

BAB II KAJIAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Penelitian pertama yang dijadikan dasar acuan utama dalam penelitian ini telah dilakukan oleh James Cairns, Morco Vezza, dkk., dalam bentuk jurnal dengan judul *Numerical optimisation of a ship wind-assisted propulsion system using blowing and suction over a range of wind conditions* (2021) pada penelitian tersebut membahas mengenai pengoptimalan sistem propulsi bantu tenaga angin dengan menggunakan *Computation Fluid Dynamics* (CFD) sebagai *software* yang digunakan. Pada penelitian ini mampu membuat *Airfoil* dengan mendapatkan Koefisien angkat sebesar 13,17 pada *Airfoil* dengan kecepatan angin 8-12 m/s.

Penelitian kedua yang menjadi dasar acuan penelitian ini yaitu penelitian yang dilakukan oleh Xing Liu, Kai Wang, dkk., dalam bentuk jurnal dengan judul *An integrated energy efficiency optimization method of the wind-assisted hybrid ship for the shipping decarbonization* (2025) penelitian ini sistem integrasi antara sistem propulsi konvensional dengan sistem propulsi ramah lingkungan yang berupa sistem propulsi tenaga angin. Penelitian ini bertujuan untuk mengefisienkan operasional kapal, mengurangi konsumsi bahan bakar, dan mengurangi polusi udara yang di akibatkan oleh operasional kapal.

Penelitian ketiga yang menjadi dasar acuan penelitian ini yaitu penelitian yang dilakukan oleh Zhaoyang Sun, Jiancheng Yu, dkk., dalam bentuk jurnal dengan judul *Autonomous sailboat velocity prediction program considering the sea-surface wind velocity gradient* (2025) penelitian ini membahas tentang penggabungan antara perahu otonom dengan sistem propulsi *rigid sails*. Penelitian ini mensimulasikan kapal otonom dengan sistem propulsi *rigid sails*. Pada penelitian ini dilakukan uji coba secara langsung dan menggunakan *rigid sails* sebagai propulsinya. Setelah dilakukan *sea trial* penelitian ini menyimpulkan bahwa kecepatan angin berpengaruh terhadap kecepatan kapal saat berlayar dan sudut *rigid sails* sangat berpengaruh untuk mencapai kecepatan maksimal perahu.

Penelitian keempat yang menjadi dasar acuan penelitian ini yaitu penelitian yang dilakukan oleh Cem Guzelbulut, Timoteo Badalotti, dan Katsuyuku Suzuki, dalam bentuk jurnal dengan judul *Optimization techniques for the design of crescent-shaped hard sails for wind-assisted ship propulsion* (2024) penelitian tersebut membahas tentang mendesain bentuk *rigid sails* dengan efisiensi tertinggi. Pada penelitian tersebut menghasilkan desain *rigid sails* yang paling optimal untuk dipasang pada kapal. Pengujian optimalisasi *rigid sails* pada penelitian tersebut dengan menggunakan *Computation Fluid Dynamics* (CFD).

Penelitian kelima yang menjadi dasar acuan penelitian ini yaitu penelitian yang dilakukan oleh Jawadul Islam Chowdhury, Ajmain Faieq, dan Osman Md Amin, dalam bentuk jurnal dengan judul *Seakeeping analysis of a tanker with hard sail-based wind propulsion system in various seaways* (2023) penelitian ini membahas tentang Analisa hidrodinamika kapal setelah dipasang *rigid sails*. Pada penelitian ini juga membahas hambatan yang terjadi Ketika kapal sudah dipasangkan *rigid sails*. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa pemasangan *rigid sails* tidak terlalu berpengaruh terhadap hidrodinamika dan hambatan yang dialami kapal.

2.1 Hambatan Kapal

Dalam pengoperasian kapal, kapal dituntut untuk mampu mempertahankan kecepatan dinas (*service speed*, V_s) yang telah direncanakan. Hal ini membuat kapal harus dilengkapi dengan sistem propulsi yang mampu mengatasi gaya hambat. Hambatan kapal terjadi karena adanya gesekan yang terjadi antara lambung kapal dengan air maupun

udara. Secara fisik, hambatan yang bekerja pada kapal tersusun atas dua komponen utama, yaitu tegangan normal dan tegangan geser. Tegangan normal berhubungan dengan hambatan yang timbul akibat pembentukan gelombang serta pengaruh viskositas fluida, sedangkan tegangan geser muncul akibat sifat kekentalan air yang berinteraksi dengan permukaan lambung kapal. Secara umum, hambatan tersebut dapat dikelompokkan ke dalam dua jenis utama, yaitu hambatan *viskos* yang disebabkan oleh gesekan fluida dan hambatan gelombang. Efisiensi operasional suatu kapal sangat dipengaruhi oleh besarnya hambatan total yang dialami kapal selama berlayar. Besar hambatan total akan mempengaruhi daya mesin yang dibutuhkan sehingga berpengaruh terhadap konsumsi bahan bakar (Rasyid Firmansyah, Andi Trimulyono 2024).

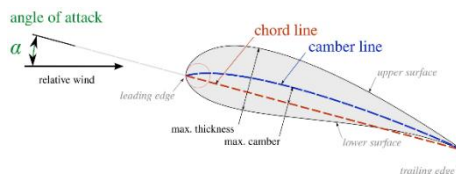
Rigid sails berfungsi sebagai sayap aerodinamis ketika berinteraksi dengan aliran angin dan bekerja berdasarkan prinsip gaya angkat aerodinamis. Saat angin datang dari berbagai arah menuju layar, terjadi perbedaan tekanan di kedua sisi layar yang menimbulkan dua komponen gaya, yaitu gaya angkat dan gaya hambat. Gaya hambat dari *Rigid sails* tersebut dapat mempengaruhi hambatan total kapal. Resultan dari gaya angkat dan gaya hambat membentuk gaya aerodinamis total yang memiliki komponen searah dengan arah gerak kapal sehingga menghasilkan gaya dorong ke depan. Besarnya kontribusi gaya angkat atau gaya hambat sebagai sistem propulsi bergantung pada orientasi layar terhadap arah angin dan sudut serang dari *rigid sails* (Chowdhury, Faieq & Amin 2023).

Metode alternatif untuk memprediksi kinerja kapal dapat dilakukan dengan memodelkan aliran fluida di sekitar lambung kapal menggunakan pendekatan *Computational Fluid Dynamics* (CFD). *Computational Fluid Dynamics* (CFD) digunakan sebagai alat analisis untuk mempelajari kinerja hidrodinamik kapal dengan berbagai kondisi. Hal ini memungkinkan penghematan biaya dalam analisis hidrodinamika. Selain itu analisis tersebut bisa lebih akurat dengan kondisi yang sebenarnya.

2.2 Airfoil dan Prinsip Aerodinamika

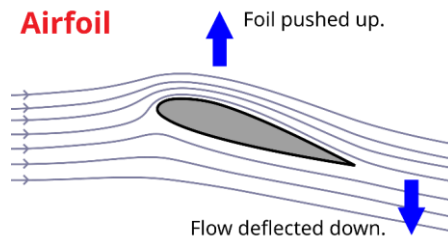
Airfoil merupakan bentuk penampang yang dirancang agar menghasilkan gaya angkat. Ketika udara mengalir di sekitar *Airfoil*, *Airfoil* merupakan bentuk penerapan dari aerodinamika, yang merupakan cabang fisika yang mempelajari pergerakan udara dan gas dan berbagai gaya yang bekerja pada benda bergerak di dalam cairan tersebut (Bintoro 2025).

Airfoil berasal dari dua prinsip dasar dari dinamika fluida yaitu Hukum Bernoulli dan Hukum III Newton. Hukum Bernoulli menyatakan peningkatan kecepatan suatu fluida terjadi bersamaan dengan penurunan tekanan. Hal ini menjadi dasar di mana kecepatan fluida di kedua sisi *Airfoil* memiliki perbedaan sehingga tekanan di kedua sisi juga mengalami perbedaan. Sedangkan Hukum III Newton menyatakan bahwa setiap aksi akan menimbulkan reaksi yang sama besar dan berlawanan arah. Hal ini membuat aliran udara yang diarahkan ke bawah membuat gaya reaksi ke atas yang menjadi gaya angkat.



Gambar 2. 1 *Airfoil*

Sumber: <https://simple.wikipedia.org/wiki/Airfoil>



Gambar 2. 2 Gaya Angkat *Airfoil*

Sumber: https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:AirfoilDeflectionLift_W3C.svg

Bentuk *Airfoil* ketika mengenai udara akan membelah aliran udara tersebut. Udara akan mengalir di atas dan di bawah *Airfoil*. Lengkungan pada *Airfoil* membuat jalur aliran yang berbeda membuat permukaan atas memiliki jalur yang lebih Panjang sedangkan permukaan bawah memiliki aliran yang lebih pendek. Ini membuat tekanan di atas permukaan lebih rendah dan tekanan di bawah permukaan menjadi tinggi. Bagian yang memiliki tekanan lebih tinggi akan mendorong ke arah tekanan yang lebih rendah sehingga menciptakan gaya angkat terhadap benda. Gaya angkat dari *Airfoil* dapat dikontrol dengan menyesuaikan sudut serang (Bintoro 2025).

2.3 Wind Assisted Propulsion System (WAPS)

Wind Assisted Propulsion System merupakan teknologi yang memanfaatkan tenaga angin yang menghasilkan gaya aerodinamis untuk memberikan tambahan dorongan pada kapal. Ketika kapal yang dilengkapi dengan *Wind Assisted Propulsion System* (WAPS) berlayar pada suatu kecepatan tertentu, gerak kapal pada arah longitudinal (maju–mundur) dapat dijelaskan menggunakan Hukum II Newton. Hukum ini menyatakan bahwa resultan gaya yang bekerja pada suatu benda sama dengan massa benda dikalikan percepatannya (Z. Wang et al. 2025).

Pada kondisi operasi normal, kapal umumnya berlayar pada kecepatan konstan, sehingga percepatan longitudinal dapat dianggap nol. Dengan demikian, resultan gaya pada arah longitudinal juga bernilai nol. Artinya, gaya-gaya yang mendorong kapal harus seimbang dengan gaya hambatan total yang dialami kapal.

Dalam hal ini, gaya dorong kapal berasal dari dua sumber utama, yaitu daya dorong yang dihasilkan oleh layar sayap (WAPS) dan daya dorong dari baling-baling. Kedua gaya dorong tersebut secara bersama-sama harus mampu mengimbangi hambatan total kapal, yang meliputi hambatan viskos dan hambatan gelombang. Apabila kontribusi daya dorong dari layar sayap meningkat, maka kebutuhan daya dorong dari baling-baling akan berkurang, sehingga konsumsi bahan bakar mesin utama dapat ditekan. Terdapat beberapa jenis teknologi *Wind Assisted Propulsion System* (WAPS) yang telah diimplementasikan pada kapal niaga, antara lain *Rigid sails*, *Rotor Flettner*, dan *Kite Sails*.

2.3.1 Rigid sails

Rigid sails merupakan salah satu jenis *Wind Assisted Propulsion System* (WAPS) yang menggunakan penampang berbentuk *Airfoil* yang dipasang secara vertikal (Cairns et al. 2021). Penerapan layar sayap pada kapal terinspirasi dari teori aerodinamika sayap pesawat, di mana gaya angkat dihasilkan akibat perbedaan tekanan aliran udara yang melewati permukaan *rigid sails* (K. Wang et al. 2025). Dengan penggunaan bentuk *Airfoil* sebagai penampang, sistem ini mampu menghasilkan gaya angkat yang relatif besar, Gaya angkat yang dihasilkan oleh

rigid sails selanjutnya dikonversi menjadi gaya dorong kapal melalui pengaturan sudut serang (*angle of attack*) terhadap arah angin sehingga dapat meningkatkan efisiensi propulsi kapal (Zhang et al. 2023).

Keuntungan dari penggunaan *rigid sails* antara lain memiliki struktur yang sederhana dan merupakan jenis layar yang paling umum digunakan. Selain itu, sistem ini cocok dioperasikan pada lingkungan yang keras, memiliki biaya perawatan serta operasional yang relatif rendah, dan tetap menunjukkan performa yang baik saat kapal berlayar melawan arah angin (K. Wang et al. 2025).

UT Wind Challenger merupakan salah satu kapal penelitian untuk teknologi *rigid sails*. Kapal UT Wind Challenger merupakan jenis kapal kargo yang menggunakan *rigid sail* untuk sistem propulsi utama, yaitu dengan menggunakan sembilan *rigid sails* dengan luas layar 9000 m². Para peneliti menemukan bahwa *rigid sails* tersebut dapat menggerakkan kapal dengan mencapai kecepatan 14 knot pada kecepatan angin 12m/s dengan rute antara Yokohama ke Seattle. Hal tersebut memungkinkan untuk membuat penghematan bahan bakar minyak antara 20% sampai 30% (Cairns et al. 2021).



Gambar 2. 3 *Rigid sail*
Sumber: Cairns et al. (2021)

Kinerja *rigid sails* dalam menghemat bahan bakar dapat dianalisis dengan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Kinerja *rigid sails* dianalisis dengan menganalisis karakteristik aerodinamika dari bentuk *rigid sails*. Melalui analisis aerodinamika *rigid sails* dengan menggunakan pendekatan simulasi numerik, kecepatan angin sangat mempengaruhi koefisien gaya angkat dari *rigid sails*. Dalam study sebelumnya, optimasi dari aerodinamika *rigid sails* dengan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD) menunjukan peningkatan koefisien dorong sebesar 6,5%. Selain itu dalam study lain juga menyebutkan dengan optimasi aerodinamika *rigid sails* kapal dapat menghemat bahan bakar sebesar 17%-65% (K. Wang et al. 2025).

2.3.2 *Rotor Flettner*

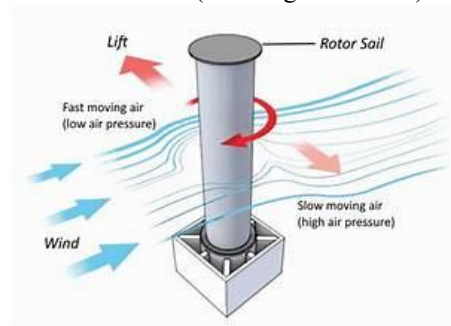
Rotor Flettner merupakan silinder berputar yang memanfaatkan Efek Magnus untuk menghasilkan gaya dorong dengan memanfaatkan aliran angin. Efek Magnus berkaitan erat dengan prinsip Bernoulli, di mana putaran silinder menyebabkan kecepatan aliran angin menjadi lebih tinggi pada sisi yang searah dengan arah putaran, sementara pada sisi yang berlawanan kecepatan angin menjadi lebih rendah. Kondisi tersebut menimbulkan perbedaan tekanan pada kedua sisi, yang selanjutnya menghasilkan gaya angkat. Interaksi antara rotor dan aliran angin dapat

dipahami secara lebih mendalam melalui analisis karakteristik aerodinamika *rotor flettner* (Cairns et al. 2021).

Fisikawan asal Jerman, Anton Flettner, merupakan tokoh pertama yang secara nyata menerapkan konsep tersebut pada sistem penggerak kapal. Keberhasilannya melakukan penyeberangan Samudra Atlantik pada tahun 1926 dengan kapal yang digerakkan hanya oleh dua silinder berputar menjadi bukti kuat bahwa konsep ini layak digunakan sebagai alternatif sistem propulsi kapal (Cairns et al. 2021).

Rotor Flettner memiliki keuntungan dalam penggunaannya, Sistem ini sangat efektif terutama pada kondisi angin samping, memiliki instalasi yang ringkas dengan hambatan angin yang rendah, mudah diintegrasikan ke dalam desain kapal, serta membutuhkan biaya operasional yang relatif rendah. Selain itu, sistem ini juga sesuai untuk dioperasikan pada lingkungan yang keras (K. Wang et al. 2025).

Model dinamika yang menggambarkan karakteristik aerodinamika *rotor flettner* dapat dikembangkan dengan mengadopsi metode analisis *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Analisis aerodinamika *rotor flettner* dapat dilakukan dengan memvariasikan diameter rotor pada ketinggian yang konstan. Pada penelitian sebelumnya menemukan bahwa peningkatan ukuran *rotor flettner* dapat meningkatkan efisiensi bahan bakar (K. Wang et al. 2025).



Gambar 2. 4 Konsep *Rotor Flettner*

Sumber: <https://www.amusingplanet.com/2021/02/flettner-rotor-sailing-ships-without.html>



Gambar 2. 5 *Rotor Sail*

Sumber: <https://www.amusingplanet.com/2021/02/flettner-rotor-sailing-ships-without.html>

2.3.3 Kite Sails

Kite sails atau layar layang adalah layar fleksibel yang terbang di atas kapal dengan ketinggian tertentu. *Kite Sails* memiliki bentuk seperti parasut paralayang yang diterbangkan dengan tujuan agar parasut tersebut dapat menarik kapal. *Kite sails* memanfaatkan energi angin dengan menerbangkan parasut di depan kapal, sehingga energi angin tersebut diubah menjadi energi kinetik yang menghasilkan gaya tarik pada lambung kapal (K. Wang et al. 2025).

Efektivitas pengaplikasian *kite sails* tergantung pada ketinggian dari layar. Dalam studi yang ada ketinggian yang optimal untuk layar yaitu pada 30% panjang tali. Secara teoritis penghematan bahan bakar yang diberikan oleh pengaplikasian *kite sails* pada kapal, kapal dapat menghemat bahan bakar sebesar 50%, namun jika mempertimbangkan kondisi angin pada rute pelayaran *kite sails* penghematan bahan bakar di sekitar 10% sampai 35% (Cairns et al. 2021).

Pengaplikasian *kite sails* memiliki beberapa keunggulan yaitu *kite sails* dapat dipasang kembali di kapal lain dengan lebih mudah, selain itu operasional pelabuhan juga tidak berdampak akan adanya *kite sails* (Cairns et al. 2021; K. Wang et al. 2025).



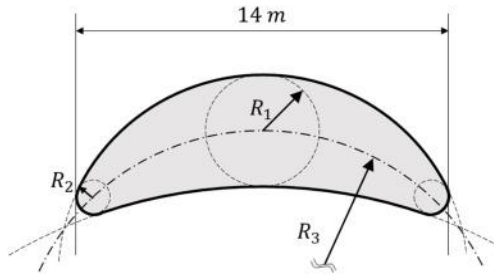
Gambar 2. 6 Kite Sails

Sumber: <https://www.canarymedia.com/articles/sea-transport/watch-this-cargo-ship-fly-a-giant-kite-to-save-fuel-and-cut-emissions>

2.4 Airfoil Bentuk Bulan Sabit

Airfoil bentuk bulan sabit adalah profil dari *Airfoil* yang memiliki bentuk melengkung menyerupai bulan sabit. Dalam pembuatan desain *Airfoil* bentuk bulan sabit, Susunan ortogonal Taguchi dapat digunakan sebagai pendekatan desain. Susunan ortogonal Taguchi merupakan metodologi yang bisa digunakan menjadi acuan dalam pembuatan desain *Airfoil* bentuk bulan sabit dalam meningkatkan efisiensi desain (Guzelbulut, Badalotti & Suzuki 2024b).

Ortogonal Taguchi terdiri dari sejumlah level yang telah di tentukan untuk merepresentasikan variasi nilai yang dapat diambil untuk setiap parameter desain. Batas atas dan batas bawah variabel desain harus ditentukan untuk menghindari terjadinya desain yang sangat melengkung dan tetap mempertahankan bentuk bulan sabit (Guzelbulut et al. 2024b).



Gambar 2. 7 Parameter *Airfoil*
Sumber: Guzelbulut et al. (2024)

Tabel 2. 1 Parameter *Airfoil* Bulan Sabit

Parameter	Level 1	Level 2	Level 3
$R_1(\text{m})$	0,5	1	1,5
$R_2(\text{m})$	0,2	0,4	0,6
$R_3(\text{m})$	8	13	18

Berikut ini merupakan level tiap parameter untuk beberapa model *Airfoil* yang menggunakan metode Taguchi.

Tabel 2. 2 Parameter Level Tiap Model *Airfoil*

No	Gambar	Level R_1	Level R_2	Level R_3
1		1	1	1
2		1	2	2
3		1	3	3
4		2	1	2
5		2	2	3
6		2	3	1
7		3	1	3
8		3	2	1
9		3	3	2

2.5 Efisiensi Bahan Bakar

Bahan bakar minyak merupakan komponen yang sangat penting dalam pengoperasian kapal, hal ini disebabkan karena bahan bakar minyak berfungsi sebagai sumber energi untuk menggerakkan mesin diesel. Jenis bahan bakar yang sering digunakan pada mesin kapal, di antaranya *Heavy Fuel Oil* (HFO), *Marine Diesel Oil* (MDO), dll. Dalam operasional kapal, biaya pembelian bahan bakar menjadi komponen terbesar, yang dapat mencapai sekitar 70% dari total biaya operasional kapal (Bahari 2020).

Daya efektif atau *Brake Horse Power* (BHP) merupakan parameter yang menunjukkan kemampuan mesin dalam menghasilkan daya pada berbagai kondisi operasi, yang dinyatakan dalam satuan kilowatt (kW). Dalam operasional kapal, nilai BHP berpengaruh langsung terhadap besarnya konsumsi bahan bakar. Konsumsi bahan bakar spesifik atau *Specific Fuel Oil Consumption* (SFOC) merupakan parameter unjuk kerja mesin yang berkaitan dengan aspek ekonomis, karena menggambarkan jumlah bahan bakar yang dibutuhkan untuk menghasilkan sejumlah daya dalam selang waktu tertentu. Oleh karena itu, nilai SFOC dapat digunakan untuk menghitung kebutuhan bahan bakar serta mengevaluasi efisiensi operasi mesin (Bahari 2020).

2.6 Computation Fluid Dynamics (CFD)

Computational Fluid Dynamics (CFD) merupakan metode analisis numerik yang digunakan untuk mempelajari dan memprediksi perilaku aliran fluida, perpindahan panas, serta fenomena fisik lainnya yang terkait. CFD bekerja dengan cara menyelesaikan persamaan dasar fluida, seperti persamaan kontinuitas, persamaan momentum, dan persamaan energi, melalui pendekatan komputasi menggunakan komputer.

Model turbulensi SST $k - \omega$ (*Shear Stress Transport* $k - \omega$) merupakan pengembangan model turbulensi dua persamaan yang menggabungkan keunggulan model $k - \omega$ standar pada daerah dekat dinding (*near-wall region*) dengan model $k - \varepsilon$ pada daerah aliran bebas (*free-stream region*). Pendekatan kombinasi tersebut dikembangkan untuk meningkatkan kemampuan prediksi karakteristik aliran turbulen, khususnya pada kondisi yang melibatkan gradien tekanan merugikan (*adverse pressure gradient*) dan fenomena separasi aliran (*flow separation*) (Shirzadi & Tominaga 2026).

$$\mu_t = \frac{\rho a_1 k}{\max(a_1 \omega, SF_2)} \quad (2.1)$$

Secara konseptual, model SST $k - \omega$ memanfaatkan formulasi model $k - \omega$ pada area dekat permukaan karena memiliki sensitivitas tinggi terhadap perilaku lapisan batas (*boundary layer*), sehingga mampu merepresentasikan distribusi tegangan geser dinding secara lebih akurat. Sementara itu, pada daerah aliran bebas, model ini secara bertahap bertransisi menuju formulasi $k - \varepsilon$ guna mengurangi sensitivitas terhadap kondisi aliran bebas yang umumnya menjadi kelemahan model $k - \omega$ standar. Melalui mekanisme *blending function* tersebut, model SST $k - \omega$ mampu menghasilkan kestabilan numerik dan akurasi prediksi yang lebih baik pada berbagai kondisi aliran kompleks.

Keunggulan model SST $k - \omega$ menjadikannya salah satu model turbulensi yang banyak digunakan dalam simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD), terutama pada analisis aerodinamika dan hidrodinamika yang melibatkan interaksi fluida dengan geometri kompleks, seperti *airfoil*, *rigid sail*, lambung kapal, maupun struktur kelautan lainnya.