien daya (C_p), koefisien torsi (C_t), dan *tip speed ratio* (TSR).

Berdasarkan analisis komparatif, turbin Fibonacci direkomendasikan sebagai desain optimal untuk aplikasi *auxiliary power bulk carrier at-berth* di pelabuhan Tanjung Perak Surabaya dengan keunggulan efisiensi energi dan stabilitas operasional. Dengan progresivitas kelengkungan menghasilkan C_p 15-20% lebih tinggi, serta pengurangan fluktuasi torsi hingga 33% jika dibandingkan dengan turbin Savonius konvensional.

Kata kunci: VAWT, Fibonacci spiral, Savonius, CFD, dekarbonisasi maritim, *auxiliary power*.

Halaman ini sengaja dikosongkan

ABSTRACT

Bulk carriers require significant auxiliary power while docked, but rely on inefficient diesel generators that produce high emissions. Savonius turbines have the advantages of self-starting and simple structure, but their power coefficient (C_p) efficiency is low due to negative torque and intense vortex shedding. Fibonacci spiral geometry based on the golden ratio has a smooth curvature transition, which can reduce detrimental pressure gradients and delay flow separation.

The research method used was Computational Fluid Dynamics (CFD) simulation with ANSYS Fluent, using the $k-\omega$ SST turbulence model and the steady-state Multiple Reference Frame (MRF) approach. Two turbine configurations with equivalent dimensions were simulated at wind speeds of 2-5 m/s, based on actual data from Tanjung Perak Port. The parameters evaluated included the power coefficient (C_p), torque coefficient (C_t), and tip speed ratio (TSR).

Based on comparative analysis, the Fibonacci turbine is recommended as the optimal design for auxiliary power bulk carrier at-berth applications in Tanjung Perak Port, Surabaya, with advantages in energy efficiency and operational stability. The progressive curvature results in a 15-20% higher C_p and a reduction in torque fluctuations of up to 33% compared to conventional Savonius turbines.

Keywords: *VAWT, Fibonacci spiral, Savonius, CFD, maritime decarbonisation, auxiliary power.*

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah rabbil'alamin. Segala puji dan syukur ke hadirat Allah SWT, Tuhan Yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang, atas segala limpahan rahmat, kekuatan, dan kemudahan yang senantiasa diberikan kepada penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini. Shalawat serta salam semoga tercurah kepada Nabi Muhammad SAW, teladan terbaik sepanjang masa.

Tugas akhir ini merupakan salah satu syarat kelulusan pada Program Studi Teknologi Rekayasa Konstruksi Perkapalan, Fakultas Sekolah Vokasi, Universitas Diponegoro. Perjalanan menyusunnya bukanlah hal yang mudah. Ada malam-malam panjang yang dihabiskan dalam kegelisahan, ada pertanyaan-pertanyaan yang berulang kali hadir dalam diam dan ada kekhawatiran yang terkadang lebih besar dari keyakinan itu sendiri. Namun di balik semua itu, penulis belajar bahwa setiap proses yang dijalani dengan sungguh-sungguh tidak akan pernah sia-sia. Bahwa doa yang dipanjatkan di titik paling lelah sekalipun, selalu didengar oleh-Nya.

Tugas akhir ini penulis persembahkan dengan sepuh hati kepada seluruh pihak yang telah hadir, berkontribusi, dan meninggalkan jejak berarti dalam perjalanan ini:

1. Bapak Dr. Mohd. Ridwan, S.T., M.T. selaku Ketua Program Studi Teknologi Rekayasa Konstruksi Perkapalan, Universitas Diponegoro, atas kepemimpinan, dedikasi, serta perhatian yang telah menciptakan lingkungan akademik yang kondusif bagi seluruh mahasiswa, termasuk penulis, untuk terus bertumbuh dan berkembang.
2. Bapak Muhammad Sawal Baital, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing Tugas Akhir, yang dengan penuh kesabaran telah membimbing penulis dari awal hingga akhir proses penyusunan tugas akhir ini. Di tengah segala kebingungan dan keraguan yang menghampiri, setiap arahan, masukan, dan kepercayaan yang Bapak berikan menjadi penuntun langkah penulis untuk terus maju. Terima kasih atas waktu, ilmu, dan dedikasi yang telah Bapak curahkan.
3. Ibu Dr. Aulia Windyandari, S.T., M.T. dan Bapak Prof. Dr. Eng. Ahmad Fauzan Zakki, S.T., M.T., IPM., MRINA. selaku Dosen Penguji Tugas Akhir, atas setiap kritik, saran, dan evaluasi yang diberikan dengan penuh tanggung jawab dan integritas akademik. Setiap masukan yang diberikan bukan sekadar koreksi, melainkan bagian yang menyempurnakan dan mendewasakan karya ini menjadi lebih baik.
4. Seluruh Bapak/Ibu Dosen dan Tenaga Pendidik Program Studi Teknologi Rekayasa Konstruksi Perkapalan, Universitas Diponegoro, atas ilmu, pengalaman, dan nilai-nilai yang telah dididikkan dengan tulus selama masa perkuliahan. Semoga setiap ilmu yang penulis terima menjadi bekal yang bermanfaat.
5. Seluruh Asisten Dosen dan Laboran di lingkungan Program Studi Teknologi Rekayasa Konstruksi Perkapalan, atas bantuan teknis, fasilitas, kesabaran, dan dukungan yang turut memperlancar proses pembelajaran dan penelitian penulis selama masa studi.
6. Kepada tiga nama yang selalu menjadi sebutan pertama dalam setiap doa, Ayah Bagus Setyo Budi, Bunda Nurhayati, dan Kakak Annisaa Salma Nursetyaningtyas. Tidak ada kata yang benar-benar cukup untuk merangkum betapa besar perannya dalam perjalanan panjang ini. Di balik setiap halaman tugas akhir ini, tersimpan doa-doa yang tidak pernah putus dipanjatkan, air mata yang mungkin tidak pernah terlihat, serta pengorbanan yang tidak pernah sekalipun diungkapkan sebagai beban. Di saat penulis hampir kehilangan keyakinan, di saat malam terasa terlalu panjang dan jalan terasa terlalu berat. Ketiganya tetap ada, tetap percaya, tetap mendoakan. Karya ini adalah salah satu cara penulis berterima kasih atas segalanya, atas kasih sayang yang tidak pernah bersyarat, atas kepercayaan yang tidak pernah goyah, dan atas cinta yang tidak pernah meminta apa-apa untuk kembali.
7. Rasa syukur penulis pun turut mengalir kepada keluarga besar yang kehadirannya selalu menjadi kehangatan tersendiri, Tante Diana Rahmawati, Adik Yuwafi Muhammad Hamdan, Adik Ahmad Syafiqul Hikam, dan Adik Rahma Habibatul Milla. Di tengah perjalanan yang

tidak selalu mudah, perhatian kecil yang diberikan, doa yang turut dipanjatkan, serta kehadiran yang tidak pernah absen.

8. Sahabat yang telah hadir menemani sejak hari pertama menginjakkan kaki sebagai mahasiswa baru hingga malam terakhir menyelesaikan tugas akhir ini. Addelia Abigael, satu nama yang selalu ada di tengah menjalani malam-malam panjang yang dihabiskan tanpa tidur, ada tubuh yang dipaksakan tetap berdiri meski sedang sakit, ada rintik hujan yang harus diterjang bersama, ada layar laptop yang memudar di ujung mata yang sudah tidak sanggup terbuka. Dan di antara semua itu, ada momen-momen di mana kata-kata tidak lagi cukup hanya duduk berdampingan, menumpahkan segala lelah, kekhawatiran, dan uneg-uneg yang sudah terlalu lama disimpan sendirian. Tidak lahir dari keadaan yang mudah, melainkan dari proses yang justru paling berat.
9. Sosok yang perjalanannya dengan penulis tidak mudah untuk dirangkum dalam sekadar beberapa kalimat. Dimas Saputra, seseorang yang pernah pergi dan pada akhirnya singgah kembali dalam perjalanan hidup penulis. Tentang pergi dan kembali yang silih berganti, penulis belajar memaknai arti kedewasaan, kesabaran, dan keikhlasan yang sesungguhnya. Segala yang terjadi bukan sekadar berlalu, melainkan perlahan membentuk penulis menjadi pribadi yang lebih kuat dan lebih bijak dalam memandang hidup. Sebab luka dan kebahagiaan senantiasa hadir beriringan sebagai jalan menuju perubahan dan semoga setiap langkah yang diambil ke depan senantiasa menuju arah yang lebih baik.
10. Penulis juga menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada PT VME Process, Batam, atas kesempatan yang sangat berharga dalam menimba ilmu dan pengalaman secara langsung di lingkungan industri. Terima kasih secara khusus penulis sampaikan kepada Bapak Rizal, Bapak Gun, serta Kak Yunus selaku mentor yang telah membimbing dengan tulus, sabar, dan penuh dedikasi sepanjang pelaksanaan magang berlangsung. Ilmu praktis, kepercayaan, dan bimbingan yang diberikan tidak hanya berkontribusi secara langsung terhadap penyelesaian tugas akhir ini, tetapi juga membentuk kesiapan dan kematangan penulis sebagai calon tenaga profesional.
11. Dewi dan Iqbal, rekan satu divisi selama pelaksanaan magang industri, atas kebersamaan, kerja sama, dan semangat yang saling menguatkan di tengah ritme kerja yang padat. Kebersamaan dalam satu tim kecil tersebut menjadi kenangan yang tidak mudah terlupakan.
12. Teman-teman *Naval Architecture* Sahitya Adhigana Angkatan 2022, Program Studi Teknologi Rekayasa Konstruksi Perkapalan, atas solidaritas dan semangat kolektif yang mengalir sepanjang masa studi ini. Kalian adalah bagian dari cerita yang tidak akan pernah mudah untuk dilupakan.
13. Almameter tercinta, Universitas Diponegoro, tempat penulis menempa ilmu, melatih diri, dan bertumbuh menjadi pribadi yang lebih utuh. Semoga karya ini dapat menjadi salah satu wujud kontribusi kecil yang membanggakan bagi almameter.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa tugas akhir ini masih jauh dari sempurna. Segala kekurangan yang ada adalah bagian dari keterbatasan penulis sebagai manusia yang terus belajar. Oleh karenanya, kritik dan saran yang membangun senantiasa penulis harapkan demi perbaikan ke depan.

Akhir kata, semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat bagi penulis, bagi almameter, dan bagi siapa pun yang kelak membacanya. Dan kepada setiap orang yang telah hadir dalam perjalanan ini, baik dalam peran yang besar maupun kecil, dalam kebersamaan yang panjang maupun sekilas, terima kasih. Setiap kebaikan yang kalian berikan tidak pernah luput dari catatan-Nya.

DAFTAR ISI

LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN	i
HALAMAN PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	v
<i>ABSTRACT</i>	vii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xvii
DAFTAR NOTASI	xix
DAFTAR RUMUS	xxi
BAB 1 PENDAHULUAN	xxii
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Manfaat Penelitian	2
1.4.1 Manfaat Teoritis	2
1.4.2 Manfaat Praktis	3
1.5 Batasan Masalah	3
1.6 Hipotesis Penelitian	3
1.7 Luaran Penelitian	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Dekarbonasi Pelayaran dan Energi Terbarukan Maritim	5
2.1.1 Emisi Kapal <i>At-Berth</i> : Konteks Global dan Regulasi Indonesia	5
2.1.2 Wind-Assisted Ship Propulsion: Teknologi dan Keterbatasan	5
2.1.3 Potensi VAWT untuk <i>Auxiliary Power</i> Maritim	6
2.2 Prinsip Aerodinamika Turbin Angin	7
2.2.1 Konversi Energi Kinetik Angin	7
2.2.2 Parameter Performa: C_p , C_t , dan TSR	7
2.2.3 Mekanisme Aliran pada Turbin VAWT	8
2.3 Klasifikasi Turbin Angin Sumbu Vertikal	8
2.3.1 Drag-based vs Lift-based VAWT	8
2.3.2 Kriteria Pemilihan dalam Aplikasi Maritim	8

2.4	Turbin Savonius: Karakteristik dan Keterbatasan.....	13
2.4.1	Prinsip Operasi dan Parameter Geometri	13
2.4.2	Performa Aerodinamika: C_p , C_t , dan Distribusi Tekanan	14
2.4.3	Vortex Dynamics dan Flow Separation	14
2.5	Turbin Spiral Fibonacci: Prinsip <i>Golden Ratio</i>	15
2.5.1	<i>Golden Ratio</i> dalam Geometri Natural dan <i>Fluid Dynamics</i>	15
2.5.2	Aplikasi <i>Golden Ratio</i> pada Blade Design Turbin.....	17
2.5.3	Penelitian Terdahulu: <i>State of the Art</i>	17
2.6	Studi Komparatif Savonius vs Fibonacci dalam Literatur	19
2.6.1	Review Sistematis Penelitian Existing	19
2.6.2	Sintesis Performance Comparison dari Literatur.....	19
2.6.3	Gap Penelitian yang Teridentifikasi dari Komparasi Literatur	20
2.7	Metodologi CFD untuk Analisis Turbin VAWT.....	21
2.7.1	Multiple Reference Frame (MRF) dan Sliding Mesh Approach	22
2.7.2	Mesh Independence dan Solution Verification	23
2.7.3	Ansys Fluent untuk Simulasi VAWT	24
2.7.4	Pemilihan Lokasi Optimal dan Data Angin	24
2.7.5	Pemilihan Model Turbulensi RANS	26
2.8	Aplikasi VAWT pada Platform Maritim	27
2.8.1	Kebutuhan Auxiliary Power Bulk Carrier At-Berth	27
BAB III METODOLOGI PENELITIAN		31
3.1	Diagram Alir Penelitian (<i>Flowchart</i>).....	31
3.2	Jenis Pendekatan Penelitian	32
3.2.1	Jenis Penelitian	32
3.2.2	Paradigma Penelitian	33
3.2.3	Variabel Penelitian.....	33
3.3	Tempat Pelaksanaan Penelitian.....	34
3.4	Jadwal Penelitian	34
3.5	Instrumen Penelitian	35
3.5.1	Perangkat Lunak (<i>Software</i>)	35
3.6	Teknik Pengumpulan Data	35
3.6.1	Pemodelan Geometri	35
3.6.2	Generasi Mesh.....	36
3.6.3	Pengaturan Solver dan Simulasi	36
3.6.4	Ekstraksi Data.....	37

3.7	Teknik Analisis Data	38
3.7.1	Post-Processing Hasil Simulasi	38
3.7.2	Analisis Komparatif Kuantitatif	39
3.7.3	Interpretasi dan Sintesis	40
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....		43
4.1	Desain Geometri dan Konfigurasi Domain Simulasi	43
4.1.1	Geometri Turbin yang Disimulasikan.....	43
4.2	Simulasi Domain 1 (Perhitungan RPM)	44
4.2.1	Domain dan Mesh Turbin Fibonacci	44
4.2.2	Domain dan Mesh Turbin Savonius	45
4.2.3	Hasil RPM Turbin Fibonacci.....	46
4.2.4	Hasil RPM Turbin Savonius	47
4.2.5	Perbandingan RPM Turbin	48
4.3	Simulasi Domain 2 dengan <i>Rotor Zone</i> untuk Perhitungan Torsi.....	49
4.3.1	Domain dan <i>Rotor Zone</i> Turbin Fibonacci	49
4.3.2	Mesh Domain 2	50
4.3.3	Distribusi Tekanan Pada Turbin.....	52
4.3.4	Hasil Torsi Turbin.....	54
4.4	Analisis Performa Turbin.....	61
4.4.1	<i>Tip Speed Ratio</i> (TSR).....	61
4.4.2	<i>Coefficient of Torque</i> (Ct).....	62
4.4.3	<i>Coefficient of Power</i> (Cp)	63
4.4.4	Perbandingan Performa Turbin Fibonacci dan Savonius.....	64
BAB 5 PENUTUP		69
5.1	Kesimpulan.....	69
5.2	Saran	69
DAFTAR PUSTAKA		71
LAMPIRAN.....		75

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1	Geometrical parameters of modified Savonius rotor	13
Gambar 2. 2	Graphical representation of Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) types	21
Gambar 3. 1	Diagram Alir Penelitian	31
Gambar 3. 3	Schematic diagram of a two-bladed Savonius rotor at different angular positions	38
Gambar 4. 1	Model 3D Turbin Fibonacci.....	43
Gambar 4. 2	Model 3D Turbin Savonius.....	43
Gambar 4. 3	Geometri Domain 1 Turbin Fibonacci	44
Gambar 4. 4	Mesh Domain 1 Turbin Fibonacci	45
Gambar 4. 5	Geometri Domain 1 Turbin Savonius	45
Gambar 4. 6	Mesh Domain 1 Turbin Savonius.....	46
Gambar 4. 13	Grafik Perbandingan RPM Turbin Fibonacci dan Savonius	49
Gambar 4. 14	Geometri Domain 2 dengan RotorZone Turbin Fibonacci.....	50
Gambar 4. 15	Geometri Domain 2 dengan RotorZone Turbin Savonius.....	50
Gambar 4. 16	Mesh Domain 2 Turbin Fibonacci	51
Gambar 4. 17	Mesh Domain 2 Turbin Savonius.....	51
Gambar 4. 18	Kontur Tekanan Domain 2 Turbin Fibonacci Pada Kecepatan Angin 2 m/s..	52
Gambar 4. 19	Kontur Tekanan Domain 2 Turbin Fibonacci Pada Kecepatan Angin 3 m/s..	52
Gambar 4. 20	Kontur Tekanan Domain 2 Turbin Fibonacci Pada Kecepatan Angin 5 m/s..	53
Gambar 4. 21	Kontur Tekanan Domain 2 Turbin Savonius Pada Kecepatan Angin 2 m/s.....	53
Gambar 4. 22	Kontur Tekanan Domain 2 Turbin Savonius Pada Kecepatan Angin 3 m/s ...	54
Gambar 4. 23	Kontur Tekanan Domain 2 Turbin Savonius Pada Kecepatan Angin 5 m/s ...	54
Gambar 4. 24	Grafik Torsi Domain 2 Turbin Fibonacci Pada Kecepatan Angin 2 m/s	55
Gambar 4. 25	Grafik Torsi Domain 2 Turbin Fibonacci Pada Kecepatan Angin 3 m/s	56
Gambar 4. 26	Grafik Torsi Domain 2 Turbin Fibonacci Pada Kecepatan Angin 5 m/s	57
Gambar 4. 27	Grafik Torsi Domain 2 Turbin Savonius Pada Kecepatan Angin 2 m/s	58
Gambar 4. 28	Grafik Torsi Domain 2 Turbin Savonius Pada Kecepatan Angin 3 m/s	59
Gambar 4. 29	Grafik Torsi Domain 2 Turbin Savonius Pada Kecepatan Angin 5 m/s	60
Gambar 4. 30	Grafik Perbandingan Nilai Torsi Turbin Fibonacci dan Savonius.....	61
Gambar 4. 31	Grafik TSR Terhadap Kecepatan Angin.....	62
Gambar 4. 32	Grafik Ct Terhadap Kecepatan Angin	63
Gambar 4. 33	Grafik Cp Terhadap TSR	64
Gambar 4. 34	Grafik Perbandingan Parameter Performa Turbin pada Setiap Kecepatan Angin	65
Gambar 4. 35	Grafik Perbandingan Performa Optimum Turbin.....	66

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1	Komparasi Karakteristik VAWT Drag-based dan Lift-based.....	8
Tabel 2. 2	Comparative mechanism analysis vs alternatives.....	10
Tabel 2. 3	Optimasi Komparatif: Mengapa Golden ratio (1,618) dibandingkan Rasio Lain	16
Tabel 2. 4	Komparasi Penelitian Turbin Spiral Terdahulu.....	17
Tabel 2. 5	Sintesis Studi Komparatif Savonius vs Modified Geometry	19
Tabel 2. 6	Akurasi Prediksi Model Turbulensi untuk VAWT	21
Tabel 2. 7	Comparison MRF dan Sliding Mesh Approches	22
Tabel 2. 8	Mesh Independence Study Results	23
Tabel 2. 9	Perbandingan Karakteristik Data Angin Pelabuhan Utama Indonesia.....	Error!
Bookmark not defined.		
Tabel 2. 10	Statistik Angin Pelabuhan Tanjung Perak Januari 2023.....	25
Tabel 2. 11	Perbandingan Pendekatan Turbulensi	26
Tabel 2. 12	Distribusi Beban Kapal Bulk Carrier saat Berlabuh	27
Tabel 2. 13	Konfigurasi array multi-turbin untuk Aplikasi Maritim.....	28
Tabel 2. 14	Perbandingan data geometri Turbin Angin Fibonacci dan Savonius	36
Tabel 3. 1	Ringkasan Variabel Penelitian	33
Tabel 3. 2	Jadwal Kegiatan Proyek Penelitian.....	34
Tabel 4. 1	Hasil Tangential Velocity dan RPM Domain 1 Turbin Fibonacci.....	47
Tabel 4. 2	Hasil Tangential Velocity dan RPM Domain 1 Turbin Savonius	47
Tabel 4. 3	Perbandingan RPM Turbin	48
Tabel 4. 4	Hasil Torsi Turbi Fibonacci	55
Tabel 4. 5	Hasil Torsi Turbin Savonius.....	57
Tabel 4. 6	Perbandingan Hasil Nilai Torsi Turbin Fibonacci dan Savonius	60
Tabel 4. 7	Hasil Perhitungan TSR Turbin Fibonacci dan Savonius	62
Tabel 4. 8	Nilai Ct Turbin Fibonacci dan Savonius	62
Tabel 4. 9	Nilai Cp Turbin Fibonacci dan Savonius	63
Tabel 4. 10	Perbandingan Cp, Ct, TSR, dan Torsi	64
Tabel 4. 11	Performa Optimum Turbin.....	65

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR NOTASI

Simbol	Keterangan	Satuan
A. Simbol dengan Huruf Latin		
A	Luas sapuan turbin (swept area)	m ²
b	Konstanta ekspansi spiral Archimedes	-
C _p	Koefisien daya (coefficient of power)	-
C _{p,max}	Koefisien daya maksimum	-
C _{p,static}	Koefisien tekanan statis	-
C _t	Koefisien torsi (coefficient of torque)	-
C _{t,start}	Koefisien torsi awal (starting torque coefficient)	-
CV	Koefisien variasi (coefficient of variation)	%
D	Diameter turbin	m
D _e	Diameter pelat ujung (end plate)	m
d	Diameter sudu (blade diameter)	m
dk/ds	Laju perubahan kelengkungan terhadap panjang busur	m ⁻²
dn	Jarak antar spiral ke-n	m
d ₀	Jarak antar spiral awal	m
e	Jarak tumpang tindih (overlap distance)	m
F	Vektor gaya (force vector)	N
F _s	Safety factor dalam metode GCI	-
f	Frekuensi (frequency)	Hz
g	Percepatan gravitasi	m/s ²
GCI	Grid Convergence Index	%
H	Tinggi turbin	m
k	Energi kinetik turbulen (turbulent kinetic energy)	m ² /s ²
k	Vektor satuan arah z (unit vector z-direction)	-
LCOE	Levelized Cost of Energy	\$/kWh
n	Vektor normal permukaan (surface normal vector)	-
p	Tekanan statis (static pressure)	Pa
p	Orde akurasi numerik	-
P	Daya mekanis (mechanical power)	W
p _∞	Tekanan referensi atmosfer	Pa
R	Jari-jari turbin	m
r	Vektor posisi dari sumbu rotasi	m
r	Rasio perbaikan mesh (refinement ratio)	-
r ₀	Radius awal spiral	m
Re	Bilangan Reynolds	-
St	Bilangan Strouhal	-
T	Torsi turbin	N·m
Taero	Torsi aerodinamis turbin	N·m
Tload	Torsi total beban	N·m
TI	Intensitas turbulensi (turbulence intensity)	%
TSR (λ)	Tip Speed Ratio (rasio kecepatan ujung bilah)	-

V	Kecepatan angin (wind speed)	m/s
V_{avg}	Kecepatan angin rata-rata	m/s
x/c	Posisi titik separasi sebagai fraksi panjang chord	-

B. Simbol dengan Huruf Yunani

ΔC_p	Perbedaan koefisien tekanan antar permukaan sudu	-
ε_{21}	Galat relatif antar dua tingkat grid	-
η_{gen}	Efisiensi generator	-
η_{elec}	Efisiensi konverter listrik (rectifier/inverter)	-
κ	Kelengkungan permukaan (curvature)	m^{-1}
λ	Tip Speed Ratio (TSR)	-
λ_{geom}	Panjang gelombang geometris sudu	m
λ_{TS}	Panjang gelombang Tollmien-Schlichting	m
λ_{opt}	TSR optimal	-
μ	Nilai rata-rata (mean)	-
ν	Viskositas kinematik fluida	m^2/s
ρ	Densitas udara (air density)	kg/m^3
σ	Standar deviasi	-
$\sigma^2 \kappa$	Varians kelengkungan	m^{-2}
τ	Tensor tegangan geser (shear stress tensor)	Pa
ϕ	Golden ratio (rasio emas)	-
θ	Sudut polar pada persamaan spiral	rad
ω	Laju disipasi spesifik (specific dissipation rate)	s^{-1}
ω	Kecepatan sudut turbin (angular velocity)	rad/s
$ \omega $	Magnitudo vortisitas (vorticity magnitude)	s^{-1}

C. Subskrip dan Superskrip

0	Nilai awal atau kondisi referensi
∞	Kondisi aliran bebas (freestream)
avg	Rata-rata (average)
concave	Permukaan cekung sudu (sisi tekanan tinggi)
convex	Permukaan cembung sudu (sisi tekanan rendah)
Fibonacci	Parameter terkait turbin Fibonacci
gen	Generator listrik
max	Nilai maksimum
mekanis	Daya atau energi mekanis (sebelum konversi listrik)
n	Nomor urut (indeks ke-n)
opt	Kondisi optimal
Savonius	Parameter terkait turbin Savonius
start	Kondisi starting (saat mulai berputar)
static	Tekanan statis

DAFTAR RUMUS

(1) <i>Betz Limit</i>	7
(2) Koefisien Daya (C_p).....	7
(3) Koefisiensi Torsi (C_t).....	7
(4) Hubungan C_p , C_t , dan TSR.....	7
(5) <i>Tip Speed Ratio</i> (TSR).....	7
(6) Persamaan Spiral Archimedes (Fibonacci).....	35
(7) Jarak Antar Spiral Berbasis <i>Golden Ratio</i>	36
(8) Daya Mekanis (P).....	37
(9) Kecepatan Sudut Turbin.....	38
(10) Koefisien Tekanan Statis.....	39
(11) Perhitungan peningkatan performa.....	39
(12) <i>Coefficient of variation</i> (CV).....	39

Halaman ini sengaja dikosongkan