

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Industri pelayaran global menyumbang 2,89% dari total emisi CO₂ global (1.076 juta ton pada tahun 2018), dengan proyeksi peningkatan sebesar 130% pada tahun 2050 tanpa adanya intervensi teknologi (*Fourth IMO GHG Study 2020 - Full Report and Annexes*, n.d.). Teknologi penggerak yang dibantu oleh angin seperti *WindWings* dapat mengurangi emisi hingga 30% saat berlayar, tetapi kapal tetap menghasilkan emisi yang signifikan saat berlabuh dengan generator diesel *auxiliary* yang beroperasi secara kontinu selama 48-72 jam per panggilan pelabuhan.

Kapal *bulk carrier* 50.000-80.000 DWT memerlukan *auxiliary power* 500-800 kW saat *at-berth* untuk sistem operasional kontinyu (*IMO GHG Study, 2020*, n.d.; Molland et al., 2011). *Generator diesel auxiliary* beroperasi dengan konsumsi bahan bakar spesifik 200-230 g/kWh, menghasilkan 150-250 ton CO₂ per tahun untuk kapal dengan durasi berlabuh rata-rata 48-72 jam per kunjungan dan frekuensi 25 kali per tahun (*IMO GHG Study, 2020*, n.d.). Di Indonesia, yang memiliki ratusan pelabuhan aktif, hanya terdapat 5-10 pelabuhan yang memiliki *shore power*, sehingga memaksa ketergantungan penuh pada diesel. Karakteristik kapal *bulk carrier* saat berlabuh sangat cocok untuk VAWT: posisi stasioner, ruang dek yang luas (4.000-5.000 m²), potensi angin pesisir 5-7 m/s, dan stabilitas yang tinggi.

Turbin Savonius sebagai VAWT berbasis drag memiliki keunggulan untuk aplikasi maritim: *self-starting* yang sangat baik ($T_{start} < 2$ m/s), struktur sederhana yang tahan korosi, operasi *low-TSR* yang sesuai dengan batasan struktural dek, dan keandalan yang terbukti (Tjiu et al., 2015). Namun, efisiensi yang rendah ($C_p = 0,20-0,24$) menjadi batasan fundamental akibat torsi negatif dari *returning blade*, *vortex shedding* yang intensif, dan rasio *lift-to-drag* yang suboptimal (Akwa et al., 2012).

Pendekatan biomimikri dengan geometri spiral yang berbasis pada rasio emas ($\phi = 1,618$) menawarkan solusi inovatif. Spiral Fibonacci dengan implementasi pola Archimedes di mana jarak dan perkembangan kelengkungan mengikuti rasio emas menghasilkan transisi kelengkungan yang halus yang mengurangi gradien tekanan yang merugikan dan menunda pemisahan aliran (Thompson, 2010; Vogel, 1996). Rasio emas bukanlah pilihan sembarangan, tetapi merepresentasikan prinsip optimasi alami yang terbukti meminimalkan dissipasi energi dalam sistem aliran biologis seperti *locomotion* cangkang nautilus (Jacobs & Chamberlain, 1996) dan aerodinamika sayap raptor (Tucker, 2000).

Pemilihan *golden ratio* untuk VAWT didasarkan pada tiga prinsip teoretis. Pertama, transfer momentum yang halus melalui progresivitas rasio ϕ menghasilkan laju perubahan kelengkungan yang seragam, sehingga meminimalkan lonjakan gradien tekanan negatif. Kedua, rasio emas memaksimalkan luas kontak permukaan dengan aliran sambil meminimalkan pembentukan *wake*, sesuai dengan prinsip "*On Growth and Form*" (Thompson, 2010). Ketiga, sifat *self-similar scaling* dengan properti $\phi^2 = \phi + 1$ menghasilkan perkembangan lapisan batas seperti fraktal yang secara alami sesuai dengan kaskade energi turbulen, berpotensi mengurangi dissipasi turbulen (Mandelbrot, 1999).

Penerapan spiral Archimedes yang berbasis pada Fibonacci ($r = r_0 + b\theta$ dengan parameter b yang dikalibrasi untuk menghasilkan jarak spiral $d_n = d_0 \cdot \phi^n$) secara hipotesis memberikan tiga keuntungan aerodinamis, yaitu, pemulihan tekanan yang bertahap dengan pengurangan $|\partial p / \partial s|$ sekitar 35% dibandingkan dengan jarak seragam; penundaan separasi dengan perluasan daerah aliran menempel dari 40% menjadi 60-70% panjang *chord*; dan

penurunan intensitas pelepasan pusaran melalui interferensi konstruktif dalam dinamika *wake*. Penelitian terbatas menunjukkan bahwa sudu spiral berbasis Fibonacci dapat meningkatkan C_p sebesar 12,5-16,7% dengan pengurangan fluktuasi torsi hingga 33% (Li et al., 2015; Chen et al., 2015).

Kesenjangan yang teridentifikasi dalam penelitian kritis adalah tidak adanya studi komparatif sistematis antara turbin Fibonacci dan Savonius dalam kondisi maritim yang realistis. Penelitian ini menggunakan variasi kecepatan angin pesisir Indonesia (2-5 m/s) sebagai variabel independen dengan intensitas turbulensi $TI = 10-15\%$. Dalam pendekatan ini, kecepatan angin merepresentasikan kondisi lingkungan operasional yang tidak dapat dikontrol di lapangan. TSR (*Tip Speed Ratio*) berfungsi sebagai parameter output yang dihasilkan dari keseimbangan dinamis antara torsi aerodinamis turbin dan resistansi beban generator pada setiap kecepatan angin. Penelitian bertujuan untuk: (1) mengkuantifikasi keunggulan performa turbin pada rentang kecepatan angin operasional 2-5 m/s; dan (2) memberikan rekomendasi jenis turbin optimal untuk aplikasi *auxiliary power bulk carrier at-berth* berdasarkan analisis komparatif performa aerodinamika untuk optimasi dan penskalaan di masa depan.

Dalam konteks penskalaan yang realistis, turbin berdiameter 2 m menghasilkan daya antara 147 W (Savonius) hingga 184 W (Fibonacci) per unit pada kecepatan angin 5 m/s. Sistem multi-turbin dengan 20-50 unit dapat memberikan kontribusi antara 3,68-9,2 kW, yang setara dengan 0,5-1,8% dari penetrasi energi terbarukan terhadap total beban tambahan 500-800 kW. Untuk dampak yang lebih signifikan, diperlukan sistem hibrid angin-surya, kombinasi 25 unit Fibonacci (4,6 kW) dengan panel surya seluas 150 m² (25 kW puncak) dapat menghasilkan rata-rata 15-20 kW secara gabungan, mencapai penetrasi energi terbarukan 3-4%. Pendekatan ini bukan solusi mandiri, melainkan langkah awal (*foundation step*) untuk dekarbonisasi maritim secara inkremental dan sebagai bukti konsep (*proof-of-concept*) integrasi energi terbarukan di kapal.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, rumusan masalah dalam penelitian ini untuk aplikasi *auxiliary power bulk carrier at berth* adalah:

1. Perbandingan kinerja aerodinamika antara turbin Fibonacci dan Savonius berdasarkan parameter C_p , C_t , dan TSR untuk *auxiliary power* pada *bulk carrier at-berth*.
2. Rekomendasi jenis turbin yang tepat untuk mendukung *auxiliary power* di kapal *bulk carrier* saat *at-berth*.

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah ditetapkan, tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mengkuantifikasi perbandingan performa aerodinamis turbin Fibonacci dan Savonius melalui analisis C_p , C_t , dan TSR dengan kecepatan angin 2-5 m/s.
2. Memberikan rekomendasi jenis turbin optimal untuk aplikasi *auxiliary power bulk carrier at-berth* berdasarkan analisis komparatif performa aerodinamika.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat baik secara teoritis maupun praktis sebagai berikut:

1.4.1 Manfaat Teoritis

1. Validasi teoretis dari prinsip optimasi *golden ratio* dalam desain bilah VAWT.

2. Pemahaman kuantitatif tentang mekanisme fisika aliran (perataan gradien tekanan, pemisahan yang tertunda, pengurangan *vortex*) pada geometri yang berbasis Fibonacci.
3. Validasi metodologi CFD $k-\omega$ SST untuk aplikasi VAWT maritim dengan angin rendah.

1.4.2 Manfaat Praktis

1. Rekomendasi desain turbin berdasarkan data kuantitatif dan justifikasi teoretis untuk daya bantu maritim.
2. Data kinerja dasar untuk pengembangan *prototipe* dan skala *array multi-turbine*.
3. Dasar teknis untuk sistem hibrida angin-solar-baterai di pelabuhan Indonesia.
4. Data pendukung untuk kebijakan energi terbarukan dan kepatuhan dekarbonisasi IMO.

1.5 Batasan Masalah

Untuk memfokuskan ruang lingkup penelitian, batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Simulasi kondisi *bulk carrier stasioner at-berth*.
2. Dua konfigurasi turbin: Savonius konvensional dan Fibonacci-based Archimedes spiral, $D = 2$ m.
3. *Steady-state* CFD dengan MRF di ANSYS Fluent, model turbulensi $k-\omega$ SST dan $k-\epsilon$.
4. Parameter evaluasi: C_p , C_t , TSR.
5. Penelitian tidak mencakup analisis struktural, perancangan sistem elektrikal, analisis ekonomi, pengujian eksperimental, maupun pengaruh interferensi antar turbin.
6. Variasi kecepatan angin sebagai variabel independen: 2, 3, dan 5 m/s yang mencerminkan rentang operasional pesisir Indonesia berdasarkan data (BMKG, 2023) di pelabuhan Tanjung Perak (Surabaya). TSR merupakan parameter *output* yang dihasilkan dari kondisi keseimbangan aerodinamis turbin pada setiap kecepatan angin. Koefisien daya (C_p) merujuk pada koefisien daya mekanis (*mechanical power coefficient*) yang dihitung dari torsi poros dan kecepatan rotasi sebelum konversi ke daya listrik.

1.6 Hipotesis Penelitian

Berdasarkan penelitian terdahulu oleh (Li et al., 2015) dan (Chen et al., 2015), turbin spiral Fibonacci dengan geometri berbasis *golden ratio* dihipotesiskan menghasilkan koefisien daya (C_p) lebih tinggi dibanding turbin Savonius konvensional pada rentang kecepatan angin 2-5 m/s, dengan fluktuasi torsi yang berkurang hingga 33%. Peningkatan performa ini terjadi karena transisi kelengkungan yang halus menghasilkan distribusi tekanan lebih merata, menunda separasi aliran, dan mengurangi intensitas pelepasan pusaran (*vortex shedding*), sesuai dengan prinsip optimasi alami (*natural optimization principle*) yang telah terbukti konsisten dalam geometri spiral.

1.7 Luaran Penelitian

Penelitian ini diharapkan menghasilkan dua luaran utama sebagai berikut:

1. Publikasi Ilmiah, artikel ilmiah pada jurnal terindeks Scopus Q4 atau Q3 dengan minimal Sinta 2.
2. Dokumen Hak Kekayaan Intelektual (HKI)
Pengajuan hak cipta untuk video simulasi analisis turbin angin Savonius melalui Biro Inovasi Universitas Diponegoro.