



ISSN 2338-0322

JURNAL TEKNIK PERKAPALAN

Jurnal Hasil Karya Ilmiah Lulusan S1 Teknik Perkapalan Universitas Diponegoro

ANALISA PENGARUH *FLETTNER* ROTOR TERHADAP HAMBATAN TOTAL KAPAL TANKER 6500 DWT DENGAN METODE CFD

Lantip Adhi Hamdani^{*}, Ahmad Fauzan Zakki¹⁾, Tuswan¹⁾

¹⁾Laboratorium Perencanaan Kapal Dibantu Komputer

Departemen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus Undip Tembalang, Semarang, Indonesia 50275
^{*}e-mail :lantip.hamdani@gmail.com, ahmadfzakki@yahoo.com,

Abstrak

Wind energy adalah teknologi yang memiliki potensi jangka panjang karena menerapkan green house gas (GSG) dalam menurunkan gas emisi seperti semua sector transportasi, industri perkapalan juga fokus dalam pengurangan gas emisi. Contoh inovasi dalam pengurangan gas emisi adalah pemasangan flettner rotor pada kapal tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui hambatan total kapal setelah penambahan flettner rotor pada kapal tanker MT. Kuang 6500 DWT. Variasi pada penelitian ini kecepatan angin 5, 10, dan 20 m/s, perputaran rotasi flettner rotor pada 300, 600, 900 dan 1200 RPM dan ukuran dimensi flettner rotor $D = 5$ meter $H = 15, 20, 25$ meter. Hasil analisa menunjukkan drag force dan lift force semakin besar jika kecepatan angin (m/s) dan tinggi flettner rotor. Drag force paling tinggi sebesar 108056 N dan Lift force paling tinggi sebesar 306902 N pada $D = 5$ meter $H = 25$ meter kecepatan angin 20 m/s RPM 1200. Hasil analisa menunjukkan thrust semakin besar jika kecepatan angin (m/s) dan tinggi flettner rotor. Pada kecepatan angin 5 dan 10 m/s dapat mengurangi hambatan saat diterapkan, sedangkan kecepatan 20 m/s thrust yang dihasilkan lebih besar daripada hambatan kapal tanpa flettner rotor sehingga kurang cocok jika diterapkan.

Kata Kunci: Flettner rotor, Hambatan total kapal, Magnus effect, Thrust

1. PENDAHULUAN

Pada era ini desain perancangan kapal berkembang sangat pesat. Tantangan utama dalam mendesain kapal adalah bagaimana mendapatkan kecepatan yang optimum dan penggunaan daya mesin sekecil mungkin sehingga berpengaruh pada ekonomi dan performa kapal. Dengan meningkatnya jumlah penggunaan kapal dari tahun ke tahun, pembakaran *heavy fuel oil* oleh kapal menyebabkan peningkatan polusi udara di laut. Tahun 2021 *International Maritime Organization* (IMO) menerbitkan *Fourth Greenhouse Gas Study 2020* menyatakan emisi *greenhouse gas* (GHG) Carbon dioksida (CO_2), Methana (CH_4), dan Nitro oksida (N_2O), dinyatakan dalam CO_2e , total pelayaran (internasional, domestik, dan nelayan) telah meningkat dari 977 juta ton tahun 2012 menjadi 1076 juta ton tahun 2018 (meningkat 9,6%). Emisi CO_2 pada tahun 2012 adalah 962 juta ton, sedangkan emisi CO_2 tahun 2018 naik menjadi

1056 juta ton naik 9,3%. IMO juga memperkirakan emisi pada tahun 2018 sampai 2050 menjadi 90% - 130% dengan asumsi ketika pertumbuhan ekonomi lebih tinggi (lebih rendah) dari yang diasumsikan atau ketika pengurangan emisi dari GHG dari sektor berbasis lahan lebih kecil (lebih besar) daripada yang diperlukan untuk membatasi kenaikan suhu global menjadi dibawah 2°C . Walaupun dampak COVID-19 emisi tahun 2020 dan 2021 akan signifikan turun. Akan tetapi, tergantung pada pemulihan trayek kapal, emisi selama beberapa dekade mendatang mungkin beberapa persen lebih rendah dari yang diperkirakan [1]. *Maritime Pollution* (MARPOL) *annex VI* menetapkan regulasi tentang batasan emisi Nitrogen oksida (NO_x), Sulfur oksida (SO_x), dan Carbon dioksida (CO_2) [2]. Arifin Tasrif, Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) pada siaran pers NOMOR: 028.Pers/04/SJI/2021

tanggal 19 Januari 2021 mengungkapkan bahwa cadangan minyak bumi di Indonesia akan tersedia hingga 9,5 tahun mendatang dan cadangan gas bumi di Indonesia 19,9 tahun [3]. Karena sifat minyak bumi yang tidak dapat diperbarui, itulah kenapa dibutuhkan teknologi alternatif untuk mengurangi penggunaan bahan bakar minyak yang berlebihan. Teknologi alternatif yang sudah ada didunia perkapalan adalah pemanfaatan energi angin melalui media *flettner rotor*.

Pada tahun 1920, seorang *engineer* asal Jerman bernama Anton Flettner meneliti tentang efektifitas *magnus effect* pada silinder yang berputar sebagai sistem propulsi kapal. Konsep pertama kali diterapkan pada kapal Jerman bernama Buckau tahun 1925 dengan dua *flettner rotor* yang masing-masing memiliki tinggi 18,3 m dan diameter 2,8 m [4]. Pada penelitian sebelumnya yang dilakukan Hasan Islam Copuroglu dan Emre Pesman di Karadeniz Technical University tentang Analysis of Flettner Rotor Ship in Beam Waves. Penelitian ini tentang pengaruh *flettner rotor* pada gerak *roll* kapal dan efek dari *greak roll* pada peforma *flettner rotor* di *beam wave*. Perhitungan dilakukan dengan 0°, 20°, 40°, dan 60° *heel angles* untuk mendapatkan *heeling moment* dan *driving force* [5]. Adapun penelitian lainnya tentang Techno Economic and Environmental assessment of Flettner Rotor for Marine Propulsion yang ditulis oleh L. Talluri, D.K. Nalianda, dan E. Giuliani di University of Florence dan Cranfield University. Penelitian ini menggunakan pendekatan analisis tekno ekonomi dan lingkungan untuk menilai kemungkinan dan manfaat dari pemanfaatan energi angin, dengan tujuan menetapkan potensi dari energi angin dalam pengurangan emisi GHG [6].

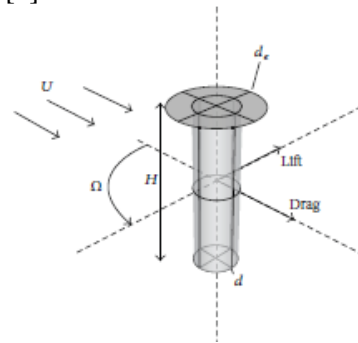
Dalam penelitian ini penulis akan membahas Analisa perubahan hambatan kapal akibat penambahan *flettner rotor* pada kapal tanker 6500 DWT menggunakan metode CFD. *Software* yang akan digunakan adalah *Ansys Fluent*.

2. DASAR TEORI

2.1 Flettner Rotor

Flettner rotor adalah silinder vertikal yang berotasi pada sumbunya oleh motor. Saat angin bertiup melewati silinder yang berputar, tekanan tinggi pada satu sisi dibentuk sesuai dengan area tekanan rendah pada sisi yang berlawanan. Perbedaan tekanan ini menghasilkan gaya angkat yang tegak lurus dengan arah angin. Ada juga gaya

tarik. Komponen maju dari gaya-gaya ini menghasilkan gaya dorong yang mendorong kapal ke depan [7].



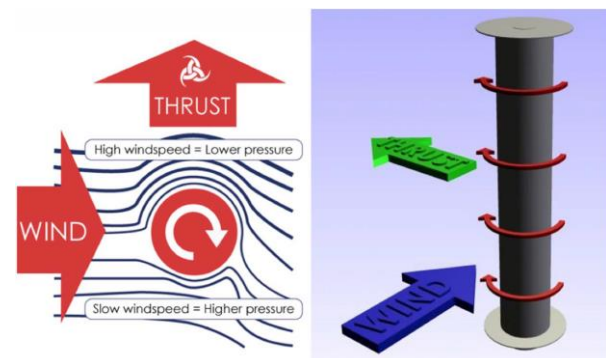
Gambar 1 Sketsa *flettner rotor*

2.2 Magnus Effect

Efek magnus mirip dengan prinsip Bernoulli, dimana hubungan kecepatan dan tekanan pada fluida yang bergerak. Jika tekanan meningkat, maka kecepatan pada fluida pasti turun, dan juga sebaliknya. Mirip dengan efek magnus, perbedaannya adalah bahwa rotasi benda yang berputar menyebabkan perubahan kecepatan.

$$F_m = S(w \cdot v) \quad (1)$$

Dimana F_m adalah vektor gaya magnus, S adalah coefisien hambatan udara, w adalah kecepatan sudut benda, dan v adalah kecepatan fluida [8].



Gambar 2 Efek Magnus Pada Silinder Yang Berotasi

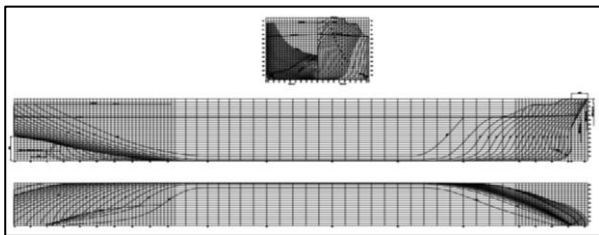
3. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Objek Penelitian

Kapal yang akan digunakan sebagai objek penelitian ini adalah kapal tanker milik Marina Maritime Lines SA yang memiliki bobot 6500 DWT dengan karakteristik ukuran utama seperti pada tabel 1.

Tabel 1 Ukuran utama MT. Kuang

Ukuran utama	Dimensi	Satuan
<i>Length Overall</i>	61,30	m
<i>Length of Waterline</i>	57,02	m
<i>Length of Perpendicular</i>	55,00	m
<i>Breadth</i>	13,20	m
<i>Height</i>	3,90	m
<i>Draft</i>	2,50	m
<i>Vs</i>	15	knot



Gambar 3 Desain rencana garis MT. Kuang

3.2 Perlakuan Pada Objek

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui perbandingan hambatan total kapal dengan penambahan *flettner rotor* dan tanpa *flettner rotor*. Adapun variasi pada penelitian ini adalah kecepatan angin 5, 10, 20 m/s, perputaran rotasi *flettner rotor* 300, 600, 900, 1200 RPM dan dimensi ukuran *flettner rotor* diameter 5 meter dan tinggi 15, 20, 25 meter seperti pada tabel 2.

Tabel 2 Variasi *flettner rotor* diameter 5 meter dan tinggi 15, 20, 25 meter

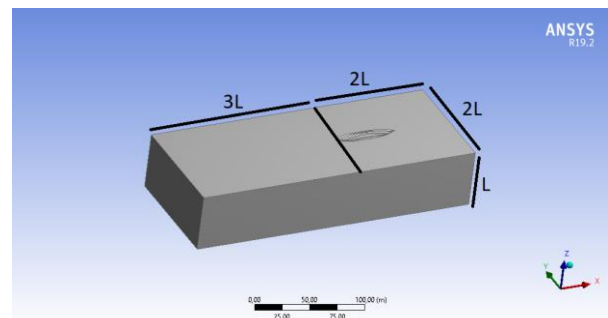
Kecepatan Angin (m/s)	Rotasi (RPM)
5 m/s	300
	600
	900
	1200
10 m/s	300
	600
	900
	1200
20 m/s	300
	600
	900
	1200

3.3 Permodelan kapal

Pemodelan pada lambung kapal dibuat menggunakan *polysurface* pada *software* Rhinoceros 6 guna mendapatkan bentuk lambung kapal yang tertutup (*solid*). Kemudian lambung kapal di *export* ke Ansys Workbench untuk melakukan analisa hambatan kapal. Sedangkan pemodelan pada *flettner rotor* juga menggunakan *software* Rhinoceros 6 kemudian di *export* ke Ansys Workbench untuk melakukan analisa *drag force* dan *lift force*.

3.4 Analisa Hambatan dan Simulasi CFD

Perhitungan hambatan pada penelitian ini dilakukan menggunakan *software* CFD dengan *boundary condition* yang disesuaikan dengan rekomendasi dari ITTC seperti gambar 4. Kemudian diberi nama pada masing-masing kondisi batas sesuai yang akan diterapkan.



Gambar 4 *boundary condition* simulasi lambung kapal

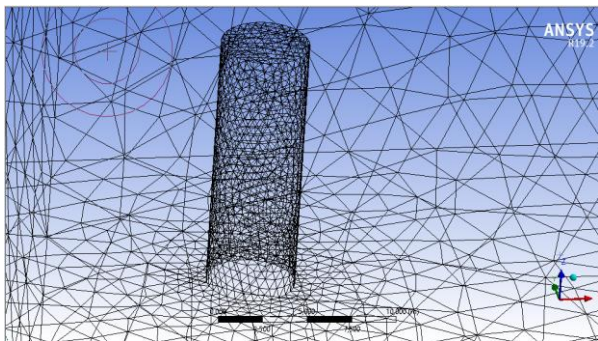
Meshing yang diterapkan yaitu dengan mengatur ukuran elemen dengan ukuran tertentu atau *body size meshing* dengan jenis *Patch Conforming Method* jenis *tetrahedron*. Ukuran *sizing* yang digunakan yaitu $5,5 \times 10^{-3}$ meter pada badan kapal dan 4,4 meter pada kolam. Dihasilkan *node* sebesar 37753 dan *elements* 196259.

Pada tahap *solver manager* dilakukan *setting* kondisi batas pada *domain fluida* sesuai dengan penamaan yang dilakukan pada tahap *pre processor*. Untuk model turbulen diatur menggunakan K-omega SST. K-omega SST merupakan model turbulen yang cocok untuk perhitungan kapal monohull [9]. Pada kondisi batas atau *boundary condition* terdapat 4 bagian yaitu *Inlet*, *Outlet*, *Opening* dan *Wall* yang diatur sebelum dilakukan penyelesaian. Pada *boundary inlet* dengan memasukkan *velocity inlet* sesuai dengan kecepatan kapal. Pada *outlet* diatur nilai *gauge pressure* 0 Pa. Pada *boundary wall* pada

kapal diatur dengan *no slip wall*. Pada *boundary opening* diatur *pressure*. Analisa model simulasi dijalankan 10000 *iterations*.

3.5 Analisa Drag force dan Lift force

Perhitungan nilai *drag force* dan *lift force* dilakukan menggunakan *software CFD*. *Meshing* digunakan bentuk elemen *tetrahedron*. Ukuran *body sizing* yang digunakan pada *flettner rotor* adalah 5×10^{-3} meter dan pada *boundary condition* adalah 3,7 meter. Dihasilkan *nodes* 10704 dan *elements* 57778 seperti pada gambar 5.



Gambar 5 *meshing flettner rotor*

Parameter *setup* berdasarkan penelitian sebelumnya “*Numerical Study on Body Form of Flettner Sail Using Computational Fluid Dynamics*”[10] seperti pada tabel 3.

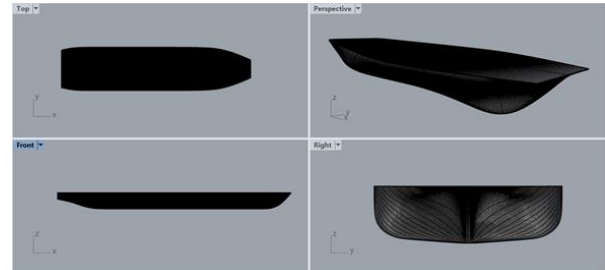
Tabel 3 *Solver Setting Simulation*

<i>Solver</i>	<i>Pressure based & Steady</i>
<i>Model</i>	<i>K-Epsilon Realizable, Enhanced Wall Treatment</i>
<i>Solution</i>	<i>Schema: Coupled</i> <i>Gradient: Least Squares Cell – based</i> <i>Pressure: Standard</i> <i>Momentum: Second-Order Upwind</i> <i>Turbulent Kinetic Energy: Second-Order Upwind</i> <i>Turbulent Dissipation Rate: Second-Order Upwind</i>
<i>Residual</i>	<i>Continuity: 10^{-5}, x-y-z Velocity: 10^{-7}, k & Epsilon: 10^{-5}</i>

4. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1 Pembuatan Model

Hasil pemodelan menggunakan *software Rhinoceros 6* dapat dilihat pada gambar 6.



Gambar 6 Model 3D Rhinoceros 6

4.2 Perhitungan dan Validasi Hambatan

Perhitungan hambatan kapal menggunakan *software berbasis software CFD (Computational Fluid Dynamic)*, kemudian divalidasi menggunakan perhitungan secara analitik menggunakan metode Holtrop. Metode Holtrop merupakan salah satu metode untuk menghitung hambatan kapal saat fase *displacement (even keel)* dengan *Froude Number* 0,326. Hasil perbandingan antara perhitungan *software CFD* dan perhitungan analitik metode Holtrop dapat dilihat pada tabel 4.

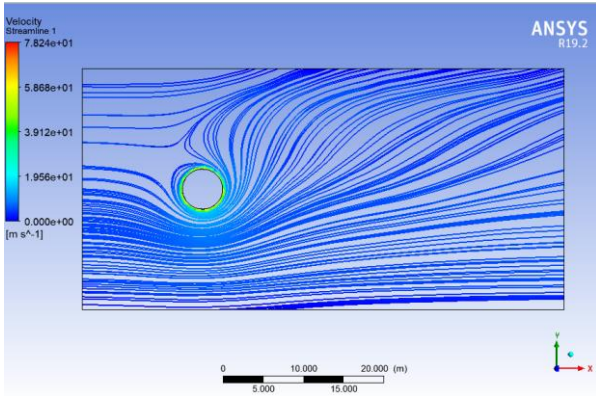
Tabel 4 Validasi hambatan total (RT)

RT		<i>Error (%)</i>
<i>CFD (KN)</i>	<i>Holtrop (KN)</i>	
65,90	66,90	1,5

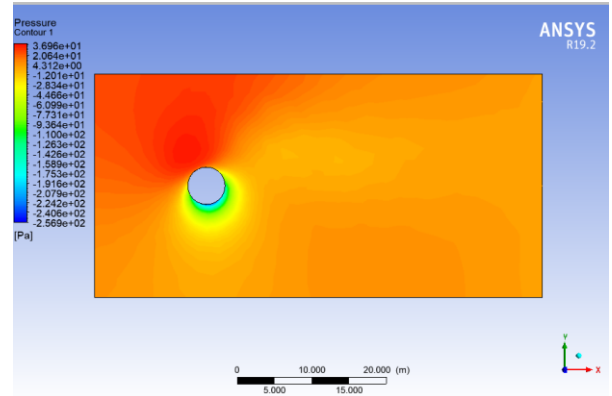
Hasil validasi menunjukkan tingkat *error* pada perhitungan hambatan total kedua model berada dibawah 5% sehingga perhitungan total kedua model dinyatakan valid.

4.3 Perhitungan Coefficient Lift dan Coefficient Drag

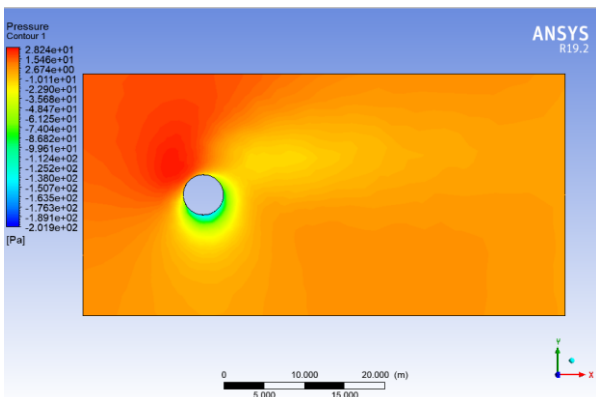
Flettner rotor adalah silinder yang mampu menghasilkan gaya menggunakan *magnus effect* ketika berputar pada aliran fluida yang menerapkan hukum Bernoulli. Ketika aliran melewati silinder yang berputar pada kecepatan tertentu. Distribusi kecepatan pada kedua sisi akan berbeda yang artinya distribusi tekanan akan berbeda. Sisi *flettner rotor* yang memiliki tekanan lebih rendah akan menghasilkan *lift force*. Seperti yang dapat dilihat pada gambar 7 – 12.



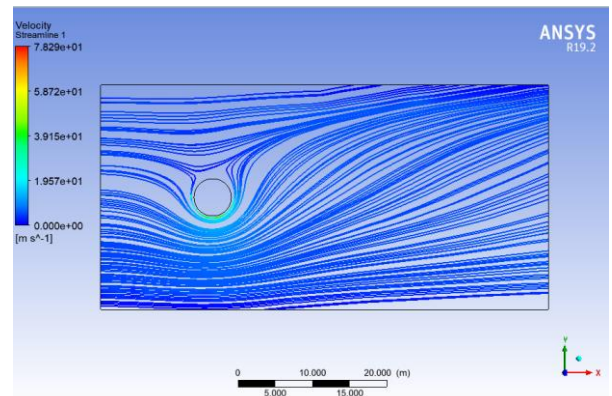
Gambar 7 Velocity Streamline D = 5 meter dan H = 15 meter



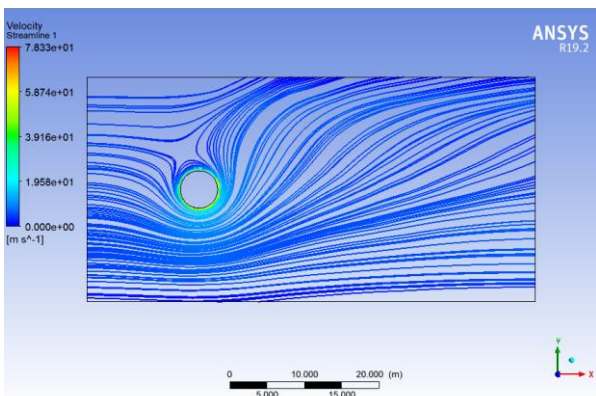
Gambar 10 Pressure Contour D = 5 meter dan H = 20 meter



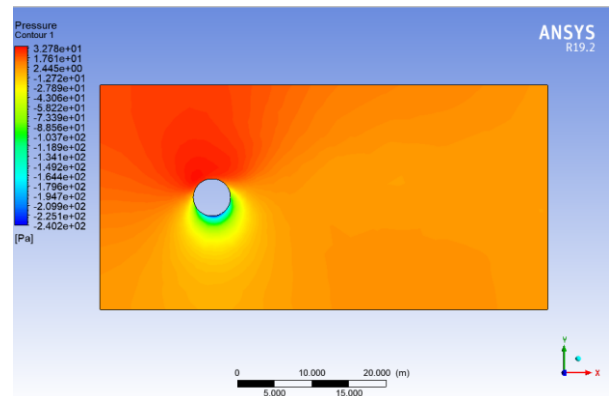
Gambar 8 Pressure Contour D = 5 meter dan H = 15 meter



Gambar 11 Velocity Streamline D = 5 meter dan H = 25 meter



Gambar 9 Velocity Streamline D = 5 meter dan H = 20 meter



Gambar 12 Pressure Contour D = 5 meter dan H = 25 meter

Perhitungan berbasis *software CFD* (*Computational Fluid Dynamic*) hanya bisa mendapatkan *drag force* dan *lift force*. Hasil perhitungan seperti pada tabel 5 - 7.

Tabel 5 Hasil simulasi *flettner rotor* D = 5 meter dan H = 15 meter

Angin (m/s)	RPM	Drag Force (N)	Lift Force (N)
5	300	4884,02	7919,59
5	600	5733,76	5385,98
5	900	7121,03	3857,36
5	1200	5077,3	4778
10	300	10265,5	24882,2
10	600	19753,1	32919,1
10	900	24956,6	27851,4
10	1200	25185	21896
20	300	18833,6	53309
20	600	39571,6	97705,4
20	900	60251,9	122896
20	1200	81079,9	133499

Tabel 6 Hasil simulasi *flettner rotor* D = 5 meter dan H = 20 meter

Angin (m/s)	RPM	Drag Force (N)	Lift Force (N)
5	300	7053,92	15285,2
5	600	10979,1	15188,5
5	900	16405,8	15383,3
5	1200	13698,6	14101,7
10	300	11068,7	36969,3
10	600	27048,5	60043
10	900	26603,4	53791
10	1200	52906,3	66025,2
20	300	20387	79066,3
20	600	42488,3	143825
20	900	66367,9	191238
20	1200	105415	234122

Tabel 7 Hasil simulasi *flettner rotor* D = 5 meter dan H = 25 meter

Angin (m/s)	RPM	Drag Force (N)	Lift Force (N)
5	300	6549,83	19612,6
5	600	8902	19680,7
5	900	17561,8	28625,1
5	1200	12719,8	26098,9
10	300	12320,2	50127,4
10	600	27143,1	75603,3
10	900	37760	94544,3
10	1200	38983,9	93986,3
20	300	25644,6	113478
20	600	47451,2	194041

20	900	71263,9	258614
20	1200	108056	306902

Untuk mendapatkan *coefficient lift* dan *coefficient drag* menggunakan persamaan :

$$C_d = D / \frac{1}{2} \rho V^2 A \quad (2)$$

$$C_l = L / \frac{1}{2} \rho V^2 A \quad (3)$$

C_d adalah *coefficient drag*, C_l adalah *coefficient lift*, D adalah *drag force* (N), L adalah *lift force* (N), ρ adalah *fluid density* (kg/m³), V adalah kecepatan angin (m/s), A adalah *vertical cross section area of sail* (m²).

Untuk hasil perhitungan setelah memasukkan persamaan 2 dan 3 hasil dapat dilihat tabel 8 - 10.

Tabel 8 Hasil *drag coefficient* dan *lift coefficient* D=5 meter dan H = 15 meter

Angin (m/s)	RPM	Drag Coefficient	Lift Coefficient
5	300	4,253	6,896
5	600	4,993	4,690
5	900	6,201	3,359
5	1200	4,421	4,160
10	300	2,235	5,417
10	600	4,300	7,166
10	900	5,433	6,063
10	1200	5,482	4,766
20	300	1,025	2,901
20	600	2,154	5,317
20	900	3,279	6,688
20	1200	4,413	7,265

Dari tabel 8 *drag coefficient* memiliki *range value* 1,025 – 6,201 dan *lift coefficient* memiliki *range value* 2,901 – 7,265. Pada kecepatan angin 5 m/s *drag coefficient* terbesar pada RPM 900 bernilai 6,201 dan *lift coefficient* terbesar pada RPM 300 bernilai 6,896. Pada kecepatan angin 10 m/s *drag coefficient* terbesar pada RPM 1200 bernilai 5,482 dan *lift coefficient* terbesar pada RPM 300 bernilai 7,166. Pada kecepatan angin 20 m/s *drag coefficient* terbesar pada RPM 1200 bernilai 4,413 dan *lift coefficient* terbesar pada RPM 1200 bernilai 7,265.

Tabel 9 Hasil *drag coefficient* dan *lift coefficient*
D = 5 meter dan H = 20 meter

Angin (m/s)	RPM	Drag Coefficient	Lift Coefficient
5	300	4,607	9,982
5	600	7,170	9,919
5	900	10,714	10,046
5	1200	8,946	9,209
10	300	1,807	6,036
10	600	4,416	9,803
10	900	4,343	8,782
10	1200	8,638	10,780
20	300	0,832	3,227
20	600	1,734	5,870
20	900	2,709	7,806
20	1200	4,303	9,556

Dari tabel 9 *drag coefficient* memiliki *range value* 0,832 – 10,714 dan *lift coefficient* memiliki *range value* 3,227 – 10,780. Pada kecepatan angin 5 m/s *drag coefficient* terbesar pada RPM 900 bernilai 10,714 dan *lift coefficient* terbesar pada RPM 900 bernilai 10,046. Pada kecepatan angin 10 m/s *drag coefficient* terbesar pada RPM 1200 bernilai 8,638 dan *lift coefficient* terbesar pada RPM 1200 bernilai 10,780. Pada kecepatan angin 20 m/s *drag coefficient* terbesar pada RPM 1200 bernilai 4,303 dan *lift coefficient* terbesar pada RPM 1200 bernilai 9,556.

Tabel 10 Hasil *drag coefficient* dan *lift coefficient*
D = 5 meter dan H = 20 meter

Angin (m/s)	RPM	Drag Coefficient	Lift Coefficient
5	300	3,422	10,247
5	600	4,651	10,282
5	900	9,175	14,955
5	1200	6,645	13,635
10	300	1,609	6,547
10	600	3,545	9,875
10	900	4,932	12,349
10	1200	5,092	12,276
20	300	0,837	3,705
20	600	1,549	6,336
20	900	2,327	8,445
20	1200	3,528	10,021

Dari tabel 10 *drag coefficient* memiliki *range value* 0,837 – 9,175 dan *lift coefficient* memiliki *range*

value 3,705 – 14,955. Pada kecepatan angin 5 m/s *drag coefficient* terbesar pada RPM 900 bernilai 9,175 dan *lift coefficient* terbesar pada RPM 900 bernilai 14,955. Pada kecepatan angin 10 m/s *drag coefficient* terbesar pada RPM 1200 bernilai 5,092 dan *lift coefficient* terbesar pada RPM 900 bernilai 12,349. Pada kecepatan angin 20 m/s *drag coefficient* terbesar pada RPM 1200 bernilai 3,528 dan *lift coefficient* terbesar pada RPM 1200 bernilai 10,021.

Dapat dilihat dari hasil tabel diatas semakin bertambahnya tinggi *flettner rotor* dan kecepatan angin semakin besar pula *drag* dan *lift* yang dihasilkan. Pada kecepatan angin 5 m/s *range value* untuk *drag coefficient* adalah 3,422 - 10,714 dan *lift coefficient* adalah 3,359 - 14,955. Pada kecepatan 10 m/s *range value* untuk *drag coefficient* adalah 1,609 - 8,638 dan *lift coefficient* adalah 4,766 - 12,349. Pada kecepatan 20 m/s *range value* untuk *drag coefficient* adalah 0,832 - 4,303 dan *lift coefficient* adalah 2,901 - 10,021.

4.4 Perhitungan Hambatan Baru

Ketika kapal terkena angin dari sisi samping, atas dan bawah pada saat itu *flettner rotor* akan menghasilkan *magnus force*, yang berarti *flettner rotor* juga menghasilkan gaya dorong (*Thrust force*) yang membantu laju kapal. Akibat adanya bantuan gaya dorong dari *flettner rotor*, terjadi perubahan hambatan kapal. Sudut angin (θ) harus dipertimbangkan dalam penerapan, *thrust* (F_r) ditentukan oleh *drag* dan *lift* yang dihasilkan oleh *flettner rotor* seperti pada persamaan 4.

$$F_r = F_L \times \sin \theta - F_D \times \cos \theta \quad (4)$$

F_r adalah *Thrust Force* (N), F_L adalah *Lift Force* (N), F_D adalah *Drag Force* (N). Pada penelitian ini, sudut angin 90° , sehingga nilai $\sin 90$ adalah 1 dan $\cos 90$ adalah 0. Jadi hambatan kapal total baru dapat dihitung menggunakan persamaan 5.

$$R_T \text{ New} = R_T - F_r \quad (5)$$

$R_T \text{ New}$ adalah hambatan kapal baru (N), R_T adalah hambatan kapal tanpa *flettner rotor* (N), F_r adalah *Thrust Force* (N). Hasil hambatan kapal baru dapat dilihat pada tabel 11 - 13.

Tabel 11 Hasil Hambatan baru D = 5 meter dan H = 15 meter

Thrust (KN)	RT (KN)		Persen	
	Analitik	CFD	Analitik	CFD
7,92	57,98	58,98	12%	12%
5,39	60,51	61,51	8%	8%
3,86	62,04	63,04	6%	6%
4,78	61,12	62,12	7%	7%
24,88	41,02	42,02	38%	37%
32,92	32,98	33,98	50%	49%
27,85	38,05	39,05	42%	42%
21,90	44,00	45,00	33%	33%
53,31	12,59	13,59	81%	80%
97,71	-31,81	-30,81	148%	146%
122,90	-57,00	-56,00	186%	184%
133,50	-67,60	-66,60	203%	200%

Pada kecepatan angin 5 m/s pengurangan hambatan terbesar 12% pada RPM 300, pada kecepatan angin 10 m/s pengurangan hambatan terbesar 49% pada RPM 600 dan pada kecepatan angin 20 m/s pengurangan hambatan yang sesuai adalah pada RPM 300 sebesar 80%, untuk RPM 600, 900 dan 1200 *thrust* yang dihasilkan lebih besar daripada hambatan kapal tanpa *flettner rotor*.

Tabel 12 Hasil Hambatan baru D = 5 meter dan H = 20 meter

Thrust (KN)	RT (KN)		Persen	
	Analitik	CFD	Analitik	CFD
15,29	50,61	51,61	23%	23%
15,19	50,71	51,71	23%	23%
15,38	50,52	51,52	23%	23%
14,10	51,80	52,80	21%	21%
36,97	28,93	29,93	56%	55%
60,04	5,86	6,86	91%	90%
53,79	12,11	13,11	82%	80%
66,03	-0,13	0,87	100%	99%
79,07	-13,17	-12,17	120%	118%
143,83	-77,93	-76,93	218%	215%
191,24	-125,34	-124,34	290%	286%
234,12	-168,22	-167,22	355%	350%

Pada kecepatan angin 5 m/s pengurangan hambatan terbesar 23% pada RPM 900, pada kecepatan angin 10 m/s pengurangan hambatan terbesar 90% pada RPM 600 dan pada kecepatan angin 20 m/s *thrust* yang dihasilkan lebih besar daripada hambatan kapal tanpa *flettner rotor*.

Tabel 13 Hasil Hambatan baru D = 5 meter dan H = 25 meter

Thrust (KN)	RT (KN)		Persen	
	Analitik	CFD	Analitik	CFD
19,61	46,29	47,29	30%	29%
19,68	46,22	47,22	30%	29%
28,63	37,27	38,27	43%	43%
26,10	39,80	40,80	40%	39%
50,13	15,77	16,77	76%	75%
75,60	-9,70	-8,70	115%	113%
94,54	-28,64	-27,64	143%	141%
93,99	-28,09	-27,09	143%	140%
113,48	-47,58	-46,58	172%	170%
194,04	-128,14	-127,14	294%	290%
258,61	-192,71	-191,71	392%	387%
306,90	-241,00	-240,00	466%	459%

Pada kecepatan angin 5 m/s pengurangan hambatan terbesar 43% pada RPM 900, pada kecepatan angin 10 m/s pengurangan hambatan terbesar 75% pada RPM 300 dan pada kecepatan angin 10 m/s pada RPM 600, 900, 1200 dan 20 m/s *thrust* yang dihasilkan lebih besar daripada hambatan kapal tanpa *flettner rotor*.

Dari tabel diatas, semakin besar kecepatan angin dan tinggi *flettner rotor*, *thrust* yang dihasilkan semakin besar. Pada kecepatan angin 5 m/s pengurangan hambatan antara *range value* 6% - 43%. Pada kecepatan angin 10 m/s pengurangan hambatan antara *range value* 33% - 90%. Sedangkan pada kecepatan angin 20 m/s pengurangan yang dapat diterapkan pada RPM 300 ukuran dimensi *flettner rotor* D = 5 meter, H = 15 meter sebesar 80%, untuk yang lain, *thrust* yang dihasilkan lebih besar daripada hambatan total kapal tanpa *flettner rotor*.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pembahasan pada jurnal ini yang telah mengacu pada data-data dan referensi yang relevan. Maka dapat ditarik kesimpulan nilai *lift* dan *drag* semakin besar jika kecepatan angin dan tinggi *flettner rotor*.

Dari hasil analisis *thrust* menunjukkan semakin besar kecepatan angin dan tinggi *flettner rotor* maka semakin besar pula *thrust* yang dihasilkan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] IMO, “Fourth IMO Greenhouse Gas Study: Executive Summary,” *IMO Greenh. Gas Study*, vol. 4, no. 1, p. 46, 2020.
- [2] “Prevention of Air Pollution from Ships.” <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Air-Pollution.aspx> (accessed Dec. 25, 2021).
- [3] “Kementerian ESDM RI - Media Center - Arsip Berita - Menteri ESDM: Cadangan Minyak Indonesia Tersedia untuk 9,5 Tahun dan Cadangan Gas 19,9 Tahun.” <https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/menteri-esdm-cadangan-minyak-indonesia-tersedia-untuk-95-tahun-dan-cadangan-gas-199-tahun> (accessed Dec. 31, 2021).
- [4] Ahlborn. F, *The Magnus effect in theory and in reality*. In *Zeitschrift Fur Flugtechnik und Motorluftschiffahrt*. 1930.
- [5] H. I. Copuroglu and E. Pesman, “Analysis of Flettner Rotor ships in beam waves,” *Ocean Eng.*, vol. 150, no. January, pp. 352–362, 2018, doi: 10.1016/j.oceaneng.2018.01.004.
- [6] L. Talluri, D. K. Nalianda, and E. Giuliani, “Techno economic and environmental assessment of Flettner rotors for marine propulsion,” *Ocean Eng.*, vol. 154, no. February 2018, pp. 1–15, 2018, doi: 10.1016/j.oceaneng.2018.02.020.
- [7] Jan Babicz, *Wärtsilä Encyclopedia of Ship Technology*, vol. 2, no. January. 2015.
- [8] P. Brandon, “what is the magnus effect and How to Calculate it,” 2010. http://ffden2.phys.uaf.edu/211_fall2010.web.dir/Patrick_Brandon/what_is_the_magnus_effect.html (accessed Jan. 16, 2022).
- [9] R. Deng, D. B. Huang, G. L. Zhou, and H. W. Sun, “Investigation on some factors effecting ship resistance calculation with CFD code FLUENT,” *Chuan Bo Li Xue/Journal Sh. Mech.*, vol. 17, no. 6, pp. 616–624, 2013, doi: 10.3969/j.issn.1007-7294.2013.06.004.
- [10] Gharagozloo A. H., Negahdari M. R., Ebrahimi A. Numerical Study on Body Form of Flettner Sail Using Computational Fluid Dynamics. *ijmt* 2021; 16 :63-71 URL: <http://ijmt.ir/article-1-774-en.html>