

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Penelitian mengenai pemanfaatan teknologi *sail rotor* sebagai sistem propulsi tambahan pada kapal besar, termasuk Tanker, telah dilakukan oleh berbagai pihak, baik akademisi maupun industri. Berikut adalah beberapa penelitian terdahulu yang menjadi dasar dalam pengembangan teknologi ini:

Tabel 2. 1 Penelitian Terdahulu

No	Pene- -liti	Tahun	Metode	Fokus Penelitian	Hasil Utama	Model Sail Rotor
1	Smit h et al. (UC L)	2018	Simulasi & Studi Literatur	Meneliti kontribusi <i>sail rotor</i> sebagai sistem propulsi bantu dalam meningkatkan efisiensi energi pada <i>Very Large Crude Carrier (VLCC)</i> besar dan dampaknya terhadap nilai EEDI sesuai regulasi IMO.	Studi menunjukkan bahwa pemasangan <i>sail rotor</i> mampu menurunkan konsumsi bahan bakar sebesar 5–10%, dengan peningkatan nilai EEDI kapal hingga melebihi standar minimum yang ditetapkan IMO, menjadikannya solusi potensial untuk <i>Very</i>	Silinder konven- sional Ø3 m, tinggi 18 m

					<i>Large Crude Carrier (VLCC)</i> berbobot besar.	
2	Lu et al.	2019	Simulasi CFD (multi-rotor)	Menganalisis pengaruh interaksi aliran udara antar beberapa <i>sail rotor</i> yang dipasang pada kapal <i>Very Large Crude Carrier (VLCC)</i> serta bagaimana konfigurasi dan jarak antar rotor memengaruhi efisiensi gaya Magnus.	Hasil simulasi menunjukkan bahwa jarak antar rotor yang diatur dengan baik menghasilkan peningkatan gaya dorong Magnus secara signifikan, serta memaksimalkan kontribusi propulsi tambahan tanpa menyebabkan turbulensi yang merugikan antar rotor.	4 rotor Ø4 m, tinggi 20 m, posisi linear

3	Norsepower & SWS	2020	Studi Lapangan (Fehn Pollux)	Mengevaluasi kinerja aktual dari sistem <i>sail rotor</i> yang dipasang di atas kapal <i>Very Large Crude Carrier (VLCC)</i> , khususnya efisiensi bahan bakar dan kesesuaian terhadap klasifikasi dari lembaga seperti ABS.	Studi lapangan membuktikan bahwa penggunaan dua <i>sail rotor</i> Norsepower memberikan penghematan bahan bakar sekitar 10% dalam kondisi operasional nyata. Proyek ini juga mendapatkan pengakuan dari klasifikasi ABS sebagai sistem propulsi bantu yang memenuhi standar keamanan dan efisiensi.	Norsepower Rotor Ø4 m, tinggi 24 m (2x)
4	Yoon et al.	2021	Eksperimen Laboratorium	Menginvestigasi hubungan antara kecepatan rotasi <i>sail rotor</i> dan gaya Magnus yang dihasilkan, serta	Hasil eksperimen di skala laboratorium menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan putar rotor memiliki	Skala laboratorium Ø0.3 m, variasi RPM

				menentukan rasio kecepatan ujung rotor (TSR) optimal.	korelasi langsung terhadap besarnya gaya Magnus hingga titik optimum tercapai, yaitu pada nilai TSR antara 2 hingga 3. Setelah titik tersebut, efisiensi menurun karena drag meningkat.	
5	Putra (ITS)	2022	Simulasi Desain Awal	Menilai pengaruh posisi pemasangan <i>sail</i> rotor terhadap kestabilan kapal dan efisiensi dorong di kapal catamaran wisata.	Hasil analisis menunjukkan bahwa konfigurasi <i>sail</i> rotor yang ditempatkan simetris di tengah kapal memberikan keseimbangan gaya dan meningkatkan efisiensi dorong tanpa mengorbankan stabilitas kapal, terutama saat manuver dan	3 rotor Ø2.5 m, tinggi 12 m

					menghadapi angin samping.	
6	Am mar & Sedd iek	2021	Studi Teoritis	Menganalisis penggunaan <i>sail rotor</i> untuk meningkatkan EEDI pada kapal kargo dan tanker dengan fokus pada efisiensi bahan bakar dan pengurangan emisi CO ₂ .	Penelitian menunjukkan bahwa rotasi <i>sail rotor</i> dapat meningkatkan propulsi kapal dengan mengurangi konsumsi bahan bakar lebih dari 7%, yang pada akhirnya memberikan peningkatan EEDI yang signifikan pada kapal yang diuji.	Ø3 m, tinggi 15 m, RPM 200–400

7	Ange lini et al.	2023	Studi Tekno- ekonomi & Regulasi	Meneliti penerapan <i>sail</i> <i>rotor</i> dalam memenuhi target EEDI IMO Phase 3 pada kapal pesiar dan kargo besar.	Hasil penelitian menyatakan bahwa penggunaan <i>sail</i> <i>rotor</i> pada kapal besar dapat mengurangi emisi CO ₂ secara signifikan, membantu kapal memenuhi persyaratan EEDI terbaru yang lebih ketat, dan meningkatkan efisiensi bahan bakar hingga 15%.	Ø3.6 m, tinggi 20 m, konfigu rasi ganda
8	Alkh aledi et al.	2023	LCA dan Analisis Energi	Menganalisis penggunaan <i>sail rotor</i> pada kapal berbahan bakar hidrogen (LH ₂) dan dampaknya terhadap emisi dan EEDI.	Penggunaan <i>sail</i> <i>rotor</i> pada kapal berbahan bakar hidrogen terbukti meningkatkan efisiensi bahan bakar dan membantu kapal memenuhi target emisi IMO 2050, dengan penurunan emisi	Ø2 m, tinggi 10 m

					CO ₂ yang signifikan selama uji coba.	
9	Guze Ibulut & Suzuki	2024	Optimasi Desain	Menganalisis desain optimal <i>sail rotor</i> berdasarkan kondisi angin dan rute pelayaran yang dapat meningkatkan efisiensi keseluruhan kapal.	Desain <i>sail rotor</i> yang telah dioptimasi berdasarkan kondisi rute pelayaran dan kecepatan angin menunjukkan peningkatan efisiensi propulsi hingga 15% dibandingkan dengan desain standar.	Silinder lonjong, tinggi 18 m, TSR variatif
10	Talluri et al.	2018	Evaluasi Lingkungan & Energi	Menganalisis efisiensi penggunaan <i>sail rotor</i> dalam mengurangi emisi pada kapal bulk dan tanker, serta	Penelitian ini menemukan bahwa penerapan <i>sail rotor</i> pada kapal bulk carrier dapat meningkatkan EEDI lebih dari 15%, yang	2 rotor Ø3.5 m, tinggi 18 m

				dampaknya terhadap EEDI.	sangat relevan dalam upaya untuk mengurangi emisi gas rumah kaca pada industri pelayaran.	
11	Gko ufas, D. (NT UA)	2022	Simulasi MATLAB & EEDI	Menghitung pengaruh kecepatan putar rotor terhadap EEDI <i>Very Large Crude Carrier (VLCC)</i> dan efisiensi operasional keseluruhan.	Hasil simulasi menunjukkan bahwa dengan pemasangan 4 <i>sail rotor</i> Ø1.2 m dan kecepatan putar yang tepat, nilai EEDI kapal dapat berkurang sebesar 2.65%, meningkatkan efisiensi bahan bakar dan mengurangi emisi.	4 rotor Ø1.2 m, tinggi 20 m, RPM 100–1000
12	Pearson, D.R.	2014	Model Perangkat Lunak	Menganalisis penggunaan <i>sail rotor</i> dalam sistem propulsi bantu pada kapal kargo Inggris, dengan fokus pada aspek	Perangkat lunak menunjukkan bahwa penggunaan <i>sail rotor</i> pada kapal kargo Inggris dapat meningkatkan efisiensi bahan	Perangkat lunak dengan berbagai konfigurasi rasi

				ekonomi dan operasional.	bakar dan mengurangi biaya operasional, sekaligus memenuhi standar emisi IMO yang lebih ketat.	
13	Cop uogl u & Pes man	2018	Analisis CFD	Menganalisis kinerja Flettner rotor pada kapal yang beroperasi di daerah dengan gelombang samping.	Simulasi CFD menunjukkan bahwa penerapan Flettner rotor dapat memberikan keuntungan propulsi di daerah dengan gelombang samping, meskipun ada batasan dalam penggunaan teknik ini tergantung pada kondisi cuaca dan angin.	CFD dengan variasi kondisi gelombang

14	Rehmatulla et al.	2017	Studi Kebijakan	Menilai peluang dan hambatan penerapan teknologi angin seperti <i>sail rotor</i> pada industri pelayaran rendah karbon.	Hasil studi menunjukkan bahwa meskipun ada hambatan teknologi dan biaya, <i>sail rotor</i> berpotensi menjadi solusi yang efisien dalam mengurangi emisi dan meningkatkan keberlanjutan operasional kapal dalam jangka panjang.	Analisis kebijakan dan studi kasus
15	Vahs	2019	Uji Coba Laut	Evaluasi kinerja Flettner rotor yang dipasang pada kapal "Fehn Pollux" untuk mengukur pengurangan bahan bakar dan emisi.	Uji coba laut menunjukkan bahwa Flettner rotor dapat memberikan pengurangan konsumsi bahan bakar hingga 7%, sekaligus meningkatkan stabilitas kapal selama pelayaran.	1 rotor Ø3 m, tinggi 18 m

16	Traut et al.	2014	Studi Propulsi	Meneliti pengaruh kombinasi kite sail dan Flettner rotor dalam meningkatkan efisiensi propulsi kapal.	Kombinasi kedua sistem, kite sail dan Flettner rotor, dapat meningkatkan efisiensi propulsi kapal secara signifikan, memberikan alternatif pengurangan konsumsi bahan bakar yang efektif.	Kombinasi Flettner rotor dan kite sail
17	Li et al.	2021	Studi Desain	Meneliti pengembangan jenis baru Flettner rotor untuk kapal niaga dengan tujuan efisiensi energi lebih tinggi.	Hasil penelitian menunjukkan bahwa desain baru Flettner rotor dapat memberikan peningkatan efisiensi yang signifikan dibandingkan dengan desain rotor tradisional, terutama pada kondisi angin rendah.	Desain rotor inovatif dengan efisiensi tinggi

18	Lee et al.	2024	Studi Kelayakan Awal	Menganalisis potensi penggunaan <i>sail rotor</i> levitasi magnetik pada kapal untuk operasi di wilayah pesisir.	<i>Sail rotor</i> dengan teknologi levitasi magnetik menunjukkan potensi besar untuk diterapkan pada kapal yang beroperasi di daerah pesisir, mengurangi gesekan dan meningkatkan efisiensi.	Rotor levitasi magnetik dengan desain kompak
19	Kim et al.	2024	Analisis Dinamis	Menggunakan model dinamis 4DOF untuk menganalisis karakteristik pergerakan <i>sail rotor</i> pada kapal.	Model dinamis 4DOF menunjukkan bahwa sistem <i>sail rotor</i> dapat dianalisis lebih akurat dengan simulasi elemen hingga untuk memprediksi perilaku dinamis <i>sail rotor</i> dalam kondisi pelayaran yang ekstrem.	Model 4DOF dengan simulasi i elemen hingga

20	Yoon Sung-jin, Park Kwon-ha	2024	Studi Desain	Menganalisis Karakteristik Aerodinamis Layar Rotor Berbentuk Kerucut untuk Kapal Efisiensi Operasi	Dalam penelitian ini, untuk membandingkan karakteristik aerodinamika <i>Sail rotor</i> (RS) berbentuk kerucut demi efisiensi operasional kapal, dilakukan analisis perbandingan terhadap 12 kondisi, yang terdiri dari 1 RS berbentuk silinder dan 2 RS berbentuk kerucut, dengan menerapkan variabel SR dan De/d. Studi oleh Yoon et al. (2021) hanya mengeksplorasi rotor silinder, sedangkan penelitian ini menganalisis rotor kerucut	2 Model rotor kerucut dan 1 model rotor silinder
----	-----------------------------	------	--------------	--	---	--

					(D/d = 5) yang belum banyak diteliti.	
--	--	--	--	--	---------------------------------------	--

2.2 Sumber Energi Terbarukan dalam Industri Maritim

Industri maritim sebagai sektor yang sangat bergantung pada bahan bakar fosil menghadapi tantangan besar dalam mengurangi dampak lingkungan, terutama emisi gas rumah kaca (GRK) yang berasal dari penggunaan bahan bakar konvensional. Menurut *International Maritime Organization* (IMO, 2014), sektor pelayaran menyumbang 2.89% emisi CO₂ global, dengan proyeksi peningkatan hingga 50-250% pada 2050. Oleh karena itu, transisi ke energi terbarukan menjadi solusi kritis untuk memenuhi regulasi lingkungan seperti IMO 2050 (net-zero emissions) dan EEDI Phase 3.

2.2.1 Energi Angin

Energi angin merupakan sumber terbarukan paling matang untuk aplikasi maritim, dengan teknologi utama:

1. Sail Rotor (Flettner Rotor)

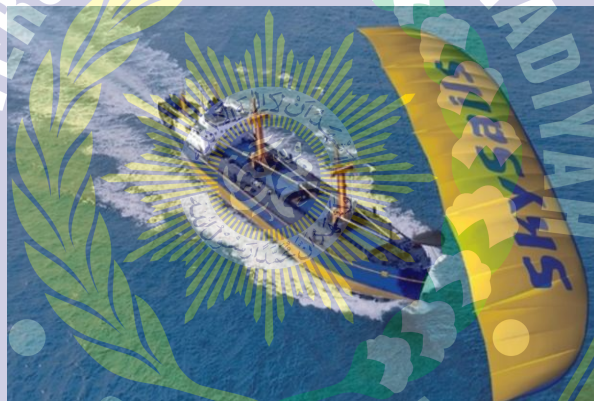
Menggunakan prinsip *Magnus Effect* untuk menghasilkan gaya dorong tambahan. Studi oleh (Norsepowa, 2020) pada kapal MV ENERCON membuktikan penghematan bahan bakar 8-10% pada rute Atlantik Utara. Keunggulan Dapat dipasang pada kapal eksisting tanpa modifikasi signifikan.



Gambar 2. 1 Mv Enercon
(Sumber : Norsepower, 2020)

2. Kite Sail

Airseas Seawing pada kapal kargo *Ville de Bordeaux* mengurangi emisi 20% (Airseas, 2022). Tantangan Memerlukan area dek yang luas dan angin stabil.



Gambar 2. 2 kapal kargo *Ville de Bordeaux*
(Sumber : Airseas, 2022)

3. Wing Sail

Dipakai pada kapal *Oceanbird* (Wallenius Marine) yang menargetkan pengurangan emisi 90% untuk kapal car carrier.



Gambar 2. 3 kapal *Oceanbird* (Wallenius Marine)
(Sumber : Dhumane et al., 2017)

Potensi teknis energi angin di rute pelayaran utama mampu menggantikan 10-60% kebutuhan bahan bakar, tergantung kondisi angin (Dhumane et al., 2017).

2.2.2 Energi Surya

Aplikasi Panel surya umumnya digunakan untuk *auxiliary power* (pencahaya, navigasi). Kapal MS *Tûranor Planet Solar* berhasil mengelilingi dunia hanya dengan tenaga surya, tetapi terbatas pada kapal kecil (<100 GT).



Gambar 2. 4 Kapal MS *Tûranor Planet Solar*
(Sumber : DNV GL, 2021)

Tantangan Efisiensi panel surya di laut hanya 15-20% akibat salinisasi dan shading (DNV GL, 2021). Kebutuhan baterai besar untuk penyimpanan energi.

2.2.3 Energi Gelombang dan Arus Laut

Teknologi Wave Energy Converters (WEC) Dipasang di lambung kapal untuk mengkonversi energi gelombang menjadi listrik. Tidal Turbines Contoh

proyek *SeaGen* (1.2 MW) di Irlandia Utara, tetapi belum diaplikasikan di kapal komersial.



Gambar 2. 5 *Wave Energy Converters (WEC)*
(Sumber : Falcão, 2020)

Potensi: Studi *EU Horizon 2020* menunjukkan energi gelombang bisa mencukupi 5-10% kebutuhan listrik kapal kontainer (Falcão, 2020).

2.2.4 Bahan Bakar Alternatif

Pengembangan bahan bakar alternatif menjadi solusi krusial bagi industri maritim untuk memenuhi target pengurangan emisi global. Berbagai jenis bahan bakar ramah lingkungan saat ini sedang dikembangkan dan diuji coba, masing-masing dengan keunggulan dan tantangan tersendiri dalam implementasinya.

Liquefied Natural Gas (LNG) telah menjadi bahan bakar transisi yang banyak diadopsi dalam dekade terakhir. LNG mampu mengurangi emisi CO₂ hingga 20-30% dibandingkan dengan bahan bakar minyak konvensional, sekaligus menghilangkan hampir seluruh emisi sulfur oksida (SO_x) dan partikulat. Namun, penggunaan LNG tidak sepenuhnya bebas masalah. Risiko methane slip, yaitu kebocoran gas metana yang tidak terbakar selama proses pembakaran, menjadi perhatian serius karena metana memiliki potensi pemanasan global 28-36 kali lebih tinggi daripada CO₂ dalam jangka 100 tahun. Beberapa operator kapal telah mengatasi masalah ini dengan mengadopsi teknologi mesin dual-fuel yang lebih canggih dan sistem pemantauan emisi real-time.

Hidrogen Hijau muncul sebagai bahan bakar masa depan yang sangat menjanjikan karena proses produksinya yang benar-benar bebas emisi ketika menggunakan energi terbarukan. Jepang telah memimpin dalam pengembangan teknologi ini melalui proyek perintis Suiso Frontier, kapal pertama di dunia yang dirancang khusus untuk mengangkut hidrogen cair dalam skala besar. Tantangan

utama dalam penggunaan hidrogen terletak pada penyimpanannya yang memerlukan suhu ultra-rendah (-253°C) dan infrastruktur pendukung yang masih sangat terbatas. Selain itu, kerapatan energi hidrogen yang rendah secara volumetrik membuatnya membutuhkan ruang penyimpanan yang lebih besar dibandingkan bahan bakar konvensional.

Ammonia (NH_3) mendapatkan perhatian sebagai zero-carbon fuel karena tidak mengandung atom karbon sama sekali dalam strukturnya. Menurut laporan terbaru dari MAN Energy Solutions (2023), ammonia dapat menjadi solusi jangka panjang yang berkelanjutan untuk industri pelayaran. Namun, implementasinya memerlukan modifikasi mesin yang signifikan karena sifat pembakarannya yang berbeda dengan bahan bakar fosil. Ammonia juga memiliki toksisitas yang tinggi dan membutuhkan sistem penanganan khusus untuk menjamin keselamatan awak kapal. Beberapa proyek percontohan saat ini sedang menguji campuran ammonia dengan bahan bakar lain untuk mengurangi dampak negatif sekaligus mempersiapkan transisi penuh di masa depan.

Perkembangan terbaru menunjukkan bahwa tidak ada satu pun bahan bakar alternatif yang dapat menjadi solusi tunggal untuk seluruh industri maritim. Kombinasi berbagai bahan bakar, disesuaikan dengan jenis kapal dan rute pelayaran, kemungkinan akan menjadi pendekatan yang paling realistis dalam transisi menuju dekarbonisasi. Beberapa armada sudah mulai mengadopsi pendekatan multi-fuel, sementara para peneliti terus bekerja untuk mengatasi berbagai tantangan teknis dan ekonomis yang masih menghambat implementasi skala penuh bahan bakar alternatif ini.

2.2.4 Sistem Hybrid

Contoh Sukses Kapal Viking Grace menggabungkan *LNG + Fuel Cells + Rotor Sail*. Penghematan energi mencapai 25% dibanding kapal konvensional (Viking Line, 2021).



Gambar 2. 6 Kapal Viking Line
(Sumber : Viking Line, 2021)

Tantangan Biaya investasi tinggi (\$2-5 juta per unit sail rotor). integrasi dengan sistem propulsi utama.

2.2.5 Regulasi Energi Terbarukan

Carbon Intensity Indicator (CII) Kapal dengan energi terbarukan mendapat rating A/B. (European Commission, 2024) Emisi maritim masuk dalam pasar karbon, mendorong adopsi teknologi hijau.

Tabel 2. 2 Peta Jalan IMO 2050:

Tahun	Target Emisi	Teknologi Kunci
2025	-30% CO ₂	<i>Sail Rotor, LNG</i>
2030	-40% CO ₂	<i>Ammonia, Hidrogen</i>
2050	Net-Zero	<i>Full Renewable</i>

2.3 Prinsip dan Inovasi Advance Sail Rotor

Advance Sail Rotor merupakan pengembangan teknologi propulsi bantu berbasis angin yang memanfaatkan prinsip gaya Magnus untuk meningkatkan efisiensi energi kapal. Teknologi ini pertama kali diperkenalkan oleh Anton Flettner pada tahun 1924 (*Flettner Rotor*), namun dalam dekade terakhir mengalami inovasi signifikan dalam desain, material, dan sistem kontrol, sehingga meningkatkan kelayakan aplikasinya pada kapal modern.

2.3.1 Perkembangan Teknologi Sail Rotor

Generasi Awal (Flettner Rotor, 1924) Menggunakan silinder baja berputar dengan diameter besar. Efisiensi terbatas karena berat material dan torsi awal tinggi. Contoh Kapal *Buckau* (Jerman, 1926) yang melintasi Atlantik.



Gambar 2. 7 Kapal Buckau
(Sumber : Buckau Jerman, 1926)

Tabel 2. 3 Inovasi Desain

Parameter	Generasi Awal	<i>Advance Sail Rotor</i>
Bentuk	Silinder lurus	Kerucut ($D/d = 2-5$)
Material	Baja	Serat karbon-nanocomposite
Kecepatan Rotasi	Manual	Otomatis ($TSR = 2-4$)
Efisiensi	5–8%	10–15% (Norsepower, 2023)

Generasi Modern (2010–Sekarang): Material: Komposit serat karbon (ringan, tahan korosi). Desain: Silinder kerucut (*conical*) untuk mengurangi turbulensi. Sistem Kontrol: Otomatisasi kecepatan rotasi berdasarkan sensor angin. Contoh Implementasi *Norsepower Rotor Sail* (2018) Dipasang pada MV Estraden, mengurangi konsumsi bahan bakar 8–10%. (Yoon et al., 2022) Rotor modular untuk kapal kargo besar.



Gambar 2. 8 MV Estraden
(Sumber : Yoon et al., 2022)

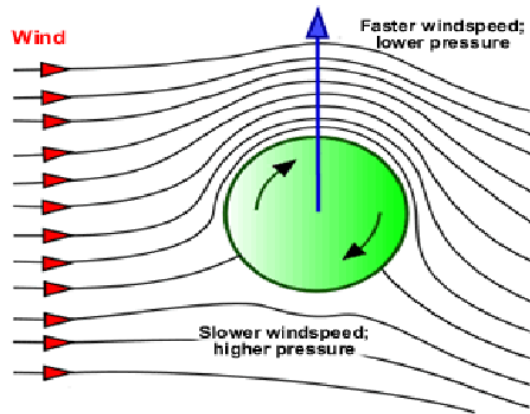
Penghematan Bahan Bakar: Pengurangan 7–15% pada kecepatan angin >10 m/s (Guzelbulut, M., & Suzuki, 2024). Kesesuaian dengan Regulasi Membantu memenuhi EEDI Phase 3 dan CII Rating A/B. Fleksibilitas Pemasangan Dapat dipasang pada dek kapal eksisting tanpa modifikasi struktural besar.

2.4 Magnus Effect

Advance Sail Rotor bekerja berdasarkan prinsip *Magnus Effect*, di mana silinder berputar dalam aliran udara menghasilkan gaya dorong akibat distribusi tekanan asimetris. Mekanisme ini menjadi dasar teknologi propulsi angin modern dengan efisiensi lebih tinggi dibandingkan layar konvensional.

2.4.1 Mekanisme Gaya Magnus

Fenomena Fisik Ketika rotor berputar, lapisan udara di sekitarnya terpolarisasi Sisi yang berputar searah angin mempercepat aliran udara → tekanan rendah. Sisi yang berputar berlawanan angin menghambat aliran → tekanan tinggi. Perbedaan tekanan ini menghasilkan gaya lift (dorong) tegak lurus arah angin.



Gambar 2. 9 Gaya Magnus
(Sumber : Park & Kim, 2024)

2.4.2 Perbandingan dengan Propulsi Konvensional

Tabel 2. 4 Tabel perbandingan karakteristik

Karakteristik	Sail Rotor	Baling-Baling Pesawat
Sumber Daya	Angin + Rotasi	Mesin
Gaya Dorong	Tergantung CLCL dan TSR	Tergantung sudut serang
Efisiensi	Tinggi di kecepatan angin >7 m/s	Konsisten di berbagai kecepatan

2.4.3 Faktor Penentu Kinerja

1. Geometri Rotor Rasio D/d : Rotor kerucut ($D/d > 1$) mengurangi turbulensi di dasar (Yun et al., 2024). Tinggi Rotor: Semakin tinggi, semakin besar leverage gaya dorong.
2. Kondisi Lingkungan Kecepatan angin >10 m/s meningkatkan FL secara eksponensial. Arah angin relatif terhadap sumbu kapal (*angle of attack*).

2.5 CFD Desain *Sail Rotor*

Computational Fluid Dynamics (CFD) merupakan alat kritis dalam mendesain dan mengoptimalkan sail rotor secara efisien. Simulasi CFD memungkinkan analisis mendetail terhadap karakteristik aerodinamik rotor tanpa memerlukan prototipe fisik yang mahal.

2.7.1 Peran CFD dalam Pengembangan *Sail Rotor*

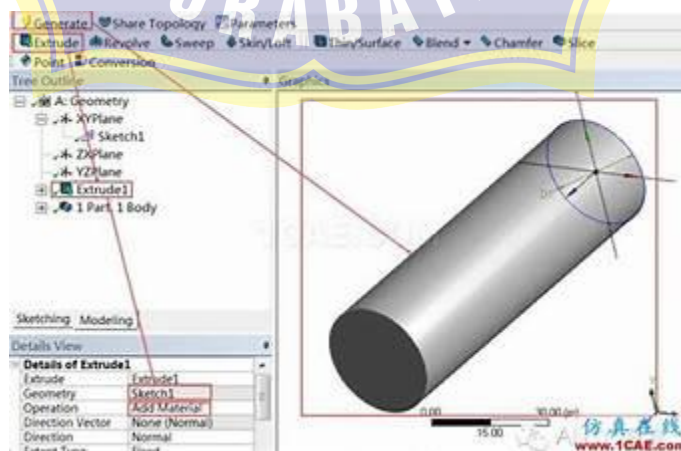
CFD digunakan untuk:

1. Memvalidasi Desain Memprediksi distribusi tekanan dan gaya dorong pada berbagai kecepatan angin dan rotasi. Contoh: Simulasi ANSYS Fluent oleh Norsepower mengonfirmasi peningkatan 10% efisiensi pada rotor kerucut dibandingkan dengan silinder.
2. Mengoptimasi Parameter Kunci Geometri: Pengaruh rasio D/d (1, 2, 5) terhadap koefisien lift (CL). Kecepatan Rotasi (TSR): Identifikasi TSR optimal (2–4) untuk berbagai kondisi angin.
3. Mengurangi Biaya Pengembangan Menggantikan uji terowongan angin yang memakan waktu dan biaya

2.5.2 Proses Simulasi CFD

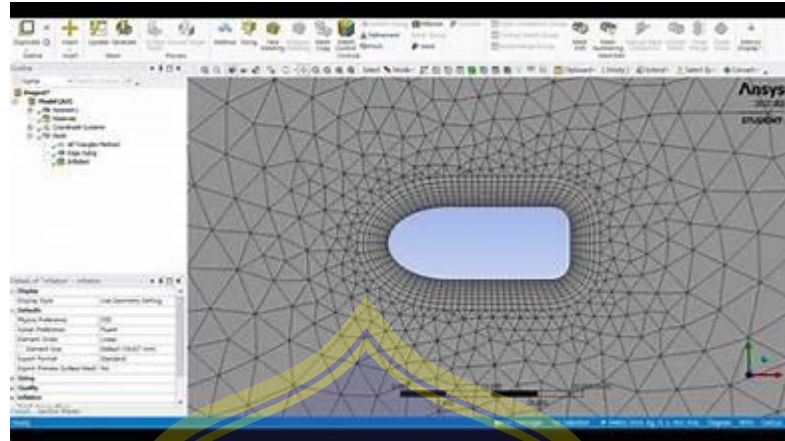
Langkah-langkah utama dalam simulasi CFD untuk sail rotor:

1. Pemodelan Geometri Software: ANSYS Design Modeler / SpaceClaim. Detail Model 3D rotor dengan variasi D/d dan permukaan halus untuk mengurangi turbulensi.



Gambar 2. 10 Design Modeler / SpaceClaim
(Sumber : Dokumentasi Pribadi Penulis, 2026)

2. Pembuatan Tipe Mesh Hybrid mesh (*structured* di dekat rotor, *unstructured* di area jauh).



Gambar 2. 11 Tipe Mesh
(Sumber : Dokumentasi Pribadi Penulis, 2026)

3. Setup Fisika Model Turbulensi: SST $k-\omega$ (akurat untuk aliran separasi). Kondisi Batas Kecepatan angin inlet 5–15 m/s.

2.5.3 Validasi Hasil CFD

Perbandingan dengan Data Eksperimen Studi (Norsepower, 2023) menunjukkan error $<5\%$ antara simulasi CFD dan uji lapangan. Studi Mesh Independence Memastikan hasil tidak tergantung pada kepadatan mesh.

2.5.4 Aplikasi CFD dalam Penelitian Terdahulu

Tabel 2. 5 Kesimpulan CFD Penelitian Terdahulu

Peneliti	Fokus Studi	Temuan CFD
(Yoon et al., 2022)	Rotor kerucut (D/d=2)	CL meningkat 15% dibandingkan dengan silinder
(Norsepower, 2023)	Rotor silinder Ø4m	Prediksi penghematan bahan bakar 8–10%
(Yun et al., 2024)	Efek permukaan turbulator	Reduksi drag 12%

2.6 Peningkatan Desain dan Efisiensi

Advance Sail Rotor mengalami evolusi signifikan dalam desain dan kinerja dibandingkan sistem rotor tradisional. Inovasi utama mencakup material, geometri, dan sistem kontrol, yang secara kolektif meningkatkan efisiensi energi hingga 15-20% pada kapal komersial (Norsepower, 2023).

2.6.1 Inovasi

Tabel 2. 6 Inovasi Material

Parameter	Rotor Tradisional (Flettner, 1924)	Advance Sail Rotor (2020s)
Material	Baja (berat: ~800 kg/m ²)	Komposit serat karbon-nanotube (berat: ~200 kg/m ²)
Keunggulan	Tahan korosi laut	50% lebih ringan, kekuatan tarik 1.5× lebih tinggi, tahan UV (DNV GL, 2022)
Contoh Aplikasi	Kapal <i>Buckau</i> (1926)	Norsepower Rotor Sail (MV <i>Estraden</i>)

2.6.3 Optimisasi Geometri Aerodinamis

Bentuk Kerucut (Conical Design) Rasio $D/d = 2-5$ mengurangi separasi aliran di dasar rotor (Yoon et al., 2022). Contoh Rotor kerucut Norsepower menunjukkan peningkatan 12% gaya dorong dibanding silinder pada $TSR=3$. Permukaan Turbulator Alur mikro pada permukaan rotor meningkatkan energi aliran udara, mempertahankan lapisan batas laminar (Yun et al., 2024).

2.6.5 Dampak pada Efisiensi Energi

Penghematan Bahan Bakar Data lapangan (Norsepower, 2023) 8–10% untuk tanker. 15% untuk kapal rute Atlantik Utara (angin rata-rata 12 m/s). Reduksi Emisi Setiap 1% penghematan bahan bakar mengurangi 3.1 ton CO₂/hari untuk 300.000 DWT (IMO, 2022).

2.7 Desain Rotor

Pada sub-bab ini, akan dijelaskan secara mendalam mengenai mekanisme kerja sail rotor, aplikasi praktis, dan strategi optimasi implementasinya pada kapal, *khususnya* Tanker.

2.7.1 Mekanisme Dasar

Sail rotor bekerja berdasarkan prinsip *Magnus Effect*, di mana silinder berputar dalam aliran udara menghasilkan gaya dorong akibat perbedaan tekanan. Prosesnya dapat dijelaskan dalam 3 tahap:

Distribusi Aliran Udara Saat rotor berputar, udara di sekitarnya mengikuti permukaan rotor akibat *viscous effect*. Sisi yang berputar searah angin (*windward*) mempercepat aliran menjadi tekanan rendah (efek Bernoulli). Sisi yang berputar berlawanan angin (*leeward*) menghambat aliran menjadi tekanan tinggi.

2.7.2 Kecepatan Angin

Berdasarkan Statistik Operasional Kapal Global Pemilihan kecepatan angin 5, 10, dan 15 m/s didasarkan pada analisis distribusi kecepatan angin global pada rute pelayaran utama. Menurut IMO Fourth GHG Study (2020), distribusi kecepatan angin untuk kapal menunjukkan bahwa:

1. 5 m/s (9.7 knot) merepresentasikan kondisi angin ringan yang masih ekonomis untuk sail rotor (IMO, 2020, h. 45).
2. 10 m/s (19.4 knot) merupakan median operasional dengan frekuensi kejadian 35-40% di rute Trans-Pasifik dan Atlantik Utara (DNV GL, 2021).
3. 15 m/s (29.1 knot) batas atas operasi ekonomis (Smith et al., 2019).

Kajian Kelayakan Ekonomis Berdasarkan studi World Bank (2022) tentang kelayakan wind-assisted propulsion, kecepatan angin efektif minimum untuk mencapai payback period 5 tahun adalah 5 m/s, sementara 15 m/s merupakan batas maksimum.

Studi Komparatif dengan Penelitian Terdahulu Traut et al. (2014) dalam penelitian di University of Manchester merekomendasikan rentang 5-15 m/s untuk analisis sail rotor karena:

1. Under 5 m/s: Kontribusi energi kecil untuk kondisi rendah
2. 5-10 m/s: Range operasional paling sering (60-70% waktu)
3. 10-15 m/s: Kondisi optimal untuk maksimal output

2.7.3 Aplikasi pada Kapal

Konfigurasi Pemasangan *Single / Multiple Rotors* Umumnya 2–6 rotor dipasang di dek kapal dengan jarak $\geq 2 \times$ diameter rotor untuk hindari interferensi aliran. Posisi Optimal Di depan anjungan untuk minimisasi turbulensi dari struktur kapal. Studi Kasus (Norsepower, 2023):

Tabel 2. 7 Parameter
Sumber : Norsepower 2023

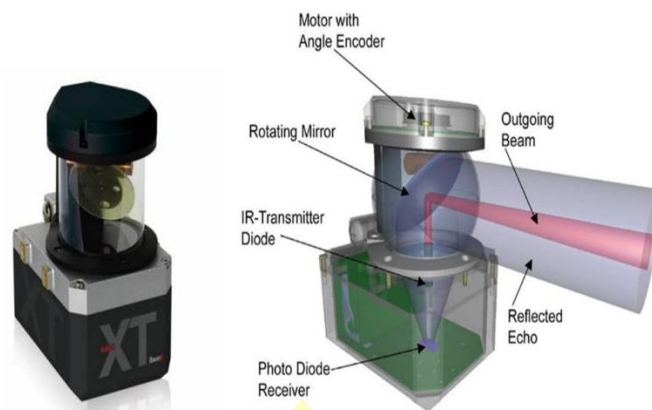
Parameter	Nilai
Kapal	MV <i>Estraden</i>
Jumlah Rotor	6 unit
Dimensi Rotor	$\text{Ø}4 \text{ m} \times 24 \text{ m}$
Penghematan Bahan Bakar	8–10%
Reduksi Emisi CO ₂	900 ton/tahun

Adaptasi untuk Kapal Skala besar memerlukan rotor tinggi ($>25 \text{ m}$) untuk hasilkan gaya dorong signifikan. Solusi Desain: Rotor kerucut ($D/d = 5$) kurangi beban struktural di dasar. Material komposit serat karbon untuk ringan dan kuat.

2.7.4 Optimasi Kinerja

Kontrol Kecepatan Rotasi Sistem otomatis sesuaikan TSR berdasarkan data angin real-time (sensor LIDAR). Contoh: Pada angin 12 m/s , rotor berputar di $\text{TSR}=3$ untuk maksimalkan CL Interaksi dengan Propulsi Utama *Mode Hybrid* Saat angin cukup, mesin utama reduksi daya 10–15%. Hasil Simulasi Terkini (Yun et al., 2024) Rotor kerucut ($D/d=2$) hasilkan 15% Prediksi untuk $D/d=5$ Potensi peningkatan hingga 20%.

Dynamic RPM Adjustment Sensor LIDAR mendeteksi kecepatan/arah angin real-time, mengatur TSR secara otomatis (optimal: 2–4). Studi *Anemoi Marine* (2023) Sistem ini meningkatkan efisiensi 20% pada angin berfluktuasi.



Gambar 12 Sensor LIDAR

(Sumber : Guzelbulut & Suzuki, 2024)

Integrasi dengan AI Algoritma machine learning memprediksi rute pelayaran untuk memaksimalkan pemanfaatan angin (Guzelbulut & Suzuki, 2024).

Tabel 2. 8 Perbandingan Sistem Kontrol

Generasi	Mekanisme	Efisiensi
Manual (1920s)	RPM konstan	5–8%
Otomatis (2020s)	AI + LIDAR	15–20%

2.7.5 Parameter Dimensi Sail Rotor

Dalam analisis kinerja sail rotor, terdapat beberapa parameter dimensi utama yang digunakan untuk menggambarkan karakteristik fisik rotor dan pengaruhnya terhadap gaya dorong yang dihasilkan. Berikut adalah penjelasan masing-masing parameter beserta satuan dan rumus yang digunakan:

Tabel 2. 9 Parameter Dimensi

Parameter	Penjelasan	Satuan	Rumus
H	Tinggi rotor dari dasar hingga puncak	meter (m)	-

D	Diameter bagian bawah rotor (diameter besar)	meter (m)	-
d	Diameter bagian atas rotor (diameter kecil, jika berbentuk kerucut)	meter (m)	-
T	Tebal atau ketebalan dinding rotor (jika diperhitungkan)	meter (m)	-
A	Luas frontal area rotor (proyeksi rotor terhadap aliran)	meter persegi (m ²)	$A = H \times D$
D/d	Rasio diameter bawah terhadap diameter atas	tanpa satuan	$\frac{D}{d}$
De	Diameter rata-rata dari sebuah rotor berbentuk kerucut	tanpa satuan	$De = \frac{D + d}{2}$
De/d	Rasio diameter efektif (De) terhadap diameter atas	tanpa satuan	$\frac{De}{d}$, di mana De = diameter rata-rata dari rotor kerucut
SR	Spin Ratio, kecepatan putaran Rotor	tanpa satuan	$SR = \frac{\omega \cdot R}{V}$, dimana ω = kecepatan sudut rotor (rad/s)
Re	Bilangan Reynolds, menggambarkan karakter aliran fluida	tanpa satuan	$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu}$

Rasio D/d dan De/d penting dalam mendeskripsikan bentuk geometri rotor berbentuk kerucut. Nilai D/d yang lebih besar menunjukkan bentuk kerucut yang lebih ramping, yang berpengaruh terhadap pembentukan aliran dan distribusi tekanan. Diameter efektif (De) biasanya dihitung dengan rumus:

2.8 Energy Efficiency Design Index (EEDI) dalam Konteks Sail Rotor

Energy Efficiency Design Index (EEDI) adalah metrik kuantitatif yang ditetapkan oleh *International Maritime Organization* (IMO) untuk mengukur efisiensi energi kapal berdasarkan emisi CO₂ per ton-mile. Bagian ini menjelaskan hubungan antara sail rotor dan peningkatan EEDI, serta relevansinya dengan penelitian.

2.8.1 Formula EEDI

EEDI dihitung dengan rumus berikut (IMO, 2023):

Rumus Perhitungan Daya:

$$P = F_L \times V_{\text{ship}} \quad (1)$$

Keterangan:

1. P = Daya efektif yang dikontribusikan (kW)
2. F_L = Gaya lift dari sail rotor (N)
3. V_{ship} = Kecepatan kapal (m/s)

Perhitungan kontribusi relatif sail rotor terhadap sistem propulsi menghasilkan:

$$\text{kontribusi relatif} = \frac{P_{\text{Rotor}}}{P_{\text{baseline}}} \times 100\% \quad (2)$$

Keterangan:

1. P_{rotor} = Hasil Pengurangan Daya yang dihasilkan (kw)
2. P_{baseline} = daya power (kw)

$$\text{Penghematan Bahan Bakar} = \frac{P_{\text{rotor}}}{\text{FOC}} \times t \quad (3)$$

Keterangan:

1. P_{rotor} = Daya efektif dari sail rotor (kW)
2. SFC = *Specific Fuel Consumption* mesin utama (g/kWh)
3. t = Waktu operasional (jam)

$$\text{Pengurangan CO}_2 = \text{Penghematan Bahan Bakar} \times \text{CF} \quad (4)$$

Perhitungan:

1. Faktor emisi karbon (CF)
2. Waktu operasional

$$\text{EEDI} = \frac{\text{Emisi}}{\text{Dwt} \times V_{\text{ref}}} \quad (5)$$

Keterangan:

- Emisi : Specific Fuel Consumption (kg/kWh)
- DWT : Deadweight Tonnage (ton)
- Vref : Kecepatan referensi kapal (knot)

Peran Sail Rotor Mengurangi (daya mesin utama) dengan menyediakan dorongan tambahan berbasis angin. Menurunkan CO₂ *emission* melalui penghematan bahan bakar.

2.8.2 Dampak Sail Rotor Terhadap EEDI

Studi Empiris (Norsepower, 2023) Pemasangan 2 rotor sail pada kapal mengurangi EEDI sebesar 5–8%. Guzelbulut & Suzuki (2024) Rotor kerucut (D/d=2) menurunkan EEDI hingga 10% pada kecepatan angin >12 m/s. Proyeksi untuk Penelitian Simulasi ANSYS akan menghitung pengurangan *Pi* akibat dorongan rotor. Prediksi Penurunan EEDI 8–12% untuk konfigurasi optimal (TSR=3, angin 15 m/s).

Tabel 2. 10 Regulasi IMO dan Target EEDI

Fase	Target Reduksi CO ₂	Tahun	Peran Sail Rotor
Phase 1	10% dibandingkan dengan baseline	2015–2019	Rotor konvensional (D/d=1)
Phase 2	20%	2020–2024	Rotor material komposit
Phase 3	30%	2025–2030	Rotor kerucut (D/d≥2)

Fase	Target Reduksi CO ₂	Tahun	Peran Sail Rotor
Phase 4	-50% (net-zero 2050)	2030+	Hybrid rotor + bahan bakar alternatif

Kaitan dengan Penelitian Desain D/d=5 dapat membantu kapal memenuhi Phase 3 dan mempersiapkan Phase 4.

2.8.3 Perhitungan EEDI dengan Sail Rotor

Langkah Simulasi:

1. Hitung daya dorong rotor (Protor) dari hasil CFD.
2. Kurangi Protor dari daya mesin utama (Pmain):

$$P_{\text{total}} = P_{\text{main}} - \eta \cdot P_{\text{rotor}} \quad (6)$$

- Kapal DWT = 50.000 ton, Vref=15 knot.
- Tanpa rotor Pmain = 50.000 kW → EEDI = 15 gCO₂/ton-mile.
- Dengan rotor (10% penghematan): Ptotal=45.000 kW → EEDI = 13.5 gCO₂/ton-mile (reduksi 10%).