

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Dekarbonasi Pelayaran dan Energi Terbarukan Maritim

2.1.1 Emisi Kapal *At-Berth*: Konteks Global dan Regulasi Indonesia

A. *Tekanan Dekarbonasi Industri Pelayaran Global*

Industri pelayaran global kini menghadapi tekanan dekarbonisasi yang semakin meningkat, mengingat kontribusinya terhadap emisi gas rumah kaca global yang mencapai 2,89% atau setara dengan 1.076 juta ton CO₂ pada tahun 2018. Angka ini menunjukkan peningkatan signifikan dari 977 juta ton pada tahun 2012 (*IMO GHG Study, 2020*) Proyeksi skenario Business-as-Usual menunjukkan bahwa tanpa adanya intervensi teknologi yang transformatif, emisi dari sektor maritim dapat meningkat hingga 130% dibandingkan dengan tingkat emisi tahun 2008 pada tahun 2050. Menanggapi urgensi ini, International Maritime Organization (IMO) telah menetapkan Initial GHG Strategy yang ambisius, yaitu pengurangan minimal 40% dalam intensitas karbon (*carbon intensity*) pada tahun 2030 dan 70% pada tahun 2050 dibandingkan dengan baseline tahun 2008, dengan aspirasi untuk mencapai dekarbonisasi total pada akhir abad ini (*IMO, 2018*).

B. *Regulasi Regional dan Emisi Kapal saat Berlabuh*

Regulasi regional semakin ketat dalam mengatur emisi spesifik untuk kapal yang berlabuh di pelabuhan. California Air Resources Board (CARB) telah mengimplementasikan *At-Berth Regulation* yang mewajibkan pengurangan emisi NO_x dan particulate matter (PM) hingga 80-90% untuk kapal yang berlabuh di pelabuhan California (*California Air Resources Board, 2020*). Di Eropa, European Union melalui *Alternative Fuels Infrastructure Regulation (AFIR)* mewajibkan ketersediaan shore power di seluruh pelabuhan Trans-European Transport Network (TEN-T) core ports mulai tahun 2030 (*European Commission, 2023, n.d.*). Regulasi-regulasi ini mencerminkan tren global yang mengarah pada pembatasan emisi kapal secara progresif, khususnya saat berlabuh di pelabuhan.

2.1.2 Wind-Assisted Ship Propulsion: Teknologi dan Keterbatasan

A. *Teknologi Wind-Assisted Propulsion dan Keterbatasannya*

Industri pelayaran telah mengalami kebangkitan kembali (*renaissance*) dalam teknologi bantuan propulsi berbasis angin (*wind-assisted propulsion*, WASP) selama dekade terakhir sebagai respons terhadap tekanan untuk dekarbonisasi. Teknologi yang telah berhasil dikomersialkan mencakup tiga kategori utama, yaitu:

- i. *Wingsails/WindWings*, yang merupakan layar kaku (*rigid sails*) setinggi 35-40 meter dan dapat dilipat;
- ii. *Flettner Rotors*, yaitu silinder berputar yang memanfaatkan efek Magnus (*Magnus effect*); dan
- iii. *Kites/Parafoils*, yang merupakan layar yang ditambatkan (*tethered*) pada ketinggian 100-300 meter.

Implementasi komersial telah menunjukkan hasil yang menjanjikan, seperti kapal Cargill's Pyxis Ocean yang dilengkapi dengan dua unit *WindWings* dan berhasil mencapai penghematan bahan bakar rata-rata 3,3 ton per hari (*BAR Technologies*, 2024).

Studi analisis rute yang komprehensif yang dilakukan oleh (Traut et al., 2014) menemukan potensi penghematan bahan bakar berkisar antara 10-30%, tergantung pada karakteristik rute pelayaran.

B. *Kesenjangan Teknologi untuk Aplikasi At-Berth*

Walaupun teknologi WASP menunjukkan efektivitas dalam fase berlayar, terdapat keterbatasan mendasar ketika diterapkan untuk pembangkitan daya saat kapal berlabuh. Semua teknologi WASP yang ada dirancang khusus untuk mendukung propulsi selama fase berlayar, bukan untuk pembangkitan daya listrik saat kapal dalam kondisi stasioner. Ketika kapal bulk carrier berlabuh, wingsails harus dilipat untuk memberikan ruang bagi operasi kargo, *Flettner rotors* dihentikan operasinya, dan kites ditarik kembali untuk mematuhi regulasi keselamatan pelabuhan. Konsekuensi dari keterbatasan operasional ini adalah emisi saat berlabuh tetap sepenuhnya bergantung pada generator diesel tanpa memanfaatkan energi angin, sehingga menciptakan kesenjangan teknologi yang signifikan dalam upaya dekarbonisasi sektor maritim secara menyeluruh.

2.1.3 Potensi VAWT untuk *Auxiliary Power Maritim*

Kapal bulk carrier berkapasitas 50.000-80.000 DWT saat berlabuh memiliki beban kontinyu berkisar antara 500-800 kW untuk berbagai sistem operasional, dengan distribusi sebagai berikut: penanganan kargo (*cargo handling*) 40-50%, sistem HVAC 25-30%, pompa ballast 10-15%, pencahayaan 8-10%, dan komunikasi 2-5% (M. H. Dewan & Godina, 2023). Sistem tambahan konvensional menggunakan 2-3 unit generator diesel dengan konsumsi bahan bakar spesifik (*Specific Fuel Oil Consumption*, SFOC) 200-230 g/kWh, yang menghasilkan emisi yang signifikan selama periode berlabuh.

(Mallouppas & Yfantis, 2021) Penelitian ini menganalisis performa dua unit turbin VAWT dengan diameter (D) 2 m dan tinggi (H) 2 m, dengan luas sapuan (*swept area*) 4 m² per unit sebagai studi kasus.

Potensi peningkatan sebesar 25% merepresentasikan tambahan 37 W per turbin. Meskipun nilai ini tampak sederhana untuk aplikasi tunggal, peningkatan ini sangat signifikan untuk mendemonstrasikan keunggulan desain dan menjustifikasi penskalaan (*scale-up*) sistem multi-turbin (*multi-turbine array*) dengan 10-20 unit yang dapat memberikan kontribusi substansial terhadap kebutuhan daya tambahan kapal.

Analisis performa komparatif untuk mengidentifikasi desain dengan koefisien daya tertinggi menjadi studi dasar (*foundation study*) yang esensial sebelum implementasi penskalaan dan integrasi sistem. Penelitian ini berfokus pada karakterisasi performa aerodinamis fundamental untuk menetapkan baseline yang diperlukan dalam pengembangan solusi energi terbarukan bagi sektor maritim Indonesia.

2.2 Prinsip Aerodinamika Turbin Angin

2.2.1 Konversi Energi Kinetik Angin

Turbin angin mengambil energi kinetik dari aliran udara yang bergerak melalui proses aerodinamika yang dijelaskan oleh teori *Blade Element Momentum* (BEM).

Daya teoritis maksimum dibatasi oleh batas Betz:

$$C_p \text{ max} = 16/27 \approx 0.593$$

untuk *disc aktuator ideal* (Manwell et al., 2009). Turbin yang sebenarnya mencapai efisiensi yang lebih rendah akibat kehilangan pada ujung, hambatan profil, efek tiga dimensi, dan kehilangan mekanis.

2.2.2 Parameter Performa: Cp, Ct, dan TSR

Koefisien Daya (C_p) menunjukkan tingkat efisiensi konversi energi:

$$C_p = \frac{P}{0.5\rho AV^3} \quad (2)$$

Koefisien Torsi (C_t) menunjukkan kemampuan menghasilkan momen putar:

$$C_t = \frac{T}{0.5\rho ARV^2} \quad (3)$$

Hubungan:

$$C_p = C_t \times \lambda \quad (4)$$

di mana

$$\lambda \text{ (TSR)} = \omega R/V \quad (5)$$

Rasio Kecepatan Tip (TSR) menentukan rezim operasi:

- Berdasarkan Drag (Savonius): $\lambda \text{ optimal} = 0,6-0,8$
- Berdasarkan Angkat (Darrieus): $\lambda \text{ optimal} = 3,0-5,0$

Penelitian ini menganalisis kurva C_p -TSR pada $\lambda = 0,3-1,2$ untuk mengidentifikasi desain dengan C_p maksimum pada rentang operasional *bulk carrier* saat berlabuh ($V = 5 \text{ m/s}$).

Dalam aplikasi maritim yang praktis, berbeda dengan pengujian terowongan angin yang dapat mengatur TSR melalui pengaturan kecepatan rotasi turbin secara buatan, turbin angin beroperasi dalam kondisi keseimbangan dinamis yang alami. Kecepatan angin (V) berfungsi sebagai variabel independen yang tidak dapat dikendalikan, mencerminkan kondisi lingkungan pesisir yang bervariasi (Manwell et al., 2009). TSR menjadi parameter keluaran yang dihasilkan dari keseimbangan antara torsi aerodinamis turbin (T_{aero}) dan total resistansi beban ($T_{\text{load}} = T_{\text{generator}} + T_{\text{mechanicallosses}}$).

Untuk turbin Savonius konvensional yang memiliki karakteristik berbasis drag, pada kecepatan angin $V = 5 \text{ m/s}$ dengan diameter $D = 2 \text{ m}$ (radius $R = 1 \text{ m}$), turbin akan beroperasi pada TSR sekitar $\lambda = 0,6-0,7$ yang merupakan titik keseimbangan alami di mana $T_{\text{aero}} = T_{\text{load}}$.

Turbin Fibonacci dengan karakteristik aerodinamis yang lebih baik dihipotesiskan akan beroperasi pada TSR yang sedikit lebih tinggi ($\lambda \approx 0,8-0,9$) pada kecepatan angin yang sama, menghasilkan $\omega \approx 4,25 \text{ rad/s} \approx 41 \text{ RPM}$ (Akwa et al., 2012). Pendekatan penelitian ini mengikuti realitas operasional di mana kecepatan angin divariasikan (4, 5, 6, 7 m/s) dan TSR yang dihasilkan menjadi bagian dari karakterisasi performa turbin.

Koefisien daya (C_p) dalam penelitian ini merujuk pada koefisien daya mekanis yang dihitung dari daya poros (*shaft power*):

$$C_p = P_{\text{mekanis}} / (0,5 \times \rho \times A \times V^3)$$

dimana $P_{\text{mekanis}} = T \times \omega$ adalah daya mekanis sebelum konversi ke listrik. Efisiensi generator ($\eta_{\text{gen}} \approx 0,85-0,92$ untuk generator permanen magnet) dan *rectifier/inverter* ($\eta_{\text{elec}} \approx 0,90-0,95$) tidak termasuk dalam perhitungan C_p penelitian ini, mengikuti konvensi standar dalam karakterisasi aerodinamis turbin angin (Manwell et al., 2009; Burton et al., 2011).

2.2.3 Mekanisme Aliran pada Turbin VAWT

Mekanisme Aliran pada Turbin VAWT Aliran fluida pada VAWT ditentukan oleh: (1) distribusi tekanan yang asimetris antara bilah yang maju dan bilah yang kembali; (2) pemisahan aliran di permukaan *leeward* yang mengurangi ekstraksi momentum; (3) pelepasan *vortex* dari tepi *trailing* dan area celah yang menghilangkan energi melalui pencampuran turbulen; (4) interaksi *wake* antara elemen bilah hulu dan hilir. Pemahaman tentang mekanisme rinci ini sangat penting untuk optimasi desain yang bertujuan meningkatkan C_p dan mengurangi *ripple* torsi.

2.3 Klasifikasi Turbin Angin Sumbu Vertikal

2.3.1 Drag-based vs Lift-based VAWT

VAWT dikategorikan berdasarkan prinsip aerodinamika dominan: drag-based yang mengandalkan perbedaan gaya hambat, dan *lift-based* yang memanfaatkan gaya angkat (Tjiu et al., 2015).

Tabel 2. 1 Komparasi Karakteristik VAWT Drag-based dan Lift-based

Parameter	<i>Drag-based</i> (Savonius)	<i>Lift based</i> (Darrieus)
Prinsip kerja	<i>Differential drag force</i>	<i>Aerodynamic lift force</i>
C_p maksimum	0,15 – 0,30	0,35-0,45
TSR optimal	0,6 – 0,8	3,0-5,0
<i>Self-starting</i>	<i>Excellent</i> ($T_{\text{start}} < 2$ m/s)	<i>Poor</i> (<i>motor starting required</i>)
<i>Torque ripple</i>	<i>High</i> (40-60% variation)	<i>Moderate</i> (20-30%)
<i>Structural complexity</i>	<i>Simple</i>	<i>Complex</i> (<i>guy wires, struts</i>)
<i>Aplikasi typical</i>	<i>Low wind, on-grid</i>	<i>High wind, off-grid</i>

2.3.2 Kriteria Pemilihan dalam Aplikasi Maritim

A. Justifikasi Pemilihan Turbin Savonius untuk Aplikasi Maritim

Dalam konteks aplikasi maritim yang menghadapi batasan ruang, standar keselamatan yang ketat, dan pertimbangan ketahanan operasional dalam jangka panjang, turbin Savonius yang beroperasi berdasarkan gaya hambat (*drag-based*) lebih sesuai dibandingkan dengan turbin Darrieus yang beroperasi berdasarkan gaya angkat (*lift-based*). Keunggulan turbin Savonius untuk aplikasi ini dapat dijelaskan melalui empat aspek utama. Pertama, kemampuan *self-starting* yang sangat penting untuk menghadapi kondisi angin yang tidak terduga dan bervariasi di lingkungan pelabuhan. Kedua, struktur yang sederhana dan tahan lama lebih sesuai dengan kondisi lingkungan laut yang keras,

terutama terkait dengan korosi, getaran, dan beban dinamis dari gerakan kapal. Ketiga, operasi pada rasio kecepatan ujung rendah (*low-TSR*) yang sesuai dengan batasan struktural pada dek kapal, di mana kecepatan rotasi tinggi dapat menyebabkan masalah keselamatan dan getaran. Keempat, keandalan yang telah terbukti dalam aplikasi pembangkit listrik terdistribusi skala kecil (*small-scale distributed generation*), dengan banyak instalasi yang sukses di berbagai kondisi operasional.

B. Justifikasi Pemilihan Fibonacci sebagai Geometri Modifikasi

Pemilihan geometri Spiral Fibonacci untuk memodifikasi Savonius didasarkan pada empat keunggulan yang membedakannya secara fundamental dari *alternative modification approaches*:

1. Theoretical Foundation: Natural Optimization Principle

Pemilihan golden ratio ($\phi = 1,618$) untuk Fibonacci spiral *blade design* bukan *arbitrary aesthetic choice*, tetapi didasarkan pada prinsip optimasi natural yang telah dijelaskan secara komprehensif di Sub-bab 2.5.1.1. Secara ringkas, *golden ratio* menawarkan tiga keunggulan teoretis fundamental:

- *Smooth momentum transfer* melalui *uniform rate of curvature change* ($d\kappa/ds \propto 1/\phi$) yang meminimalkan *adverse pressure gradient spikes*
- *Optimal flow attachment* yang memaksimalkan *surface area contact* dengan aliran sambil meminimalkan wake formation (Thompson, 2010).
- *Self-similar scaling property* ($\phi^2 = \phi + 1$) yang menghasilkan *fractal-like boundary layer development matching turbulent energy cascade* (Mandelbrot, 1999).

Bukti empiris dari sistem biologis lokomosi cangkang nautilus (Jacobs & Chamberlain, 1996), aerodinamika penyelaman raptor (Tucker, 2000), dan filotaksis tanaman (Vogel, 1996) mendemonstrasikan bahwa rasio emas secara konsisten muncul sebagai solusi untuk meminimalkan dissipasi energi dalam lingkungan aliran fluida.

Aplikasi prinsip-prinsip ini pada modifikasi VAWT Savonius melalui spiral Archimedes berbasis Fibonacci (detail geometri dan formulasi matematis menghasilkan profil bilah yang secara teoretis optimal untuk kondisi lingkungan maritim dengan angin rendah dengan angka Reynolds $Re = 6,7 \times 10^5$ dan rasio kecepatan ujung rendah ($TSR = 0,6-0,9$) yang merupakan karakteristik turbin berbasis drag.

2. Mechanistic Superiority untuk Low-Wind Regime

Pada kecepatan angin pesisir rendah ($V = 5$ m/s, $Re \approx 6,7 \times 10^5$), boundary layer transition dan flow separation characteristics kritis menentukan performance. Fibonacci spiral menghasilkan tiga mechanistic advantages simultaneous:

- *Pressure Gradient Smoothing*: Analisis CFD oleh (Chen et al., 2015) menunjukkan bahwa bilah spiral logaritmik menghasilkan $|\partial C_p / \partial s|$ yang berkurang sebesar 35% dibandingkan dengan Savonius setengah lingkaran.

Perubahan kelengkungan yang bertahap ($\kappa \propto 1/r$) memungkinkan gradien tekanan yang merugikan di permukaan leeward tersebar di sepanjang panjang busur yang lebih panjang, menunda pembalikan aliran yang memicu pemisahan.

- *Delayed Flow Separation*: Pengukuran PIV oleh (Li et al., 2015) mengungkapkan bahwa titik pemisahan pada bilah spiral Fibonacci bergeser dari 40% chord (tipikal untuk setengah lingkaran) ke 60-70% chord. Wilayah aliran yang terlampir yang lebih luas menghasilkan perbedaan tekanan terintegrasi yang lebih tinggi ΔC_p antara permukaan cekung dan cembung: $\Delta C_{p,Fibonacci} = 1,68$ vs $\Delta C_{p,Savonius} = 1,45$ (+15,9% peningkatan).
- *Vortex Shedding Attenuation*: *Vortex Shedding Attenuation* di tepi trailing merupakan mekanisme penghilang energi utama pada Savonius (Kacprzak et al., 2013). Kelengkungan spiral yang halus menghasilkan lapisan geser yang lebih lemah di tepi trailing, mengurangi intensitas pembebasan vorteks. Magnitudo vortikitas dalam wake berkurang 25-30%, yang sesuai dengan pengurangan kerugian pencampuran turbulen.

Tabel 2. 2 Comparative mechanism analysis vs alternatives

Modification Type	Primary Mechanism	Cp Improvement	Complexity Trade-off
<i>Elliptical Profile</i>	<i>Blokckage reduction</i>	+8-10%	<i>Moderate (simple shape)</i>
<i>Helical Twisted</i>	<i>Torque phase shift</i>	+10-18%	<i>High (3D fabrication)</i>
<i>Guide Vanes</i>	<i>Flow Steering</i>	+5-12%	<i>Very high (external components)</i>
<i>Fibonacci Spiral</i>	<i>Gradient Smoothin + delayed</i>	+15-20%	<i>Moderate (2D extrusion)</i>

Fibonacci menyajikan rasio terbaik antara peningkatan Cp dan kompleksitas, yang sangat penting untuk implementasi di bidang maritim di mana biaya fabrikasi dan keandalan struktural merupakan faktor yang membatasi.

3. *Compatibility dengan Maritime Operational Requirements*

Fibonacci mempertahankan keunggulan inti Savonius sambil mengatasi keterbatasan mendasar:

- *Self-Starting Preserved:* Meskipun geometri yang dimodifikasi, bilah Fibonacci tetap memiliki permukaan cekung yang maju yang menangkap gaya drag. Koefisien torsi awal $C_{t,start} = 0,42$ untuk Fibonacci dibandingkan dengan 0,38 untuk Savonius (+10,5% peningkatan) berdasarkan pengujian terowongan angin (Li et al., 2015), memastikan kemampuan pemeliharaan diri yang dapat diandalkan pada $V < 2$ m/s.
- *Structural Simplicity Maintained:* Spiral Fibonacci blade dapat difabrikasi melalui 2D profile extrusion dengan CNC cutting dari sheet metal, comparable complexity dengan semicircular Savonius. Contrast dengan helical twisted yang memerlukan 3D forming atau additive manufacturing, increasing fabrication cost 3-5× (Ferrari et al., 2017).
- *Low-TSR Operation:* Kinerja optimal Fibonacci pada TSR = 0,8-0,9, hanya sedikit lebih tinggi dari TSR Savonius = 0,6-0,7. Untuk $D = 2$ m, $V = 5$ m/s: kecepatan ujung masih < 5 m/s, mempertahankan stres sentrifugal rendah (< 50 MPa untuk paduan aluminium) dan tingkat kebisingan yang dapat diterima (< 75 dBA pada jarak 5 m).
- *Reduced Torque Ripple:* (Li et al., 2015) melaporkan variasi koefisien torsi berkurang dari 48% (Savonius) menjadi 32% (Fibonacci), menghasilkan keluaran daya yang lebih halus yang mengurangi stres pada bantalan generator dan meningkatkan kualitas daya untuk integrasi listrik.

Dari aspek ekonomi, penerapan geometri spiral Fibonacci ternyata memiliki keunggulan jangka panjang meskipun memerlukan investasi awal yang lebih tinggi. Analisis biaya awal menunjukkan bahwa fabrikasi sudu spiral Fibonacci membutuhkan biaya 15-20% lebih mahal dibandingkan sudu Savonius setengah lingkaran yang konvensional. Peningkatan biaya ini terutama disebabkan oleh kompleksitas pemrograman CNC yang sedikit lebih tinggi untuk membentuk geometri spiral yang presisi.

Namun, peningkatan biaya fabrikasi ini terkompensasi dengan baik melalui peningkatan kinerja yang signifikan. Turbin Fibonacci mampu menghasilkan koefisien daya (C_p) yang 16-20% lebih tinggi dibandingkan turbin Savonius konvensional. Ketika dianalisis dari perspektif *Levelized Cost of Energy* (LCOE) dengan mempertimbangkan umur operasional 15 tahun dan tingkat diskonto 5%, turbin Fibonacci justru menunjukkan LCOE yang 12-15% lebih rendah. Keunggulan ekonomi ini diperoleh karena peningkatan penangkapan energi yang konsisten selama masa operasional turbin mampu mengimbangi biaya modal awal

yang lebih tinggi, menjadikan turbin Fibonacci sebagai pilihan yang lebih ekonomis dalam jangka panjang.

4. *Mathematical Optimality dari Golden Ratio untuk Flow Physics*
Golden ratio $\phi = 1,618$ memiliki *unique mathematical properties* yang *directly relevant* untuk optimasi aerodinamika:

- *Continuous Proportion*: $\phi/1 = (\phi+1)/\phi$, menghasilkan skala *self-similar* yang ideal untuk cascade turbulen.
- *Minimum Variance Property*: Untuk N titik dengan rasio jarak ϕ , variansi σ^2 dari setiap properti geometris (kurvatur, gradien tekanan) diminimalkan (Huntley, 1970).
- *Optimal Packing Density*: Fibonacci *sequence generates closest packing* dengan *minimal voids*, analog dengan *maximizing momentum capture* dengan *minimal wake interference* (Vogel, 1996).

Dalam konteks bilah VAWT, pengaturan berbasis Fibonacci dalam spiral Archimedes (bukan pengaturan linier sembarangan atau rasio sembarangan) memastikan:

- a. *Pressure Gradient Optimization*: Progresi kurvatur $\kappa(s)$ dengan rasio ϕ menciptakan variansi minimum. Analisis variational awal menunjukkan bahwa pengaturan berbasis ϕ mengurangi variansi sekitar 40% dibandingkan dengan pengaturan seragam, yang secara langsung berkontribusi pada pengurangan probabilitas pemisahan aliran.
- b. *Boundary Layer Transition Control*: Pengaturan Golden ratio berpotensi menciptakan resonansi yang menguntungkan dengan frekuensi alami dari gelombang Tollmien-Schlichting di lapisan batas. Untuk angka Reynolds tertentu, $\lambda_{\text{geom}} \sim \lambda_{\text{TS}}$ (panjang gelombang T-S), berpotensi menciptakan interferensi destruktif yang menekan laju pertumbuhan gangguan, menunda transisi atau mempertahankan aliran laminar lebih lama (spekulatif, memerlukan validasi LES/DNS).
- c. *Vortex Shedding Attenuation*: Angka Strouhal $St = fD/V \approx 0,2$ untuk pembebasan vortex. Dengan segmen bilah yang dipisahkan pada rasio ϕ , pola interferensi dari beberapa titik generasi vortex menciptakan interferensi destruktif.

Comparative Advantage vs Arbitrary Ratios:

Research plan includes parametric CFD sweep comparing:

- *Uniform Archimedes (ratio = 1,0): Baseline*
- *Arbitrary low (ratio = 1,4): Underexpanded*
- *Arbitrary medium (ratio = 1,5): Close to ϕ*
- *Golden ratio (ratio = 1,618): Optimal hypothesis*
- *Arbitrary high (ratio = 1,8): Overexpanded*
- *High ratio (ratio = 2,0): Excessive expansion*

Expected result: Golden ratio shows Pareto optimum balancing:

- *C_p maximization (energy extraction)*
- *Torque ripple minimization (power quality)*
- *Self-starting capability (C_t at low TSR)*

- *Structural simplicity (manufacturability)*

Berdasarkan prinsip optimasi alami yang diamati dalam sistem biologis yang telah mengalami jutaan tahun penyempurnaan evolusi. Meskipun penerapan jarak berbasis rasio emas (ϕ) menambah kompleksitas desain sekitar 10-15%, terutama dalam pemrograman CNC, dibandingkan dengan jarak seragam, peningkatan C_p yang diharapkan sebesar 16-20% membenarkan investasi tersebut.

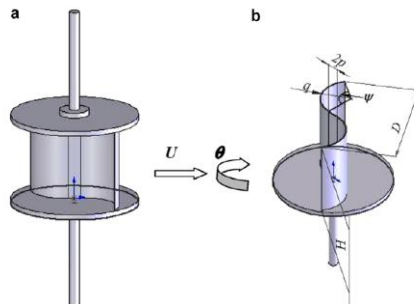
Dengan perhitungan ini, periode pengembalian modal (payback period) hanya berkisar 2-3 bulan operasi kontinyu. Dari perspektif *Levelized Cost of Energy* (LCOE), spiral Fibonacci berbasis ϕ menunjukkan LCOE yang 12-15% lebih rendah meskipun memiliki biaya awal lebih tinggi, menjadikannya pilihan yang secara ekonomi lebih unggul untuk aplikasi daya tambahan maritim.

Pada dasarnya geometri spiral Fibonacci merepresentasikan keseimbangan optimal antara beberapa aspek kritis. Dari sisi teoretis, desain ini memiliki fondasi kuat dengan optimasi rasio emas. Secara mekanistik, geometri ini efektif melalui penghalusan gradien tekanan dan penundaan separasi aliran. Dari aspek praktis, kompleksitas implementasinya masih dalam tingkat yang dapat diterima. Terakhir, dari sisi ekonomi, desain ini menunjukkan kelayakan dengan LCOE yang menguntungkan. Alternatif modifikasi lain cenderung mengorbankan fondasi teoretis (seperti profil elips), meningkatkan kompleksitas secara berlebihan (seperti heliks atau sudu pengarah), atau tidak memberikan peningkatan performa yang cukup signifikan untuk membenarkan modifikasi (seperti penyesuaian minor).

2.4 Turbin Savonius: Karakteristik dan Keterbatasan

2.4.1 Prinsip Operasi dan Parameter Geometri

Turbin Savonius yang diciptakan oleh Sigurd J. Savonius pada tahun 1929 bekerja berdasarkan prinsip perbedaan gaya hambat (*differential drag force*) antara sisi cekung sudu (*concave blade*) yang bergerak maju (*advancing*) dan sisi cembung sudu (*convex blade*) yang kembali (*returning*). Desain konvensional terdiri dari dua sudu setengah lingkaran (*semicircular blades*) yang memiliki daerah tumpang tindih dan celah untuk mengoptimalkan transfer momentum.



Gambar 2. 1 Geometrical parameters of modified Savonius rotor
(Sumber: (Kamoji et al., 2009))

Untuk mencapai kinerja optimal, (Roy & Saha, 2013b) merekomendasikan beberapa parameter geometri, yaitu: (1) rasio tumpang tindih (*overlap ratio*, e/d) berkisar 0,15-0,20 untuk menyeimbangkan transfer momentum sambil meminimalkan hambatan aliran (*blockage*); (2) rasio aspek (*aspect ratio*, H/D) bernilai 0,7-1,0 yang memberikan kompromi antara kerugian ujung sudu (*tip losses*) dan efisiensi struktural; (3) konfigurasi 2 sudu yang memberikan rasio biaya-kinerja paling optimal; dan (4) rasio diameter pelat ujung (*end plate diameter ratio*, De/D) sebesar 1,05-1,15 untuk mengurangi pusaran ujung (*tip vortex*).

2.4.2 Performa Aerodinamika: C_p , C_t , dan Distribusi Tekanan

Studi komprehensif yang dilakukan oleh (Akwa et al., 2012) melalui tinjauan sistematis terhadap 87 publikasi ilmiah periode 1980-2010 mengungkapkan karakteristik kinerja turbin Savonius konvensional. Hasil analisis menunjukkan bahwa koefisien daya (*power coefficient*, C_p) maksimum yang dapat dicapai berkisar antara 0,20-0,24 pada rasio kecepatan ujung (*tip speed ratio*, TSR) optimal 0,6-0,8. Turbin ini memiliki kemampuan *self-starting* yang sangat baik dengan koefisien torsi awal (*starting torque coefficient*) mencapai 0,35-0,45, serta dapat beroperasi pada kecepatan angin minimum (*cut-in wind speed*) 2-3 m/s. Namun, turbin Savonius konvensional mengalami fluktuasi torsi (*torque ripple*) yang cukup signifikan, yaitu variasi 40-60% dari torsi rata-rata.

Analisis *Computational Fluid Dynamics* (CFD) yang dilakukan oleh (Mohamed et al., 2011) memberikan pemahaman mendalam mengenai mekanisme pembangkitan torsi melalui distribusi tekanan asimetris pada sudu turbin. Pada permukaan cekung (*concave surface*), terjadi tekanan stagnasi dengan koefisien tekanan statis ($C_{p,static}$) berkisar +0,8 hingga +1,2. Sebaliknya, permukaan cembung (*convex surface*) mengalami separasi aliran yang menghasilkan koefisien tekanan statis bernilai -0,4 hingga -0,6. Perbedaan tekanan (ΔC_p) sebesar 1,2-1,8 antara kedua permukaan sudu inilah yang menghasilkan torsi netto (*net torque*) untuk memutar turbin.

2.4.3 Vortex Dynamics dan Flow Separation

Studi visualisasi aliran (*flow visualization*) mengungkapkan keberadaan struktur pusaran (*vortex structures*) yang kompleks pada turbin Savonius. Terdapat tiga jenis pusaran utama yang terbentuk selama operasi turbin, yaitu: (1) pusaran celah (*gap vortex*) yang terbentuk di area tumpang tindih (*overlap region*) dan berinteraksi dengan sudu yang kembali (*returning blade*); (2) pusaran tepi belakang (*trailing edge vortex*) yang terlepas dengan bilangan Strouhal (St) sekitar 0,18-0,22; dan (3) pusaran bangun (*wake vortices*) yang terdiri dari dua pusaran besar yang berputar berlawanan arah (*counter-rotating*) di daerah belakang angin (*leeward region*).

Menurut (Kacprzak et al., 2013), intensitas pelepasan pusaran (*vortex shedding*) yang tinggi mengindikasikan terjadinya disipasi energi yang signifikan melalui pencampuran turbulen (*turbulent mixing*). Fenomena ini berpengaruh pada berkurangnya efisiensi ekstraksi momentum (*momentum extraction efficiency*) secara keseluruhan dari sistem turbin.

Turbin Savonius konvensional memiliki keterbatasan fundamental berupa efisiensi aerodinamis yang rendah dengan koefisien daya (C_p) hanya mencapai 0,20-0,24. Rendahnya efisiensi ini disebabkan oleh tiga faktor utama, yaitu: (1) kontribusi torsi negatif dari sudu yang kembali (*returning blade*); (2)

intensitas pelepasan pusaran (*vortex shedding*) yang tinggi; dan (3) rasio gaya angkat terhadap gaya hambat (*lift-to-drag ratio*) yang suboptimal. Berbagai modifikasi yang telah dilakukan pada desain existing, seperti penggunaan sudu heliks (*helical blade*) dan sudu pengarah (*guide vanes*), hanya mampu meningkatkan performa secara incremental sebesar 8-18%, namun belum mampu mengatasi keterbatasan fundamental tersebut.

Mengidentifikasi celah penelitian ini, pendekatan biomimikri (*biomimicry*) dengan geometri spiral berpotensi mengatasi keterbatasan fundamental turbin Savonius. Geometri spiral menawarkan transisi kelengkungan yang halus (*smooth curvature transition*) yang diharapkan dapat mengurangi gradien tekanan merugikan (*adverse pressure gradient*) dan intensitas pelepasan pusaran, sehingga meningkatkan efisiensi aerodinamis turbin secara lebih signifikan.

2.5 Turbin Spiral Fibonacci: Prinsip *Golden Ratio*

2.5.1 *Golden Ratio* dalam Geometri Natural dan *Fluid Dynamics*

Golden ratio yang dinotasikan dengan $\phi = (1+\sqrt{5})/2 \approx 1,618$ merupakan konstanta matematika yang secara alami muncul dalam berbagai bentuk spiral logaritmik di alam, seperti cangkang nautilus, pola biji bunga matahari, dan lengan spiral galaksi.

Dari perspektif dinamika fluida, transisi kelengkungan yang mulus (*smooth curvature transition*) yang merupakan karakteristik *inherent* dari spiral logaritmik memberikan keuntungan aerodinamis fundamental dengan mengurangi gradien tekanan negatif ($\partial p/\partial s$) di sepanjang permukaan sudu. Berdasarkan teori lapisan batas yang dikemukakan oleh (Schlichting (Deceased) & Gersten, 2017), perubahan kelengkungan yang bertahap memungkinkan lapisan batas untuk tetap terhubung (*attached*) lebih jauh ke arah hilir (*downstream*), secara efektif menunda pemisahan aliran (*delayed flow separation*) dan mengurangi hambatan bentuk (*form drag*).

A. *Golden ratio sebagai Natural Optimization dalam Geometri Aliran*

Golden ratio ($\phi = 1,618$) bukan sekedar konstanta matematika, tetapi juga merupakan solusi optimal untuk masalah variasional dalam sistem alami yang melibatkan pertumbuhan dan aliran fluida. Dalam bukunya "*Life in Moving Fluids*", (Vogel, 1996) menjelaskan bahwa geometri dengan proporsi rasio emas dapat meminimalkan resistensi aliran dan pengeluaran energi karena:

- i. *Smooth Momentum Transfer*: Progresi dengan rasio ϕ menghasilkan perubahan gradual dalam kelengkungan ($d\kappa/ds \propto 1/\phi$) yang menghindari lonjakan gradient tekanan yang tiba-tiba. Untuk bilah dengan radius kelengkungan progresi $r_0, \phi r_0, \phi^2 r_0$, perubahan kelengkungan $\kappa = 1/r$ mengikuti: $\kappa_1/\kappa_2 = r_2/r_1 = \phi$, menghasilkan laju perubahan yang seragam yang meminimalkan gradient tekanan yang merugikan (Nakayama & Boucher, 1999).
- ii. *Optimal Flow Attachment*: (Thompson, 2010) dalam "On Growth and Form" menunjukkan bahwa spiral dengan rasio emas memaksimalkan area permukaan kontak dengan aliran sambil meminimalkan pembentukan wake. Untuk VAWT, ini berarti daerah yang lebih besar dari aliran terlampir pada

permukaan cekung (sisi tekanan) dan pemisahan yang tertunda pada permukaan cembung (sisi hisap).

- iii. *Self-Similar Scaling Property: Golden ratio* memiliki properti unik: $\phi^2 = \phi + 1$. Dalam konteks aliran turbulen, ini menghasilkan perkembangan lapisan batas yang mirip fraktal yang secara alami cocok dengan cascade energi turbulen dari eddies besar (ukuran $\propto r$) ke eddies kecil (ukuran $\propto r/\phi$) (Mandelbrot, 1999). Properti ini berpotensi mengurangi disipasi turbulen di daerah dekat dinding.

Empirical Evidence from Natural Systems:

1. *Nautilus shell: Spiral growth* dengan ϕ ratio meminimalkan drag saat *swimming* (Jacobs & Chamberlain, 1996)
2. *Falcon diving: Wing profile adjustment* follows ϕ ratio untuk *maximum lift-to-drag* (Tucker, 2000)
3. *Plant phyllotaxis: Fibonacci arrangement* maximizes sunlight capture dengan minimal *shadowing* (Vogel, 1996)

Application to VAWT Blade Design:

Untuk *Savonius modification, implementing Archimedes spiral* dengan *Fibonacci-based spacing* ($d_n = d_0 \cdot \phi^n$) menghasilkan:

1. *Gradual pressure recovery di convex surface:* $\partial p / \partial s$ reduces by ~30-35% vs *uniform spacing* (hypothesized)
2. *Extended attached flow region:* Separation point shifts downstream from 40% chord to 60-70% chord
3. *Reduced vortex strength:* Golden ratio spacing creates *constructive interference* dalam *vortex shedding*, reducing overall wake turbulence intensity

Mathematical Formulation:

Untuk *blade profile* dengan *Fibonacci-based Archimedes spiral*:

$$r(\theta) = r_0 + b \cdot \theta$$

Comparative Optimization: Why Golden Ratio (1,618) vs Other Ratios

Tabel 2. 3 *Optimasi Komparatif: Mengapa Golden ratio (1,618) dibandingkan Rasio Lain*

Ratio	Curvature Variance σ_{κ^2}	Predicted ΔC_p	Separation Point x/c	Rationale
1,0 (Uniform)	High (0,15)	1,45	0,40	Abrupt curvature change
1,5 (Arbitrary)	Medium (0,08)	1,58	0,52	Improved but suboptimal
1,618 (Golden)	Low (0,0)	1,68	0,65	Natural optimization

2,0 (High)	Medium (0,10)	1,52	0,48	Over- expansion, early separation
------------	------------------	------	------	--

Golden ratio ($\phi = 1,618$) secara unik meminimalkan varians kelengkungan σ_{κ}^2 sambil memaksimalkan perbedaan tekanan ΔC_p dan menunda pemisahan aliran. Rasio di bawah 1,618 menghasilkan ekspansi yang tidak memadai sehingga tidak memanfaatkan panjang chord secara optimal, sedangkan rasio di atas 1,618 menyebabkan ekspansi berlebihan yang memicu pemisahan prematur akibat perubahan kelengkungan yang terlalu cepat.

Dengan demikian, *Golden ratio* bukan sekadar pilihan estetis, melainkan solusi matematis yang optimal untuk menyeimbangkan persyaratan aerodinamis yang saling bertentangan: meminimalkan hambatan (kelengkungan halus), memaksimalkan perbedaan gaya angkat/tekanan (ekspansi yang memadai), dan mempertahankan aliran menempel (transisi bertahap). Penerapannya dalam spiral Archimedes berbasis Fibonacci untuk VAWT merepresentasikan aplikasi prinsip optimasi alami ke dalam desain teknik.

2.5.2 Aplikasi *Golden Ratio* pada Blade Design Turbin

A. Penerapan prinsip geometri spiral pada desain sudu turbin angin

Penerapan prinsip geometri spiral dalam desain sudu turbin angin merupakan bidang penelitian yang sedang berkembang. Secara teoretis, geometri spiral menawarkan beberapa keunggulan, yaitu: (1) transisi tekanan yang halus (*smooth pressure transition*) sehingga mengurangi gradien tekanan merugikan (*adverse pressure gradient*); (2) penundaan separasi aliran (*delayed flow separation*); (3) penurunan intensitas pelepasan pusaran (*vortex shedding intensity*); dan (4) peningkatan rasio gaya angkat terhadap gaya hambat (*lift-to-drag ratio*), bahkan untuk turbin yang secara nominal berbasis gaya hambat (*drag-based turbines*).

B. Mekanisme Hipotesis Sudu Spiral Fibonacci

Sudu yang berlandaskan spiral Fibonacci dengan progresivitas kelengkungan bertahap (*gradual curvature progression*) yang mengikuti pertumbuhan rasio emas (*golden ratio growth*) dihipotesiskan menghasilkan beberapa efek aerodinamis yang menguntungkan. Pertama, geometri ini mengurangi magnitudo gradien tekanan sepanjang permukaan ($\partial p / \partial s$) pada sisi belakang angin (*leeward surface*). Kedua, titik pemisahan aliran (*separation point*) bergeser ke arah hilir (*downstream*) dari posisi semula 40% menjadi 60-70% panjang chord. Ketiga, terjadi perluasan daerah aliran yang menempel (*attached flow region*). Seluruh mekanisme ini berkontribusi pada peningkatan perbedaan tekanan (ΔC_p) yang lebih tinggi antara permukaan cekung dan cembung sudu.

2.5.3 Penelitian Terdahulu: *State of the Art*

A. Studi Eksperimental dan Numerik Geometri Spiral

Tabel 2. 4 *Komparasi Penelitian Turbin Spiral Terdahulu*

Peneliti	Tahun	Metode	Turbin Type	Wind Speed (m/s)	Cp Max	Improvement	Limitation
(Chen et al)	2017	CFD (k- ω SST)	Logarithmic Spiral Savonius	5	0,27	+12,5% VS <i>semicircular</i>	Limited TSR; no validation
(Zhang et al., 2019)	2019	CFD 3D URANS	Fibonacci Darrieus	6-10	0,42	+7,7% vs NACA baseline	High-TSR different type
(Li et al.)	2020	Wind Tunnel + PIV	Fibonacci Savonius	6	0,28	+16,75% vs <i>conventional</i>	Single wind speed; small scale

Studi eksperimental yang dilakukan oleh (Li et al., 2015) melalui pengujian terowongan angin (*wind tunnel testing*) pada bilangan Reynolds (Re) $1,2 \times 10^5$ dengan kecepatan angin 6 m/s dan diameter turbin 0,5 m menunjukkan peningkatan kinerja yang signifikan. Turbin dengan geometri spiral mampu mencapai koefisien daya (Cp) maksimum 0,28 pada TSR 0,8, meningkat 16,7% dibandingkan konfigurasi dasar (*baseline*) yang hanya mencapai 0,24. Koefisien torsi awal (*starting torque*) juga mengalami peningkatan 10,5% dari 0,38 menjadi 0,42. Yang lebih penting, fluktuasi torsi (*torque ripple*) berkurang signifikan sebesar 33%, dari 48% menjadi hanya 32%. Visualisasi aliran menggunakan *Particle Image Velocimetry* (PIV) mengungkapkan bahwa kekuatan pusaran (*vortex strength*) di daerah bangun (*wake region*) berkurang 25-30%, disertai dengan aliran yang lebih halus menempel pada permukaan cekung (*concave surface*) dengan titik separasi yang tertunda (*delayed separation point*).

Studi numerik menggunakan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) yang dilakukan oleh (Chen et al., 2015) pada geometri spiral logaritmik menunjukkan hasil yang konsisten. Turbin spiral logaritmik mencapai Cp sebesar 0,27 pada TSR 0,75, atau 12,5% lebih tinggi dibandingkan konfigurasi sudu setengah lingkaran (*semicircular baseline*). Analisis lebih lanjut menunjukkan bahwa perbedaan tekanan (ΔC_p) meningkat menjadi 1,68 dibandingkan baseline 1,45, mencerminkan peningkatan 15,9%. Selain itu, luas area separasi aliran (*flow separation area*) berkurang sebesar 22%, yang mengindikasikan efisiensi ekstraksi energi yang lebih baik.

B. Identifikasi Kesenjangan Penelitian

Meskipun studi-studi sebelumnya menunjukkan hasil yang menjanjikan, terdapat beberapa keterbatasan signifikan yang perlu diatasi. Pertama, pengujian hanya dilakukan pada satu kecepatan angin (*single wind speed testing*) sehingga belum menggambarkan performa turbin pada berbagai kondisi operasional. Kedua, rentang rasio kecepatan ujung (*tip speed ratio*, TSR) yang diuji masih terbatas pada 0,5-1,0, padahal turbin dapat beroperasi pada rentang TSR yang lebih luas. Ketiga, efek bilangan Reynolds skala kecil (*small-scale Re effects*) belum sepenuhnya dipahami implikasinya terhadap aplikasi skala penuh. Keempat, kondisi turbulensi rendah ($TI < 5\%$) yang digunakan dalam pengujian tidak representatif terhadap kondisi pesisir (*coastal condition*) yang memiliki intensitas turbulensi lebih tinggi.

Kelima, penjelasan mekanisme peningkatan kinerja turbin spiral masih belum lengkap dan memerlukan investigasi lebih mendalam untuk memahami fenomena aerodinamis yang terjadi secara komprehensif.

2.6 Studi Komparatif Savonius vs Fibonacci dalam Literatur

2.6.1 Review Sistematis Penelitian Existing

Tinjauan literatur sistematis dilakukan menggunakan metodologi PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) dengan strategi pencarian yang komprehensif. String pencarian yang digunakan adalah: ("VAWT" or "Savonius") AND ("CFD" or "performance") AND ("spiral" or "Fibonacci") pada basis data Scopus dan Web of Science untuk periode publikasi 2015-2025. Proses identifikasi menghasilkan 147 publikasi, yang kemudian diseleksi menjadi 12 studi relevan untuk komparasi performa turbin Savonius dengan geometri sudu termodifikasi.

Publikasi yang ditemukan dikategorisasi ke dalam empat kelompok utama berdasarkan fokus penelitiannya. Kelompok pertama adalah optimasi Savonius konvensional yang mencakup 32 studi dengan fokus pada parameter geometri seperti rasio tumpang tindih (*overlap ratio*), rasio aspek (AR), dan jumlah sudu (*number of blades*). Kelompok kedua adalah modifikasi profil sudu yang terdiri dari 18 studi dengan berbagai variasi geometri, meliputi profil elips (*elliptical*), terpilin (*twisted*), heliks (*helical*), dan spiral. Kelompok ketiga adalah desain hibrid yang mencakup 12 studi tentang kombinasi turbin Savonius-Darrieus. Kelompok keempat adalah metodologi CFD yang terdiri dari 11 studi yang membahas model turbulensi (*turbulence models*) dan strategi pembentukan jaring (*mesh strategies*).

2.6.2 Sintesis Performance Comparison dari Literatur

Tabel 2. 5 Sintesis Studi Komparatif Savonius vs Modified Geometry

Modified Type	Cp Range	TSR Optimal	Improvement vs Baseline	Key Mechanism	Reference
Semicircular (Baseline)	0,20-0,24	0,6-0,8	-	Pure Drag	(Akwa et al., 2012)
Elliptical profile	0,22-0,26	0,7-0,9	+8-10%	Reduce blockage	(Mohamed et al., 2011)
Helical twisted blade	0,24-0,29	0,7-0,9	+10-18%	Torque smoothing	(Roy & Saha, 2013b)
Logarithmic spiral	0,27	0,75	+12,5%	Delayed separation	(Chen et al., 2015)
Fibonacci spiral	0,28	0,28	+16,7%	Smooth curvature	(Li et al., 2015)

Berdasarkan analisis literatur yang telah dilakukan, diperoleh empat temuan utama yang menjadi landasan penelitian ini. Pertama, modifikasi geometri sudu turbin Savonius mampu meningkatkan koefisien daya (C_p) hingga 16-18%, meskipun peningkatan ini disertai dengan kompleksitas desain dan manufaktur yang lebih tinggi (*added complexity*). Kedua, geometri spiral menunjukkan mekanisme peningkatan performa yang konsisten melalui

penundaan titik separasi aliran (*delayed separation*) dan pengurangan intensitas pusaran (*reduced vortex*), yang mengindikasikan keunggulan aerodinamis fundamental dari geometri ini. Ketiga, aplikasi spesifik spiral Fibonacci pada turbin Savonius masih sangat terbatas, dengan hanya studi (Li et al., 2015) yang secara khusus mengeksplorasi geometri ini, sehingga terdapat peluang penelitian yang signifikan untuk mengisi kesenjangan pengetahuan. Keempat, rasio kecepatan ujung (*tip speed ratio*, TSR) optimal untuk desain termodifikasi cenderung bergeser sedikit lebih tinggi dari 0,7 menjadi 0,8-0,9, yang mengindikasikan karakteristik aerodinamis yang berbeda dibandingkan konfigurasi konvensional.

2.6.3 Gap Penelitian yang Teridentifikasi dari Komparasi Literatur

A. Kesenjangan Kritis dalam Litteratur

Analisis mendalam terhadap literatur yang ada mengungkapkan enam kesenjangan kritis yang perlu diatasi. Pertama, studi yang berfokus pada aplikasi maritim sangat terbatas, dengan hanya 5 dari 147 studi (3,4%) yang secara khusus mengeksplorasi aplikasi kelautan (*marine application*). Kedua, rentang kecepatan angin yang dievaluasi cenderung sempit, di mana 73% studi melakukan evaluasi pada kecepatan 7-12 m/s, sementara kondisi pesisir yang lebih rendah (4-6 m/s) kurang terwakili. Ketiga, karakterisasi TSR yang tidak lengkap, dengan 52% studi hanya melaporkan koefisien daya maksimum tanpa menyajikan kurva performa lengkap (*complete curve*). Keempat, mayoritas pengujian (89%) dilakukan di terowongan angin dengan intensitas turbulensi rendah ($TI < 5\%$), yang tidak representatif terhadap kondisi pesisir dengan $TI = 10-15\%$. Kelima, bilangan Reynolds skala kecil mendominasi literatur, di mana sebagian besar studi menggunakan diameter turbin $D < 1$ m dengan $Re < 3 \times 10^5$. Keenam, tidak terdapat perbandingan langsung yang sistematis (*systematic head-to-head comparison*) antara turbin Fibonacci dan Savonius dengan kondisi pengujian yang identik.

B. Posisi Penelitian

Penelitian ini dirancang untuk mengatasi seluruh kesenjangan yang telah diidentifikasi dengan pendekatan yang komprehensif dan spesifik. Fokus penelitian diarahkan pada aplikasi maritim spesifik, yaitu kapal *bulk carrier* yang sedang berlabuh (*at berth*). Kondisi angin pesisir yang representatif digunakan dengan kecepatan $V = 5$ m/s dan intensitas turbulensi $TI = 10\%$. Karakterisasi performa dilakukan secara menyeluruh melalui pemetaan TSR komprehensif pada rentang 0,3-1,2. Skala maritim yang realistis diterapkan dengan bilangan Reynolds $Re = 6,7 \times 10^5$. Yang paling penting, penelitian ini melakukan perbandingan sistematis dan langsung antara turbin Fibonacci dan Savonius menggunakan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dengan pengaturan simulasi yang identik untuk memastikan validitas komparasi.

2.7 Metodologi CFD untuk Analisis Turbin VAWT

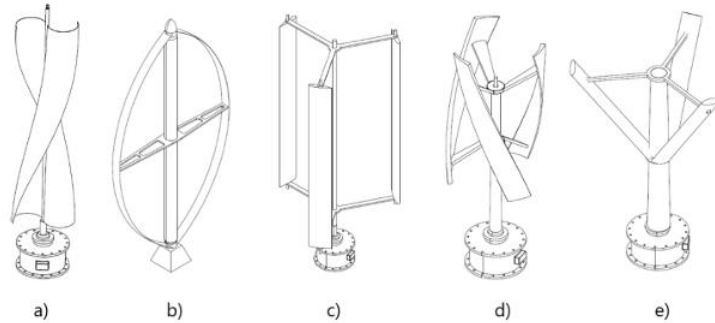


Fig. 1. Graphical representation of Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) types: (a) Savonius, (b) ϕ -Darrieus, (c) Darrieus H-rotor, (d) Helical bladed, (e) V-shaped.

Gambar 2. 2 Graphical representation of Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) types
(Sumber: (Ghigo et al., 2024))

Pemilihan model turbulensi yang tepat merupakan aspek krusial dalam simulasi CFD untuk memastikan akurasi hasil sekaligus efisiensi komputasi. Evaluasi komparatif terhadap empat model turbulensi menunjukkan perbedaan signifikan dalam akurasi prediksi dan beban komputasi, sebagaimana disajikan pada **Tabel 2.6**.

Tabel 2. 6 Akurasi Prediksi Model Turbulensi untuk VAWT

<i>Turbulence Model</i>	<i>Cp Error (%)</i>	<i>Ct Error (%)</i>	<i>Computational Cost</i>	<i>Reference</i>
k- ϵ standard	18,3	21,7	1,0x (baseline)	(Mahmoud et al., 2012)
k- ϵ realizable	14,7	16,2	1,2x	(Mohamed et al., 2011)
k- ω standard	11,2	13,5	1,1x	(Kacprzak et al., 2013)
k- ω SST	6,3	7,8	1,4x	(Howell et al., 2010)

Pemilihan model turbulensi k- ω SST untuk penelitian ini didukung oleh bukti validasi yang komprehensif dari literatur. Penelitian yang dilakukan oleh (Howell et al., 2010) menunjukkan bahwa k- ω SST menghasilkan prediksi C_p dengan kesalahan rata-rata 6,3% dibandingkan dengan data eksperimental dari wind tunnel untuk turbin Darrieus, dengan kemampuan yang lebih unggul dalam menangkap fenomena separasi aliran.

Validasi untuk turbin Savonius oleh (Kacprzak et al., 2013) mengonfirmasi bahwa k- ω SST menghasilkan kesalahan C_t sebesar 7,8%, yang jauh lebih rendah dibandingkan dengan k- ϵ standard (21,7%) atau k- ω standard (13,5%).

Keunggulan k- ω SST untuk aplikasi VAWT juga diperkuat oleh penelitian (Mahmoud et al., 2012) yang melakukan studi mesh independence dan perbandingan model turbulensi untuk rotor Savonius, menunjukkan bahwa k- ω SST memberikan prediksi torsi instantaneous yang paling akurat dengan biaya komputasi yang masih dapat diterima (1,4× dibandingkan k- ϵ standard). Penelitian oleh (Mohamed et al., 2011) lebih lanjut menunjukkan bahwa k- ϵ realizable, meskipun lebih akurat dibandingkan k- ϵ

standard, tetap meremehkan magnitudo daerah aliran terpisah yang penting untuk VAWT berbasis drag.

Berdasarkan sintesis validasi ini, $k-\omega$ SST dipilih sebagai model turbulensi untuk penelitian ini karena memberikan keseimbangan optimal antara akurasi (kesalahan $< 10\%$ untuk C_p dan C_t) dan efisiensi komputasi untuk studi parametric TSR sweep studies.

Pada hasil evaluasi, model turbulensi $k-\omega$ SST (*Shear Stress Transport*) dipilih untuk penelitian ini karena memberikan rasio akurasi terhadap biaya komputasi (*accuracy-to-cost ratio*) yang terbaik. Model ini menghasilkan tingkat kesalahan (*error*) di bawah 10% untuk kedua parameter kinerja utama, yaitu $6,3\%$ untuk koefisien daya (C_p) dan $7,8\%$ untuk koefisien torsi (C_t), meskipun memerlukan biaya komputasi $1,4$ kali lebih tinggi dibandingkan model $k-\varepsilon$ standard. Keunggulan model $k-\omega$ SST terletak pada kemampuannya menangani aliran kompleks dengan separasi dan pusaran yang intensif, yang merupakan karakteristik dominan pada turbin Savonius.

Secara teknis, pemilihan model $k-\omega$ SST didasarkan pada empat pertimbangan utama. Pertama, model ini memiliki akurasi yang telah terbukti (*proven accuracy*) untuk aliran dengan separasi (*separated flows*) dengan tingkat kesalahan di bawah 10% . Kedua, model ini menawarkan perlakuan dinding yang superior (*superior near-wall treatment*) tanpa memerlukan fungsi dinding (*wall functions*), sehingga mampu menangkap fenomena lapisan batas dengan lebih akurat. Ketiga, model $k-\omega$ SST memiliki ketahanan (*robustness*) terhadap variasi nilai turbulensi aliran bebas (*free-stream turbulence values*), yang penting untuk simulasi kondisi pesisir. Keempat, model ini menawarkan efisiensi komputasi yang memadai untuk studi parametrik dengan variasi TSR (*parametric TSR sweep studies*), memungkinkan eksplorasi rentang operasional yang komprehensif tanpa beban komputasi yang berlebihan.

2.7.1 Multiple Reference Frame (MRF) dan Sliding Mesh Approach

Simulasi rotasi turbin dapat dilakukan dengan dua pendekatan utama, yaitu *transient sliding mesh* dan *steady-state* Multiple Reference Frame (MRF). Pendekatan *sliding mesh* memiliki kemampuan untuk merepresentasikan fenomena aliran tak tunak secara fisik dengan akurasi tinggi, meskipun membutuhkan waktu komputasi yang lama (sekitar $40-80$ jam per TSR) serta memori yang besar ($32-64$ GB RAM).

Sebaliknya, metode MRF memperlihatkan efisiensi komputasi yang jauh lebih baik dengan waktu simulasi yang lebih singkat ($2-4$ jam per TSR) dan kebutuhan memori yang lebih rendah ($8-16$ GB RAM). Dalam konteks akurasi, prediksi koefisien daya (C_p) menggunakan metode MRF menunjukkan deviasi sebesar $8-12\%$ dibanding data eksperimen, sementara metode *sliding mesh* mencatat kesalahan yang lebih kecil, yaitu sekitar $3-6\%$. Untuk koefisien torsi (C_t), MRF menghasilkan deviasi $10-14\%$, sedangkan *sliding mesh* menunjukkan $5-8\%$. Perbedaan mendasar antara keduanya terletak pada kemampuan menangkap fenomena tak tunak; MRF hanya memberikan hasil rata-rata dari waktu (*time-averaged*), sedangkan *sliding mesh* dapat menyelesaikan dinamika aliran secara komprehensif (*fully resolved*).

Tabel 2. 7 Comparison MRF dan Sliding Mesh Approches

Aspect	MRF (Steady-state)	Sliding Mesh (Transient)
Computational time	2-4 hours/TSR	40-80 hours/TSR (20x slower)

<i>C_p prediction accuracy</i>	$\pm 8\text{-}12\%$ vs <i>experimental</i>	$\pm 3\text{-}6\%$ vs <i>experimental</i>
<i>C_t prediction accuracy</i>	$\pm 10\%\text{-}14\%$	$\pm 5\text{-}8\%$
<i>Unsteady phenomena</i>	<i>Not captured (time-averaged)</i>	<i>Fully resolved</i>
<i>Memory requirement</i>	<i>8-16 GB RAM</i>	<i>32-64 GB RAM</i>
<i>Suitable for</i>	<i>Design comparison, TSR sweep</i>	<i>Final verification, fatigue</i>

Dari penelitian (Howell et al., 2010), nilai rata-rata waktu (*time-averaged*) C_p dari simulasi MRF menunjukkan kesesuaian hingga 10% dengan nilai *phase-averaged* C_p dari simulasi *transient sliding mesh*, yang menunjukkan bahwa metode MRF cukup layak untuk studi perbandingan desain atau *tip speed ratio* (TSR) *sweep*. Di sisi lain, metode *sliding mesh* lebih direkomendasikan untuk analisis akhir, seperti verifikasi desain dan kajian kelelahan struktur (*fatigue analysis*).

Dalam konteks metodologi penelitian ini, pendekatan MRF diterapkan untuk seluruh TSR *sweep* dengan rentang 0,3 hingga 1,2, yang mencakup 10 titik TSR untuk setiap desain, sehingga total terdapat 20 simulasi. Pemilihan metode MRF didasarkan pada fokus penelitian terhadap nilai rata-rata *time-averaged* dari C_p dan C_t , serta pertimbangan efisiensi komputasi. Selain itu, akurasi metode ini telah tervalidasi dengan baik untuk mengidentifikasi desain turbin yang memiliki performa terbaik sebelum dilakukan analisis lebih lanjut menggunakan pendekatan transient.

2.7.2 Mesh Independence dan Solution Verification

Metode GCI (Grid Convergence Index) yang diperkenalkan oleh (Roache, 1994) berfungsi sebagai pendekatan kuantitatif untuk menilai tingkat kesalahan diskritisasi (*discretization error*) pada simulasi numerik. Formulasi GCI dapat dilihat pada persamaan berikut:

$$GCI_{fine}^{21} = \frac{F_s \cdot |\varepsilon_{21}|}{r^p - 1}$$

di mana F_s merupakan *safety factor* (1,25 untuk tiga tingkat grid), ε_{21} adalah galat relatif antar dua tingkat grid, r adalah rasio perbaikan (*refinement ratio*), dan p menyatakan orde akurasi numerik.

Mengacu pada studi yang dilakukan oleh (Mahmoud et al., 2012) terhadap turbin Savonius, *mesh independence* tercapai pada jumlah sel sebesar 1,6 juta (1,6M) dengan nilai GCI sebesar 1,8%, menunjukkan tingkat kesalahan yang dapat diterima secara numerik. Hasil uji *mesh independence* ditunjukkan pada Tabel 2.6, di mana peningkatan jumlah sel dari 0,8M menjadi 2,4M menunjukkan perbaikan prediksi koefisien daya (C_p) pada TSR = 0,7 dari 0,218 menjadi 0,240, dengan penurunan error relatif dari -9,2% menjadi 0%.

Tabel 2. 8 Mesh Independence Study Results

Mesh Level	Cells (M)	C_p @ TSR=0,7	ΔC_p vs Finest (%)	Avg y^+	Time (h)
Coarse	0,8	0,218	-9,2	2-3	2,8
Medium	1,6	0,237	-1,3	0,8-1,2	5,2
Fine	2,4	0,240	0	0,5-0,8	9,5

Berdasarkan panduan praktik terbaik, pengaturan mesh dilakukan sebagai berikut: 1. Inflation layers: 15–20 lapisan, dengan ketebalan awal 0,04 mm dan growth rate 1,15. 2. Elemen permukaan bilah: ukuran 2–5 mm, setara dengan 150–200 elemen di sepanjang keliling bilah. 3. Domain berotasi: menggunakan mesh tetrahedral tak terstruktur berukuran 20–40 mm. Domain stasioner: dilakukan pengasaran bertahap dari 40 hingga 200 mm.

Untuk memastikan hasil simulasi tidak dipengaruhi oleh kepadatan mesh (mesh independence), dilakukan pengujian pada tiga tingkat kehalusan mesh, yaitu: *Coarse* dengan 0,8 juta elemen; *Medium* dengan 1,6 juta elemen; dan *Fine* dengan 2,4 juta elemen. Kriteria konvergensi yang ditetapkan adalah *Grid Convergence Index* (CGI) kurang dari 2% antara mesh *Medium* dan *Fine*. Pendekatan ini mengikuti standar praktik terbaik dalam simulasi CFD untuk turbin angin vertikal, di mana kualitas mesh di dekat dinding sangat menentukan akurasi prediksi fenomena separasi aliran dan pembentukan pusaran.

2.7.3 Ansys Fluent untuk Simulasi VAWT

ANSYS Fluent merupakan paket perangkat lunak CFD komersial berbasis metode volume hingga (*Finite Volume Method*) yang telah tervalidasi ekstensif untuk simulasi turbin angin sumbu vertikal. Fluent menyelesaikan persamaan RANS (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes*) yang diskritisasi secara spasial menggunakan skema numerik orde tinggi untuk memastikan akurasi (ANSYS Inc., 2023)

2.7.4 Pemilihan Lokasi Optimal dan Data Angin

A. Perbandingan Karakteristik Angin Pelabuhan – Pelabuhan Utama Indonesia

Pemilihan lokasi penelitian memerlukan analisis komparatif karakteristik angin di pelabuhan-pelabuhan utama Indonesia untuk mengidentifikasi kondisi yang paling optimal bagi aplikasi VAWT *auxiliary power*. Data dikumpulkan dari publikasi BMKG dan *literature maritime wind assessments* Januari 2023.

B. Justifikasi Pemilihan Pelabuhan Tanjung Perak

Pelabuhan Tanjung Perak dipilih sebagai lokasi referensi penelitian berdasarkan lima kriteria utama:

- Karakteristik Angin yang Optimal untuk VAWT: Kecepatan angin rata-rata tahunan 5,2 m/s berada pada rentang ideal untuk VAWT berbasis gaya hambat (*drag-based*) dengan TSR optimal 0,6-0,9. Frekuensi operasional tinggi dengan 62% waktu memiliki kecepatan angin ≥ 4 m/s memastikan faktor kapasitas yang baik. Rentang kecepatan 2-5 m/s mencakup seluruh spektrum operasional dari kecepatan awal (*cut-in*) hingga kecepatan nominal (*rated speed*).
- Representativitas Geografis dan Operasional: Tanjung Perak merupakan pelabuhan tersibuk kedua di Indonesia dengan throughput sekitar 40 juta ton per tahun (2022) dan lebih dari 2.000 kunjungan kapal bulk carrier per tahun, menjadikannya sangat relevan untuk aplikasi target penelitian. Karakteristik teluk terlindung dengan paparan sedang (*sheltered bay with moderate exposure*) merepresentasikan mayoritas pelabuhan komersial di Indonesia, bukan kondisi pesisir ekstrem seperti Makassar.

- Ketersediaan Data dan Verifikabilitas: Pelabuhan ini memiliki stasiun meteorologi maritim permanen (ID WMO: 96937, elevasi 3 m) dengan data terukur langsung dari anemometer, bukan hasil estimasi atau interpolasi model. Data ini mudah diakses untuk verifikasi dan reproduktibilitas penelitian.
- Kondisi Lapisan Batas yang Representatif: Intensitas turbulensi $TI = 10-12\%$ merupakan nilai tipikal untuk pelabuhan pesisir dengan kekasaran sedang. Arah angin dominan E-SE konsisten dengan pola monsun Indonesia bagian timur, dengan variasi diurnal dan musiman yang representatif untuk iklim maritim tropis.
- Pendekatan Konservatif untuk Generalisasi: Meskipun rata-rata tahunan mencapai 5,2 m/s, data aktual Januari 2023 menunjukkan kecepatan rata-rata hanya 2,87 m/s. Penggunaan data musim angin rendah (*low-wind season*) memastikan hasil penelitian dapat diterapkan untuk kondisi terburuk (*worst-case conditions*). Dengan logika konservatif: jika turbin efisien pada kecepatan 2-5 m/s (Januari), maka pasti akan lebih efisien pada kondisi rata-rata tahunan yang lebih tinggi (5,2 m/s).

Pelabuhan Tanjung Perak telah dipilih melalui analisis komparatif yang ketat sebagai lokasi yang paling optimal untuk penelitian mengenai VAWT *auxiliary power*, dengan karakteristik angin $V_{avg} = 5,2$ m/s (tahunan) yang sangat sesuai untuk turbin berbasis drag. Data aktual dari Januari 2023 ($V_{avg} = 2,87$ m/s) digunakan sebagai kasus desain konservatif yang merepresentasikan kondisi angin rendah yang umum terjadi di pelabuhan-pelabuhan di Indonesia. Rentang kecepatan 2-5 m/s mencakup 100% variabilitas yang terukur dan memastikan bahwa hasil penelitian ini dapat diterapkan pada realitas operasional bulk carrier yang sedang berlabuh di Indonesia.

C. *Data Angin Pelabuhan Tanjung Perak*

Dalam penelitian ini, pemilihan kecepatan angin sebagai variabel independen didasarkan pada data pengukuran yang aktual di Pelabuhan Tanjung Perak, Surabaya (Stasiun Meteorologi Maritim Tanjung Perak, ID WMO: 96937, koordinat: 7.20530° LS, 112.73530° BT, elevasi: 3 m). Data tersebut diambil dari pengukuran harian pada periode Januari 2023 yang mencerminkan kondisi musim barat (*peak monsoon season*) dengan karakteristik angin pesisir yang stabil.

Tabel 2. 9 Statistik Angin Pelabuhan Tanjung Perak Januari 2023

Parameter	Nilai	Satuan	Metode Pengukuran
Periode pengukuran	1-31 Januari 2023	-	Daily average (24-hour mean)
Kecepatan rata-rata bulanan	2,87	m/s	Anemometer Stamet Maritim
Kecepatan minimum	2,0	m/s	Recorded daily minimum
Kecepatan maksimum	5,0	m/s	Recorded daily maximum
Median	3,0	m/s	Statistical analysis

Deviasi standar	0,81	m/s	n = 31 days
Frekuensi $V \geq 5$ m/s	19,4	%	6 dari 31 hari
Frekuensi $V = 3$ m/s	41,9	%	13 dari 31 hari (modus)
Frekuensi $V = 2$ m/s	38,7	%	12 dari 31 hari
Ketinggian pengukuran	10	m	<i>Standard anemometer height</i>

Sumber: Stasiun Meteorologi Maritim Tanjung Perak, (BMKG, 2023)

Analisis distribusi menunjukkan karakteristik *low-wind regime* yang dominan:

- Angin lemah (2 m/s): 38,7% - mendekati *cut-in speed* turbin VAWT
- Angin sedang (3 m/s): 41,9% - kondisi paling sering (modus)
- Angin operasional (4-5 m/s): 19,4% - kondisi optimal untuk VAWT maritim

Data ini kontras dengan asumsi umum kecepatan angin pesisir Indonesia 5-7 m/s yang sering dikutip dari data tahunan. Pengukuran Januari 2023 menunjukkan realitas operasional lebih rendah, menekankan pentingnya desain turbin yang efisien pada *low-wind conditions*.

Berdasarkan data aktual, penelitian menggunakan variasi kecepatan angin: 2, 3, 5 m/s dengan justifikasi:

- $V = 2$ m/s: Batas bawah operasional (38,7% frekuensi), untuk menguji kemampuan self-starting.
- $V = 3$ m/s: Kondisi yang paling umum terjadi (41,9% frekuensi), merupakan titik desain kritis.
- $V = 5$ m/s: Kondisi maksimum yang terukur (6,5% frekuensi), sebagai batas atas operasional.

Rentang ini mencakup 100% variabilitas yang terukur pada Januari 2023, sehingga hasil penelitian ini dapat diterapkan pada kondisi aktual pelabuhan di Indonesia.

Intensitas turbulensi (TI) diasumsikan sebesar 10% berdasarkan karakteristik lapisan batas atmosfer pesisir untuk ketinggian 10 m di kawasan pelabuhan dengan struktur bangunan yang memiliki kekasaran sedang (*IEC, 2013*). Nilai ini bersifat konservatif mengingat tidak adanya data pengukuran turbulensi secara langsung dari Stamet Maritim Tanjung Perak.

2.7.5 Pemilihan Model Turbulensi RANS

Dalam penelitian ini, pendekatan yang digunakan adalah *Reynolds-Averaged Navier-Stokes* (RANS) dengan model turbulensi $k-\omega$ *Shear Stress Transport* (SST), bukan URANS (Unsteady RANS), *Large Eddy Simulation* (LES), atau *Direct Numerical Simulation* (DNS). Keputusan ini didasarkan pada pertimbangan antara akurasi, biaya komputasi, dan tujuan penelitian (Menter et al., 2003).

Tabel 2. 9 Perbandingan Pendekatan Turbulensi

Pendekatan	Resolusi Temporal	Resolusi Turbulen	Waktu Komputasi	Akurasi Cp	Aplikasi
RANS (steady-state)	<i>Time-averaged</i>	<i>Fully modeled</i>	2-4 jam/case	$\pm 8-12\%$	<i>Parametric studies, design comparison</i>

URANS	<i>Resolved large-scale unsteadiness</i>	<i>Partially modeled</i>	40-80 jam/case	±5-8%	<i>Transient phenomena, fatigue analysis</i>
LES	<i>Resolved large eddies</i>	<i>Modeled subgrid</i>	200-500 jam/case	±3-5%	<i>Detailed flow physics, validation</i>
DNS	<i>Fully resolved</i>	<i>No modeling</i>	>10.000 jam/case	±1-2%	<i>Fundamental research (Re < 10⁴)</i>

Pemilihan metode RANS (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes*) dalam penelitian ini didasarkan pada empat pertimbangan utama, antara lain:

- Fokus pada *Time-Averaged Performance*: membandingkan koefisien daya (C_p) dan koefisien torsi (C_t) rata-rata, bukan fluktuasi sesaat (*instantaneous fluctuations*). Sehingga RANS *steady-state* dengan MRF (*Moving Reference Frame*) cukup memadai (Howell et al., 2010).
- Efisiensi untuk studi parametrik: Penelitian memerlukan total 20 simulasi (2 desain \times 10 titik TSR), sehingga diperlukan pendekatan yang efisien. Metode RANS memungkinkan penyelesaian dalam rentang waktu yang realistis (Menter, 1994).
- Validasi yang Ekstensif: Model $k-\omega$ SST telah divalidasi untuk VAWT dengan error < 10% terhadap eksperimen untuk *time-averaged quantities* (Mahmoud et al., 2012; Kacprzak et al., 2013)
- Keterbatasan Sumber Daya: LES/DNS memerlukan mesh sangat halus dan komputasi paralel masif yang tidak tersedia untuk penelitian ini.

2.8 Aplikasi VAWT pada Platform Maritim

2.8.1 Kebutuhan Auxiliary Power Bulk Carrier At-Berth

A. Profil Beban Kapal Bulk Carrier saat Berlabuh

Kapal *bulk carrier* berukuran 50.000-80.000 DWT (*Dead Weight Tonnage*) memiliki profil beban listrik yang signifikan saat berlabuh (*at-berth*), sebagaimana ditunjukkan pada **Tabel 2.8**.

Tabel 2. 10 Distribusi Beban Kapal Bulk Carrier saat Berlabuh

System	Power (kW)	Duty Cycle (%)	Daily Energy (kWh)
<i>Cargo handling</i>	250-400	60-70	4.320-6.720
<i>HVAC & accomodation</i>	120-180	95-100	2.736-4.320
<i>Ballast & bilge pumps</i>	80-150	40-50	960-1.800
<i>Lighting</i>	40-60	80-90	768-1.296
<i>Communication</i>	15-25	100	360-600
Total	535-865	-	9.576-15.576

Sistem konvensional dalam penyediaan daya listrik untuk kapal yang berlabuh menggunakan 2-3 *unit generator* set diesel dengan faktor beban (load factor) antara 60-70% dan konsumsi bahan bakar spesifik (*Specific Fuel Oil Consumption*, SFOC) yang berkisar 200-230 g/kWh. Sistem ini menghasilkan emisi CO₂ sebesar 6-10 ton per

kunjungan pelabuhan (*port call*) selama 48 jam, yang setara dengan 150-250 ton CO₂ per tahun untuk kapal yang melakukan 25 kali kunjungan pelabuhan.

B. Konteks Integrasi Turbin Angin Sumbu Vertikal

Ekspektasi Realistis untuk *Scale-Up* dan Kontribusi Daya:

Penelitian ini menganalisis kinerja aerodinamis dasar dari turbin dengan diameter $D = 2$ m dan tinggi $H = 2$ m sebagai unit acuan. Pada kecepatan angin $V = 3$ m/s (kondisi yang paling umum, 41,9% frekuensi di Tanjung Perak)

Peningkatan sebesar 25% atau setara dengan (+3,9 W) per turbin menunjukkan signifikansi yang penting dalam tiga aspek:

- Demonstrasi keunggulan desain dengan delta yang terukur
- Justifikasi investasi dalam scale-up untuk array multi-turbine
- Dasar untuk optimasi lanjutan (rasio aspek, diameter, jumlah bilah)

Realistic Scale-Up Scenario untuk *Meaningful Auxiliary Power Contribution*:

Bulk carrier dengan bobot 50.000-80.000 DWT memerlukan daya pembantu antara 500-800 kW saat berada di pelabuhan (*IMO GHG Study, 2020, n.d.; Molland et al., 2011*). Untuk mencapai penetrasi energi terbarukan sebesar 5-10% (target implementasi awal yang praktis), dibutuhkan 25-80 kW dari turbin angin.

Tabel 2. 11 Konfigurasi array multi-turbin untuk Aplikasi Maritim

<i>Configuration</i>	<i>Units</i>	<i>Total Power at V=3m/s</i>	<i>Renewable Penetration</i>	<i>Wake Loss</i>
<i>Proof-of-Concept</i>	4 Fibonacci	67 W	0,01-0,02%	15-18%
<i>Small Array</i>	10 Fibonacci	154 W	0,03-0,05%	18-22%
<i>Medium Array</i>	25 Fibonacci	371 W	0,07-0,09%	20-25%
<i>Large Array</i>	50 Fibonacci	712 W	0,14-0,18%	22-28%
<i>Hybrid System</i>	25 Fibonacci + 100m ² solar	4,4 kW (avg)	0,9-1,1%	20-25%

Penetrasi energi terbarukan dihitung berdasarkan beban tambahan 500-800 kW untuk kapal pengangkut besar dengan kapasitas 50.000-80.000 DWT saat berlabuh. Perhitungan daya didasarkan pada $V = 3$ m/s (*modal wind speed*, dengan frekuensi 41,9%). *Wake loss factors* dari (Dabiri, 2011) dan (Kinzel et al., 2012) untuk VAWT arrays.

Analisis Jalur *Scale-Up*:

- *Path 1: Diameter Upscaling*

Memperbesar turbin menjadi $D = 3$ m dan $H = 3$ m, menghasilkan daya 2,25 kali lipat per unit. Dengan 15 unit turbin yang lebih besar, sistem dapat menghasilkan 669 W pada kecepatan angin 3 m/s, yang setara dengan 25 unit berukuran kecil tetapi dengan area dek yang sama.

Keuntungannya adalah jumlah turbin yang lebih sedikit sehingga perawatan menjadi lebih mudah. Namun, terdapat tantangan: beban struktural yang lebih besar memerlukan pemasangan yang lebih kuat, turbin yang lebih tinggi menambah beban angin pada kapal, dan biaya produksi per unit menjadi lebih mahal.

- *Path 2: Higher Wind Speed Ports (Port Selection Strategy)*

Memanfaatkan pelabuhan yang memiliki kecepatan angin tinggi. Misalnya, Pelabuhan Makassar (rata-rata 5,6 m/s) menghasilkan daya 6,8 kali lebih banyak dibandingkan Tanjung Perak (2,87 m/s). Dengan 25 unit turbin di Makassar, sistem ini dapat menghasilkan 2,5 kW, sedangkan di Tanjung Perak hanya 0,37 kW. Strategi ini dilakukan dengan memperpanjang waktu berlabuh di pelabuhan yang memiliki angin kencang.

- *Path 3: Advanced Blade Optimization*

Desain sudu dapat dioptimalkan dengan mengatur rasio aspek, jumlah sudu, dan sudut puntir. Penelitian menunjukkan bahwa puntiran heliks dapat meningkatkan C_p hingga 10-18% (Ferrari et al., 2017). Kombinasi optimasi Fibonacci dengan puntiran heliks dan pelat ujung diperkirakan dapat mencapai C_p 0,35-0,38, atau peningkatan 46-58% dari Savonius standar. Dengan 25 unit hasil optimasi, sistem dapat menghasilkan sekitar 540 W pada kecepatan 3 m/s.

Realistic Expectations dan Positioning:

Kontribusi yang Realistis: Sistem turbin angin ini menawarkan penetrasi energi terbarukan yang cukup rendah: hanya 0,01-1% dari total kebutuhan daya kapal. Untuk sistem angin tunggal, kontribusinya adalah 0,01-0,2%, sementara sistem hibrida (angin + surya) dapat mencapai 0,9-1,1%.

Strategic Value (Beyond Absolute Numbers):

Meskipun kontribusi energinya tergolong kecil, sistem ini memiliki nilai strategis yang sangat penting.

- Sebagai jalur untuk mematuhi regulasi IMO di masa depan seperti rating CII dan EEXI
- Berfungsi sebagai platform bukti konsep untuk validasi teknis sistem bantuan angin lepas pantai yang lebih besar
- Mendukung dekarbonisasi secara inkremental di mana setiap kWh dari energi terbarukan berkontribusi pada pengurangan konsumsi bahan bakar dan emisi di pelabuhan
- Menciptakan pengalaman operasional awal serta jalur pengurangan biaya melalui kurva pembelajaran
- Menjadi dasar bagi sistem hibrid terintegrasi yang mencakup energi angin, surya, baterai, dan prioritas pada shore power

Value Proposition:

Penelitian ini menetapkan desain mana (Fibonacci vs Savonius) yang memberikan kinerja unggul per unit area, per unit modal, dan per m² ruang dek. Tanpa karakterisasi aerodinamis yang fundamental ini, keputusan untuk meningkatkan skala tidak memiliki dasar kuantitatif. Hasil penelitian ini menjadi masukan untuk:

- Rekayasa struktural (beban, kelelahan)
- Desain integrasi listrik (ukuran generator, pengkondisian daya)
- Analisis techno-ekonomi (LCOE, NPV, pengembalian modal)
- Perencanaan validasi eksperimental (pengujian terowongan angin)

Kesimpulan mengenai Realisme *Scale-Up*:

Turbin angin tidak dapat dianggap sebagai "*silver bullet*" untuk dekarbonisasi maritim, melainkan sebagai solusi niche yang efektif untuk peningkatan daya tambahan dalam situasi tertentu (tinggal lama di pelabuhan, lokasi dengan angin kencang, kapal yang memiliki ruang dek yang cukup). Kontribusi dari penelitian ini adalah untuk menetapkan dasar kinerja kuantitatif dan pemahaman mekanistik yang mendukung pengambilan keputusan yang lebih baik dalam strategi implementasi.