

# BAB I PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang

Efisiensi energi dan pengurangan emisi dalam operasi maritim sudah menjadi prioritas global. Transisi energi menuju sumber terbarukan menjadi fenomena global yang kian mendesak (Melnyk dkk., 2023). International Maritime Organization (IMO) telah menetapkan target pengurangan emisi minimal 20% (*strive 30%*) pada tahun 2030 dan mencapai *net-zero emissions* pada sekitar 2050 (IMO, 2023). Tercatat bahwa industri pelayaran internasional mengonsumsi sekitar 330 juta ton bahan bakar fosil per tahunnya (Hsieh & Felby, 2017) dan berkontribusi sebesar 3% terhadap total emisi gas rumah kaca global pada tahun 2022 (SINAY, 2023). Upaya dekarbonisasi pada sektor maritim ini tidak hanya menuntut pengurangan konsumsi bahan bakar fosil, tetapi juga menghadirkan kebutuhan akan sumber energi alternatif yang mampu menyediakan listrik cadangan secara berkelanjutan (Issa dkk., 2022). Transformasi energi di sektor maritim sejatinya tidak dapat dilepaskan dari perubahan pola konsumsi energi global. Peningkatan kebutuhan listrik yang terus berlangsung di berbagai sektor menjadi salah satu faktor utama yang mendorong percepatan pemanfaatan sumber energi terbarukan (Koumentakos, 2019).

Energi angin telah menjadi salah satu pilar utama dalam transisi ini, dalam konteks nasional, Indonesia memiliki potensi energi angin laut yang cukup besar. Menurut laporan resmi Kementerian ESDM tahun 2024, potensi teknis energi angin Indonesia mencapai sekitar 154,6 GW, dengan rincian 60,4 GW *Onshore* dan 94,2 GW *Offshore* (Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, 2024). Besarnya potensi angin laut Indonesia ini juga tidak berdiri sendiri, melainkan mencerminkan arah perkembangan global yang juga bergerak pesat. Hal ini terlihat dari kapasitas pembangkit listrik tenaga angin lepas pantai yang terpasang saat ini sebesar 35 GW diperkirakan akan mencapai sekitar 382 GW pada tahun 2030 dan sekitar 2.002 GW pada tahun 2050 (Bilgili & Alphan, 2022). Tren pertumbuhan ini menunjukkan bahwa pemanfaatan angin lepas pantai tidak hanya signifikan untuk pembangkit skala besar, tetapi juga relevan untuk pengembangan aplikasi maritim seperti penyediaan energi cadangan di kapal (Melnyk dkk., 2024). Meskipun Indonesia memiliki potensi energi angin lepas pantai yang sangat besar dan teknologi turbin angin telah dikembangkan secara luas untuk pembangkit listrik skala besar di pembangkit listrik tenaga angin lepas pantai (Fauzi dkk., 2024) namun, penerapan teknologi ini dalam konteks kapal lepas pantai masih sangat terbatas. Mengacu pada penelitian terdahulu lebih banyak menitik beratkan pada desain turbin angin untuk pembangkit listrik skala besar di daratan maupun lepas pantai (Hu dkk., 2024). Sementara penggunaan turbin angin sebagai sumber energi cadangan pada kapal lepas pantai seperti kapal *Floating Production Storage and Offloading* (FPSO) belum banyak diteliti.



Gambar 1. 1 *Wind-Powered Cargo Ships the Future of the Shipping Industry*

Penerapan turbin angin pada kapal *Offshore* tentu menghadapi tantangan teknis yang kompleks akibat karakteristik lingkungan operasional yang berbeda secara fundamental dari

instalasi darat. Kondisi angin laut dicirikan oleh fluktuasi kecepatan dan arah yang tinggi, turbulensi akibat interaksi dengan permukaan air dan struktur kapal, serta keterbatasan ruang instalasi pada dek kapal yang menuntut desain turbin yang *compact* namun tetap efisien (Shaw dkk., 2022). Selain itu, turbin harus mampu beroperasi pada spektrum kecepatan angin yang luas dan memiliki kemampuan *self-starting* yang baik untuk merespons perubahan kondisi angin secara cepat. Tantangan-tantangan tersebut menjadi pertimbangan utama dalam menentukan desain turbin yang optimal untuk aplikasi kapal *Offshore* (Y. Li dkk., 2009).

Dalam menentukan desain yang optimal, penelitian ini mengkaji dua paradigma yang memiliki landasan filosofis berbeda, yaitu pendekatan optimasi geometri konvensional dan pendekatan biomimetik. Paradigma pertama merupakan pendekatan konvensional yang menggunakan desain turbin yang telah dikembangkan dan diaplikasikan secara luas serta banyak diteliti, seperti turbin *Darrieus* dan *Savonius*. Penelitian mengenai VAWT terus berkembang dalam dekade terakhir, menyoroti peningkatan performa turbin *Darrieus* melalui optimasi bilah menggunakan CFD (Fertahi dkk., 2025). Penelitian terbaru juga menunjukkan bahwa konfigurasi ganda pada turbin *Darrieus* dapat meningkatkan efisiensi aerodinamika, melalui simulasi CFD yang dilakukan dengan desain *double-deflector* pada turbin H-*Darrieus*, terbukti lebih efektif dalam meningkatkan koefisien daya dibandingkan desain konvensional (Chen dkk., 2024). Meskipun pendekatan optimasi konvensional telah memberikan peningkatan performa yang signifikan, keterbatasan fundamental pada geometri dasar turbin *Darrieus* seperti distribusi sudut bilah yang simetris tetap menjadi faktor pembatas efisiensi. Paradigma kedua menawarkan pendekatan yang secara fundamental berbeda dengan mengadopsi prinsip-prinsip geometri yang ditemukan dalam sistem alamiah. Pendekatan biomimetik didasarkan pada premis bahwa struktur biologis telah mengalami optimasi evolusioner selama jutaan tahun untuk memaksimalkan efisiensi dalam menangkap dan mendistribusikan energi (Omidvarnia & Sarhadi, 2024).

Berdasarkan klasifikasi paradigma tersebut, penelitian ini mengkaji dua desain turbin yang merepresentasikan masing-masing pendekatan, yaitu turbin *Darrieus* sebagai representasi desain konvensional dan turbin *Fibonacci-Spiral* sebagai representasi desain biomimetik. Turbin *Darrieus* merupakan salah satu jenis VAWT yang paling banyak diteliti karena kesederhanaan konstruksinya dan kemampuannya menerima angin dari segala arah, namun memiliki keterbatasan berupa kemampuan *self-starting* yang buruk karena torsi negatif yang dihasilkan pada rentang *Tip Speed Ratio* rendah di bawah kondisi operasional (Mohamed dkk., 2021). Sementara itu, turbin *Fibonacci-Spiral* mengadopsi prinsip golden ratio ( $\phi \approx 1,618$ ) dalam konfigurasi bilahnya, di mana distribusi sudut berdasarkan *golden angle* ( $\approx 137,5^\circ$ ) mampu meminimalkan interferensi antar-bilah dan mengoptimalkan penangkapan energi angin. Patil dalam penelitiannya melaporkan bahwa turbin *Fibonacci-Spiral* dapat mencapai efisiensi maksimum teoritis hingga 71,38% dengan kemampuan beroperasi pada kecepatan angin rendah mulai dari 5 m/s (Y. Patil, 2018). Krishnakumar juga menyebutkan efisiensi maksimum yang bisa dicapai oleh turbin angin sumbu horizontal dengan bilah berbentuk spiral *Archimedes* yang didesain mengikuti deret Fibonacci dapat mencapai hingga 65,02% pada kecepatan angin 3–10 m/s, dengan karakteristik aliran udara halus, minim turbulensi, dan kebisingan rendah ( $<42$  dB) (Krishnakumar dkk., 2025). Selain itu, penelitian lain tentang penerapan *Fibonacci-Spiral* pada bilah turbin terbukti mampu meningkatkan koefisien daya sekitar 14% dibandingkan profil *Savonius* konvensional (Damota dkk., 2022). Studi-studi ini tentu memperkuat relevansi bioinspirasi *Fibonacci* dalam meningkatkan kinerja aerodinamika.

Meskipun kedua pendekatan desain telah menunjukkan hasil yang menjanjikan secara terpisah, kajian komparatif yang membandingkan keduanya secara langsung masih sangat terbatas. Sebagian besar penelitian terdahulu berfokus pada optimasi desain tunggal tanpa melakukan perbandingan aerodinamika antara pendekatan konvensional dan biomimetik dalam kondisi operasional yang setara. Ditinjau dari karakteristiknya, HAWT umumnya

memiliki efisiensi yang lebih tinggi (mencapai 50%) dibandingkan VAWT (mencapai 40%), namun HAWT memerlukan sistem *yaw* untuk menyesuaikan orientasi terhadap arah angin, sementara VAWT bersifat *omnidirectional* dan memiliki torsi yang lebih besar meskipun dengan keterbatasan pada kemampuan *self-starting* (Al-Rawajfeh & Gomaa, 2023). Penelitian lebih lanjut mengenai simulasi CFD untuk kondisi laut yang realistis masih diperlukan, terutama dalam mengembangkan model yang dapat mengakomodasi di atas kapal *Offshore*. Simulasi Computational Fluid Dynamics (CFD) sendiri merupakan metode yang efektif untuk menganalisis performa desain turbin secara detail tanpa harus melalui eksperimen mahal di lapangan (Sravanthi dkk., 2024). Kesenjangan penelitian ini menunjukkan urgensi dilakukannya studi komparatif yang dapat memberikan evaluasi objektif terhadap kedua pendekatan desain.

Berdasarkan kesenjangan penelitian yang telah diidentifikasi, penelitian ini bertujuan untuk melakukan studi komparatif kinerja aerodinamika turbin angin *Darrieus* dan *Fibonacci-Spiral* pada kondisi angin laut melalui simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Tanpa adanya kajian komparatif semacam ini, sulit untuk menentukan secara objektif desain mana yang lebih unggul dalam hal koefisien daya, koefisien gaya dorong serta *Tip Speed Ratio* optimal. Analisis difokuskan pada parameter utama berupa koefisien daya ( $C_p$ ), koefisien gaya dorong ( $C_t$ ), serta *Tip Speed Ratio* (TCR) optimal untuk mengevaluasi performa konversi energi dan kestabilan operasi. Selain itu, parameter pendukung seperti distribusi tekanan, gaya angkat, dan gaya *drag* dianalisis guna menjelaskan fenomena aerodinamika yang memengaruhi perbedaan performa kedua desain turbin. Secara teoritis, penelitian ini diharapkan memperluas wawasan ilmiah dalam bidang aerodinamika turbin angin, khususnya terkait efektivitas penerapan desain bioinspirasi *Fibonacci-Spiral* dibandingkan desain konvensional *Darrieus* berdasarkan parameter  $C_p$  dan  $C_t$ . Dengan latar belakang yang telah dipaparkan, peneliti memandang penting untuk melakukan penelitian dengan judul “Studi Komparatif Performa Aerodinamika Turbin Angin *Darrieus* (VAWT) Dan *Fibonacci* (HAWT) Melalui Simulasi CFD Untuk Aplikasi Listrik Cadang Di Kapal *Offshore* (FPSO)”.

## 1.2 Rumusan Masalah

Merujuk pada latar belakang yang telah diuraikan, dapat diidentifikasi beberapa permasalahan penelitian sebagai berikut:

1. Perbandingan kinerja aerodinamika turbin *Darrieus* (VAWT) dengan turbin *Fibonacci-Spiral* (HAWT) berdasarkan parameter Koefisien Daya ( $C_p$ ), Koefisien Torsi ( $C_t$ ), dan Tip Speed Ratio (TSR) melalui simulasi Computational Fluid Dynamics (CFD).
2. Pemberian rekomendasi jenis turbin yang sesuai untuk mendukung listrik cadang di kapal *offshore* (FPSO) berdasarkan hasil analisis performa aerodinamika.

## 1.3 Tujuan Penelitian

1. Membandingkan kinerja aerodinamika turbin *Darrieus* (VAWT) dengan turbin *Fibonacci-Spiral* (HAWT) berdasarkan parameter Koefisien Daya ( $C_p$ ), Koefisien Torsi ( $C_t$ ), dan Tip Speed Ratio (TSR) melalui simulasi Computational Fluid Dynamics (CFD) untuk menentukan turbin yang memiliki performa lebih optimal pada setiap parameter dalam kondisi angin laut.
2. Memberikan rekomendasi jenis turbin yang paling sesuai untuk mendukung sistem listrik cadangan di kapal *offshore* (FPSO) berdasarkan hasil evaluasi komprehensif dari parameter kinerja aerodinamika, karakteristik distribusi tekanan, serta kesesuaian dengan kondisi operasi maritim.

## 1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang akan didapatkan dari penelitian tugas akhir ini adalah

## 1. Manfaat Teoritis

Secara teoritis, penelitian ini dapat memberikan kontribusi terhadap pengayaan literatur ilmiah di bidang aerodinamika turbin angin, khususnya melalui analisis komparatif antara desain konvensional *Darrieus* dan desain biomimetik *Fibonacci-Spiral* dalam kondisi operasional maritim. Penelitian ini tidak hanya memperdalam pemahaman mengenai fenomena fisik seperti karakteristik aliran dan distribusi tekanan yang mempengaruhi performa turbin tetapi juga turut mengembangkan metodologi simulasi Computational Fluid Dynamics (CFD) yang spesifik untuk aplikasi kelautan. Data fundamental yang dihasilkan dari analisis karakteristik aerodinamika ini diharapkan menjadi landasan yang kokoh bagi penelitian lanjutan, terutama dalam upaya optimasi desain turbin angin untuk memaksimalkan efisiensi pemanenan energi di lingkungan laut yang dinamis.

## 2. Manfaat Praktis

Dari sudut pandang praktis, hasil penelitian ini memberikan rekomendasi teknis yang objektif untuk industri energi terbarukan dan sektor maritim dalam memilih desain turbin angin yang efisien untuk diterapkan pada kapal maupun instalasi lepas pantai. Informasi ini sangat penting untuk mendukung pengambilan keputusan investasi teknologi serta transisi menuju operasi maritim yang lebih berkelanjutan (*green shipping*). Selain itu, temuan ini dapat digunakan sebagai acuan dalam penyusunan kebijakan energi nasional, terutama dalam memanfaatkan potensi angin di daerah kepulauan Indonesia, sekaligus mendorong kemandirian teknologi nasional melalui pengembangan sistem energi alternatif yang sesuai dengan karakteristik lingkungan maritim lokal.

## 3. Manfaat untuk Pengembangan Keilmuan Perkapalan

Dalam konteks pengembangan ilmu Teknik Perkapalan, penelitian ini memperkuat integrasi multidisiplin antara mekanika fluida, teknologi energi terbarukan, dan arsitektur perkapalan modern. Studi ini memperluas spektrum keahlian teknik perkapalan dengan mengembangkan kompetensi aplikasi CFD untuk analisis sistem energi, bukan hanya hidrodinamika kapal konvensional. Hal ini membuka peluang riset lanjutan yang menggabungkan kepakaran arsitektur laut dengan teknologi energi hijau, sejalan dengan tren global industri maritim menuju dekarbonisasi dan efisiensi energi.

## 1.5 Batasan Masalah

Penelitian ini memiliki beberapa batasan yang perlu ditetapkan untuk menjaga fokus dan kedalaman analisis, antara lain :

1. Metode Simulasi : Analisis menggunakan simulasi 3D Computational Fluid Dynamics (CFD) dengan software ANSYS Fluent.
2. Kondisi Angin : Simulasi dilakukan pada kondisi *steady flow* dengan kecepatan angin berdasarkan data yang tersedia didapatkan dari BMKG.
3. Spesifikasi Turbin : Model turbin yang digunakan adalah *Darrieus* dan *Fibonacci-Spiral* dengan jumlah bilah yang sama dan luas sapuan daerah yang sama .
4. Parameter Evaluasi : Analisis difokuskan pada desain geometrik, koefisien daya ( $C_p$ ), koefisien torsi ( $C_t$ ), Tip Speed Ratio (TSR), distribusi tekanan, dan pola aliran di sekitar turbin.
5. Validasi Model : Validasi hasil simulasi dilakukan melalui perbandingan dengan data literatur yang tersedia, tidak melakukan eksperimen fisik secara langsung.
6. Aspek yang Tidak Dicakup : Penelitian tidak mencakup analisis struktural, *fatigue loading*, pengaruh turbulensi atmosferik kompleks, interaksi dengan struktur kapal, pembiayaan, maupun aspek ekonomi implementasi.
7. Lingkup Geografis : Kondisi simulasi disesuaikan dengan karakteristik angin laut di perairan Indonesia merujuk pada data meteorologi yang tersedia.

## 1.6 Hipotesis

Berdasarkan kajian teoretis dan hasil penelitian sebelumnya, hipotesis dalam studi ini adalah terdapat perbedaan yang signifikan dalam karakteristik kinerja aerodinamika antara turbin *Darrieus* (VAWT) dan turbin *Fibonacci-Spiral* (HAWT). Turbin *Darrieus* memiliki keterbatasan berupa fluktuasi torsi sepanjang siklus rotasi serta kemampuan *self-starting* yang rendah pada TSR rendah (Fertahi dkk., 2023, 2025; Gallegos-Molina & Chavero-Navarrete, 2025; Naik & Sahoo, 2024). Di sisi lain, desain *Fibonacci-Spiral* yang mengadopsi prinsip *golden ratio* dan *golden angle* ( $\approx 137,5^\circ$ ) menghasilkan distribusi aliran yang lebih merata dan keunggulan *self-starting* pada kecepatan angin rendah. (Fertahi dkk., 2023, 2025; Gallegos-Molina & Chavero-Navarrete, 2025; Naik & Sahoo, 2024). Penelitian ini menguji hipotesis bahwa turbin *Darrieus* lebih unggul dalam koefisien daya ( $C_p$ ) dan koefisien torsi ( $C_t$ ) secara keseluruhan, sedangkan turbin *Fibonacci-Spiral* lebih unggul dalam kemampuan *self-starting* pada kecepatan angin rendah dengan tren TSR yang terus meningkat. Hipotesis nol ( $H_0$ ) menyatakan bahwa tidak terdapat perbedaan signifikan antara kedua turbin pada ketiga parameter tersebut.

## 1.7 Luaran Penelitian

Output atau rencana luaran yang dihasilkan oleh penelitian ini berupa :

1. HAKI (Hak Kekayaan Intelektual) berupa Karya Rekaman Video Simulasi
2. Publikasi Karya Ilmiah dalam bentuk artikel jurnal pada beberapa tingkatan, dengan target publikasi bertahap sebagai berikut:
  - Jurnal internasional bereputasi terindeks Scopus dengan kategori Q4 atau Q5 sebagai target awal untuk menjangkau audiens internasional dan membangun *track record* publikasi internasional.
  - Jurnal nasional terakreditasi Sinta 2 sebagai target publikasi untuk memperkuat kontribusi penelitian di tingkat nasional dan meningkatkan visibilitas di kalangan akademisi Indonesia.
  - Jurnal Gading sebagai publikasi tambahan untuk mendiseminasikan hasil penelitian kepada program studi dan memperluas jangkauan pembaca di lingkungan Teknologi Rekayasa Konstruksi Perkapalan.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*