



ISSN 2338-0322

JURNAL TEKNIK PERKAPALAN

Jurnal Hasil Karya Ilmiah Lulusan S1 Teknik Perkapalan Universitas Diponegoro

Analisis Pengaruh Penambahan *Chine*, *Spray Rails*, dan *Interceptor* terhadap Kemampuan *Self-Righting* Kapal Patroli Menggunakan Metode CFD

Mohammad Revan Adriansyah¹⁾, Andi Trimulyono²⁾, Berlian Arswendo Adietya³⁾

¹⁾Laboratorium Kapal Kecil dan Perikanan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus Undip Tembalang, Semarang, 50275, Indonesia

¹⁾e-mail : revanadriansya@students.undip.ac.id

Abstrak

Kemampuan *self-righting* merupakan aspek krusial dalam desain kapal patroli untuk meningkatkan keselamatan operasional, terutama saat kapal miring akibat gelombang atau gangguan laut. Penelitian ini menganalisis pengaruh penambahan komponen hidrodinamik—*chine*, *spray rails*, dan *interceptor*—terhadap kemampuan *self-righting* menggunakan *Computational Fluid Dynamics (CFD)*. Model kapal patroli dengan data utama tersedia dimodifikasi menjadi lima variasi: *baseline*, *chine*, *spray rails*, *interceptor*, dan gabungan ketiganya. Semua model disimulasikan untuk mengevaluasi respon gerakan roll dan kemampuan kembali tegak setelah kemiringan awal. Hasil simulasi menunjukkan semua variasi memiliki *self-righting* baik, dengan kapal mampu pulih ke posisi keseimbangan. Analisis lanjutan pada model gabungan memvariasikan enam posisi *center of gravity (CoG)* untuk menguji pengaruh distribusi berat. Semua variasi *CoG* juga menunjukkan *self-righting* baik, meski perubahan posisi *CoG* memengaruhi karakteristik roll dan waktu pemulihan. Secara umum, kombinasi modifikasi lambung dan distribusi berat optimal meningkatkan performa *self-righting* kapal patroli. Hasil ini diharapkan menjadi referensi desain kapal patroli dengan stabilitas dan keselamatan lebih baik.

Kata Kunci : Anti-Terbalik, *Self-Righting*, *Chine*, *Spray Rails*, *Interceptor*.

1. PENDAHULUAN

Kapal patroli merupakan sebuah kapal yang memiliki ukuran yang kecil, namun memiliki kecepatan yang tinggi sehingga mampu untuk menjaga suatu negara khususnya di wilayah kelautan [1]. Kapal patroli juga kapal yang di desain untuk kegiatan multiguna, dimana pada kapal patroli pada umumnya memiliki kecepatan tinggi dan stabilitas yang bagus untuk berpatroli. Kapal-kapal ini beroperasi di kawasan Zona Ekonomi Eksklusif (ZEE), di mana kondisi laut bisa menjadi sangat menantang. Dalam cuaca buruk, kapal patroli dapat menghadapi angin kencang dan gelombang tinggi yang berdampak pada kestabilan kapal [2]. Dengan adanya kondisi tersebut, daerah kelautan merupakan tempat yang rawan terjadi kecelakaan. Salah satu insiden yang kerap terjadi adalah terbaliknya kapal (*ship capsized*). Peristiwa ini tidak hanya mengancam keselamatan jiwa, tetapi juga berpotensi menimbulkan pencemaran lingkungan laut. Untuk meminimalisir hal tersebut, kapal patroli yang memiliki kecepatan tinggi rawan berada di kondisi ombak serta cuaca yang ekstrem disarankan untuk memiliki momen *self-righting*.

Kemampuan *self-righting* sangat dipengaruhi oleh karakteristik stabilitas kapal, terutama bentuk lambung, distribusi berat, serta karakteristik hidrodinamika kapal saat mengalami gerakan rolling. Selain faktor distribusi muatan dan posisi pusat gravitasi, modifikasi geometri lambung juga dapat mempengaruhi performa stabilitas kapal. *Chine* mungkin efektif dalam mengoreksi trim ini, menjaga kapal tetap pada sudut yang optimal.

Chine merupakan perpotongan secara horizontal antara lambung kapal dibagian alas dengan lambung bagian sisi kapal [3][4]. Maka dari itu, untuk menghindari hal tersebut perancangan kapal *self-righting* di perlukan adanya modifikasi untuk menambahkan stabilitas pada kapal agar lebih stabil.

Penambahan *chine* menjadi *double chine* baik itu dengan sudut 0° maupun sudut 10° memiliki kenaikan nilai trim yang lebih tinggi dibandingkan dengan model *single chine* [5]. Selain *chine* adapula *spray rails* yang berperan dalam menghasilkan gaya angkat hidrodinamik pada bagian bawah lambung yang dapat memengaruhi

karakteristik hambatan, trim, serta stabilitas kapal [6].

Penelitian kapal patroli dengan penggunaan *interceptors* menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD) menunjukkan bahwa penambahan *interceptor* dapat meningkatkan stabilitas kapal dengan mengurangi trim berlebih serta membantu meredam gerakan roll pada kapal [7]. Penelitian kapal patroli dengan *middle interceptors* menggunakan CFD menunjukkan *interceptors* ditempatkan khususnya empat meter dibelakang midship [8]. Penelitian mengenai momen *self-righting* terhadap kapal patroli dengan skala 1:27.4 menggunakan analisis roll decay dengan metode CFD sudah diteliti sebelumnya [2].

Terdapat tiga metode untuk suatu kapal mencapai *self-righting* salah satunya yaitu *inherent self-righting*. Metode ini membuat kapal dapat kembali ke posisi semula dari sudut kemiringan manapun tanpa bantuan kru kapal yang terdapat didalamnya. Memiliki lambung yang kedap air serta sebagian besar bangunan atas yang kedap air juga merupakan hal utama untuk mencapai metode ini. Distribusi muatan dan daya apung yang diletakkan secara strategis merupakan kunci untuk mencapai metode ini [9]. Penelitian pengaruh tinggi *deckhouse* kapal patroli terhadap momen *self-righting* menunjukkan bahwa tinggi *deckhouse* linear dengan momen *self-righting*[10]. Penelitian sebelumnya terhadap kapal BASARNAS menunjukkan momen *self-righting* didapatkan dengan pembesaran lebar *deckhouse* [11].

Penelitian ini akan menggunakan perhitungan numerik yang dibantu dengan software CFD dengan menggunakan simulasi roll decay analysis sebagai bentuk validasi momen *self-righting* dan *roll period* yang akan dilakukan. Asumsi pada penelitian ini berupa semakin rendah KG yang dimiliki akan menghasilkan panjang GZ yang semakin tinggi yang akan membantu dalam mendapatkan momen *self-righting* serta menciptakan *roll period* yang lebih singkat [12].

Penelitian ini akan menguji mengenai distribusi pembebanan muatan terhadap kapal tersebut untuk mendapatkan variasi pembebanan serta membuktikan melalui variasi tersebut apakah kapal memiliki kemampuan *self-righting* dan efek *anti-capsizing* serta mencari *roll period* yang dihasilkan dari gerakan rotasi *rolling* yang terjadi pada kapal saat menerapkan momen *self-righting*.

2. METODE

2.1. Data Kapal.

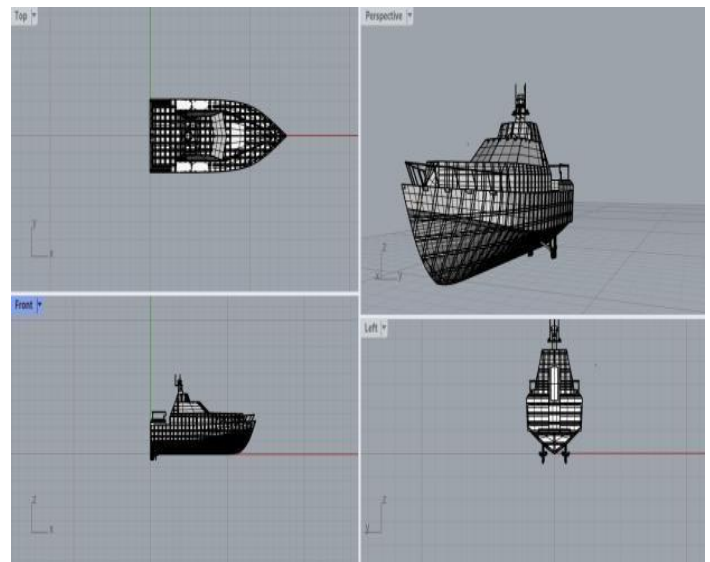
Model kapal yang akan digunakan pada penelitian ini berupa kapal patroli yang diambil dari data kapal yang sebelumnya di teliti oleh Trimulyono dkk [2]. Ukuran utama kapal tersebut menggunakan skala 1:1 dengan titik

berat berupa LCG 5.31 m, TCG 0.00 m, dan VCG 1.20 m [12].

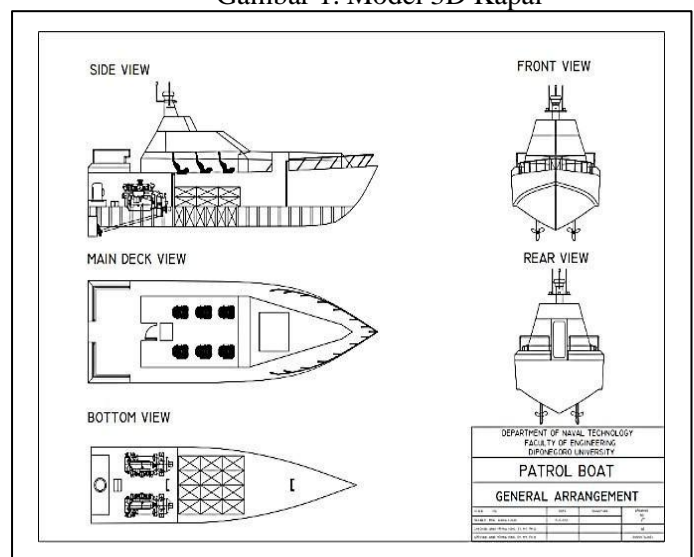
Ukuran utama serta ukuran bangunan atas bisa terlihat pada tabel 1. Model 3D kapal dapat dilihat pada gambar 1. Rencana umum kapal dapat dilihat pada gambar 2. Kurva GZ model kapal dapat dilihat pada gambar 3.

Tabel 1. Ukuran Utama serta Ukuran Bangunan Atas Kapal

No	Nama Kapal	
1	<i>Length Over All</i> (LOA)	13.7 m
2	<i>Length on designes Water Line</i> (LWL)	13 m
3	<i>Breadth Moulded</i> (B)	4.2 m
4	BWL	3.85 m
5	<i>Draught</i> (T)	1.15 m
6	<i>Height</i> (H)	2.19 m
7	<i>Displacement</i>	25.93 ton
8	Panjang Bangunan Atas	10 m
9	Lebar Bangunan Atas	2.93 m



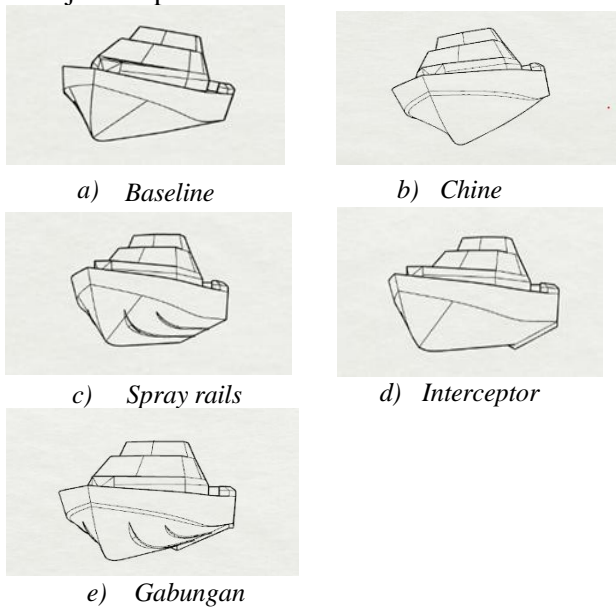
Gambar 1. Model 3D Kapal



Gambar 2. Rencana umum kapal

2.2. Variasi Model Kapal

Dalam penelitian ini dilakukan beberapa variasi model untuk menganalisis pengaruh penambahan komponen hidrodinamik terhadap kemampuan *self-righting* kapal patroli. Variasi model dilakukan dengan memodifikasi geometri lambung kapal dasar melalui penambahan *chine*, *spray rails*, dan *interceptor*. Model pertama merupakan model dasar (*baseline*) tanpa modifikasi yang digunakan sebagai acuan perbandingan. Model selanjutnya merupakan model yang telah dimodifikasi dengan penambahan komponen pada bagian lambung kapal seperti *chine*, *spray rails*, *interceptor* dan gabungan dari ketiganya. Variasi model yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Modifikasi Model Kapal

2.3. Distribusi Muatan

Distribusi muatan untuk kapal gabungan adalah cara untuk mengontrol distribusi massa komponen pada model kapal untuk menunjukkan kondisi tertentu dalam Terdapat beberapa tahapan persiapan atau set-up dalam pengujian Computational Fluid Dynamics (CFD) yang harus berbagai konfigurasi modifikasi lambung, termasuk penambahan *chine*, *spray rails*, dan *interceptor* menghasilkan model kapal dengan hidrodinamik yang berbeda dibandingkan dengan model dasar. Tujuan dari pendekatan ini adalah untuk melihat bagaimana kombinasi perubahan tersebut memengaruhi kinerja kapal, terutama seberapa stabilnya dan seberapa baik kapal tersebut dapat mengoreksi dirinya sendiri menggunakan

simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD).

Perbedaan variasi didapatkan dengan mengubah atau mendistribusi muatan dengan tujuan untuk mendapatkan letak titik berat maksimal untuk memiliki momen *self-righting*. Titik berat yang didapatkan terhitung mulai dari after perpendicular (AP) keel kapal. Titik berat variasi distribusi muatan pada kapal yang sudah dimodifikasi dapat dilihat pada tabel 2[13].

Tabel 2. Titik Berat Kapal Gabungan

No	Loadcase	Titik Berat (m)			Berat (ton)
		LCG	TCG	VCG	
1	I	5.99	0.00	1.12	25.93
2	II	5.69	0.00	1.21	25.93
3	III	5.69	0.00	1.25	25.93
4	IV	5.59	0.00	1.30	25.93
5	V	5.45	0.00	1.28	25.93
6	VI	5.38	0.00	1.31	25.93

2.4. Nilai GM dan Roll Period

Nilai GM digunakan untuk menentukan kondisi stabilitas awal kapal, apakah termasuk stabilitas positif, negatif, atau netral pada sudut kemiringan tertentu. Apabila posisi titik G (center of gravity) berada di bawah titik M (metacenter), maka kapal memiliki stabilitas positif. Sebaliknya, jika titik G berada di atas titik M, kapal dikategorikan memiliki stabilitas negatif. Sementara itu, jika titik G berimpit dengan titik M, maka kondisi stabilitas kapal bersifat netral.

Dengan mempertimbangkan bahwa nilai GM dan radius girasi berpengaruh terhadap karakteristik gerakan roll kapal, khususnya terhadap *rolling period*, maka periode roll dapat dihitung menggunakan persamaan berikut [12].

$$T = \frac{2\pi k}{\sqrt{gGM}} \quad (1)$$

Dimana :

T = *Roll Period*

k = Radius Girasi

g = Gravitasi

GM = Panjang titik G ke M

2.5. Meshing

Terdapat beberapa tahapan persiapan atau set-up dalam pengujian *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dilakukan, mulai dari pembuatan geometri hingga tahap visualisasi hasil. Pada penelitian ini, penulis menggunakan metode set-up yang telah digunakan pada penelitian sebelumnya, namun dengan penerapan skala model 1:1 [2].

Geometri *parts* kapal yang akan disimulasikan dimasukkan ke dalam domain komputasi, kemudian kapal dimiringkan sebesar 170° untuk memicu terjadinya gerakan rolling akibat momen pemulih yang dimiliki kapal. Penelitian ini menerapkan metode *overset meshing*, yaitu teknik pembentukan *mesh* yang membagi geometri menjadi dua bagian, yaitu *background mesh* sebagai donor dan *overset mesh* sebagai *acceptor*.

Pembuatan *overset mesh* dilakukan dengan menggabungkan *parts overset* berbentuk silinder dengan jari-jari 4,8 m terhadap geometri kapal menggunakan operasi *subtract*. Ukuran domain pada *parts background* dapat dilihat pada Tabel 3, sedangkan ukuran domain pada *parts overset mesh* ditampilkan pada Tabel 4.

Tabel 3. Keterangan ukuran domain *background*

Sumbu	Corner 1 (m)	Corner 2 (m)
X	-27.4	47.95
Y	-27.4	27.4
Z	-27.4	13.7

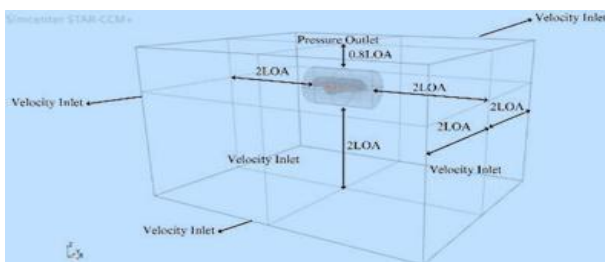
Sumbu	Start (m)	End (m)
X	13.7	0.00
Y	0.00	0.00
Z	0.00	0.00

Tabel 4. Keterangan ukuran domain *overset*

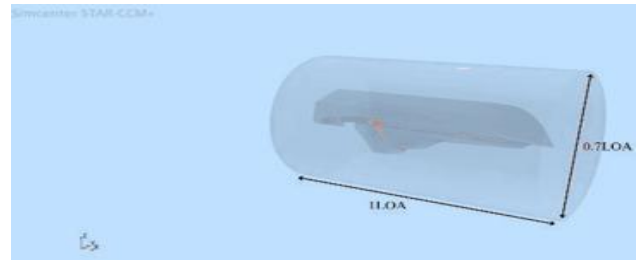
Tahapan selanjutnya setelah pembuatan geometri *background* dan *overset* adalah menentukan tipe *boundary condition* dengan *parts surface* yang berada di dalam region. Pada *parts background*, sisi top menggunakan tipe *boundary pressure outlet*, sedangkan sisi lainnya menggunakan tipe *velocity inlet*.

Sementara itu, pada *parts overset*, bagian *faces* ditetapkan sebagai tipe *wall*, dan pada *overset region* digunakan tipe *overset mesh*. Pengaturan ini bertujuan untuk memungkinkan interaksi antara *overset mesh* dengan *background mesh* selama proses simulasi berlangsung.

Visualisasi ukuran domain serta penerapan *boundary condition* pada *background* ditampilkan pada Gambar 4, sedangkan visualisasi ukuran domain pada *overset mesh* ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 4. *Boundary condition* pada *background*



Gambar 5. Ukuran domain pada *overset*

Tahapan selanjutnya setelah penentuan geometri dan *boundary condition* adalah menentukan nilai *time step*. *Time step* merupakan *interval* waktu antara setiap iterasi yang digunakan dalam proses perhitungan simulasi. Pemilihan nilai *time step* pada penelitian ini mengacu pada rekomendasi dari ITTC. Pada simulasi *roll decay*, ITTC merekomendasikan penggunaan minimal 100 *time step* dalam satu periode gerakan untuk memperoleh hasil yang akurat [14]. Pada penelitian ini digunakan nilai *time step* sebesar 0,0056 s, yang mengacu pada penelitian sebelumnya serta memiliki nilai yang lebih kecil dibandingkan rekomendasi ITTC [2]. Penggunaan *time step* yang lebih kecil umumnya dapat meningkatkan tingkat akurasi hasil simulasi. Selain itu, penelitian ini menerapkan tiga tingkat grid *mesh*, yaitu *coarse*, *medium*, dan *fine*, dengan rasio jarak grid sebesar 2 untuk *mesh*.

2.6. Finite Volume Metode

Finite Volume Method (FVM) merupakan salah satu metode numerik yang paling umum digunakan dalam analisis karakteristik hidrodinamika kapal karena mampu memberikan tingkat akurasi yang baik. Metode ini digunakan untuk mendiskritisasi bentuk integral dari persamaan *Unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes* (URANS) [2]. Persamaan RANS sendiri merepresentasikan prinsip dasar hukum kekekalan massa dan momentum pada aliran fluida.

Proses metode ini dilakukan melalui dua tahapan utama. Pertama, domain komputasi dibagi menjadi sejumlah volume kontrol melalui proses pembentukan *mesh*. Selanjutnya, persamaan diferensial parsial diintegrasikan pada setiap volume kontrol dengan menggunakan teorema divergensi, sehingga menghasilkan sistem persamaan aljabar untuk setiap cell dalam domain [15].

2.7. Fast Fourier Analysis

Fast Fourier Transform (FFT) merupakan algoritma matematis yang digunakan untuk menghitung transformasi Fourier dari suatu sinyal

atau data secara efisien. Transformasi Fourier berfungsi untuk mengubah representasi data dari domain waktu menjadi domain frekuensi, sehingga komponen-komponen frekuensi yang terkandung dalam sinyal dapat dianalisis secara lebih jelas [8]. Dalam penelitian ini, analisis FFT digunakan untuk mengevaluasi hasil simulasi roll decay. Melalui metode ini, data gerakan kapal yang awalnya dinyatakan dalam bentuk fungsi waktu diubah menjadi frekuensi, sehingga frekuensi dominan dari gerakan roll kapal dapat diidentifikasi.

2.8. Grid Convergence Index

Grid convergence index atau GCI adalah metode yang diterapkan pada analisis numerik berbeda. Analisis GCI membandingkan dua atau lebih jenis grid menggunakan rumus berdasarkan rasio perbedaan grid. Adapun rumus terkait metode ini sebagai berikut [16]:

$$\epsilon_{21} = S_2 - S_1 \quad (2)$$

$$\epsilon_{32} = S_3 - S_2 \quad (3)$$

$$R = \frac{\epsilon_{21}}{\epsilon_{32}} \quad (4)$$

$$p = \frac{\ln\left(\frac{\epsilon_{32}}{\epsilon_{21}}\right)}{\ln(r)} \quad (5)$$

$$S_{\text{exact}} = S_1 \frac{S_1 - S_2}{r^p - 1} \quad (6)$$

Dimana :

- S1 = Amplitudo Roll Fine
- S2 = Amplitudo Roll Medium
- S3 = Amplitudo Roll Coarse
- R = Convergence Ratio
- P = Order of Accuracy
- r = Refinement Ratio

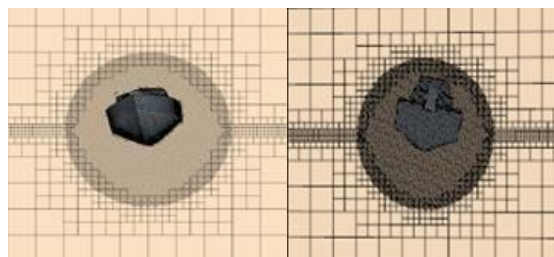
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Verifikasi Mesh

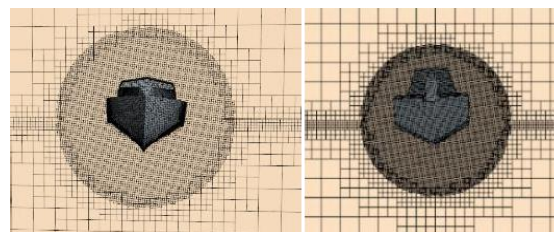
Simulasi ini menggunakan tiga jenis grid yaitu coarse, medium, dan fine. Untuk mencari konvergensi dari meshing ini akan mensimulasikan variasi kapal I pada tiga jenis grid tersebut. Variasi ini dipilih karena memiliki hasil kurva GZ lebih baik dibandingkan variasi yang lain. Jumlah cell pada tiga jenis grid dapat dilihat pada tabel 5. Visualisasi kerapatan mesh dapat dilihat pada gambar 6.

Tabel 5. Perbandingan antar cell

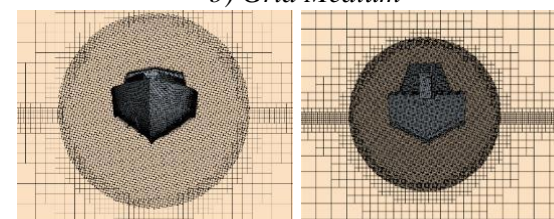
Grid	Jumlah Cell
Coarse	1011096
Medium	2010720
Fine	4021444



a) Grid Coarse



b) Grid Medium



c) Grid Fine

Gambar 6. Perbedaan kerapatan antar mesh

Grid spacing atau refinement yang digunakan pada penelitian ini diperoleh dari perbandingan cell sebesar 2. Setiap variasi grid menghasilkan nilai yang berbeda. Nilai-nilai tersebut kemudian dianalisis untuk mengetahui tingkat konvergensinya dengan menggunakan metode *Grid Convergence Index* (GCI). Jumlah cell berpengaruh terhadap tingkat kerapatan meshing yang dihasilkan. Semakin besar jumlah cell yang digunakan, maka mesh yang terbentuk akan semakin rapat. Sebaliknya, semakin sedikit jumlah cell yang digunakan, maka mesh yang dihasilkan akan semakin kasar. Selain itu, jumlah cell juga berbanding lurus dengan tingkat keakuratan hasil simulasi. Semakin besar jumlah cell yang digunakan, maka hasil simulasi yang diperoleh akan semakin mendekati kondisi yang sebenarnya.

Hasil simulasi yang diperoleh kemudian dibandingkan untuk menentukan besarnya error antar variasi mesh melalui analisis diskretisasi. Analisis ini digunakan untuk memperkirakan tingkat konvergensi solusi numerik serta menentukan nilai pendekatan yang disebut sebagai nilai exact.

3.2. Analisis GCI

Hasil dari GCI akan menunjukkan seberapa besar nilai error atau kesalahan terhadap simulasi yang dibandingkan dengan hasil meshing. Direkomendasikan agar presentase dibawah 5%.

Tujuan dari memastikan grid independence adalah untuk memverifikasi hasil simulasi memiliki Gerakan akurasi yang memadai dan tidak terlalu bergantung terhadap ukuran atau jumlah cell.

Tahap berikutnya perhitungan presentase error. Pada bagian ini dapat dilihat bahwa error yang dihasilkan tidak begitu besar, bahkan pada jenis grid coarse hanya menghasilkan error sebesar 3,38%. Dikarenakan grid medium memiliki presentase error yang kecil serta sudah mendekati nilai exact, pada penelitian ini akan menggunakan grid tersebut untuk mempercepat proses simulasi. Hasil presentase dapat dilihat pada tabel 6 dan tabel 7.

Tabel 6. Presentase nilai error

Keterangan	Presentase
Coarse	3,38 %
Medium	1,19 %
Fine	0,43 %

Tabel 7. Grid convergence index

Keterangan	Coarse	Medium	Fine
Total mesh	1011096	2010720	4021444
Configuration solution roll	2.95°	3.01°	3.03°
Exact Solution		3.05°	
Refinement ratio		2	
Convergence ratio		0.35	
Convergen		Monotonik ($0 < R < 1$)	
Order of accuracy		1.52	
GCI		0.66%	

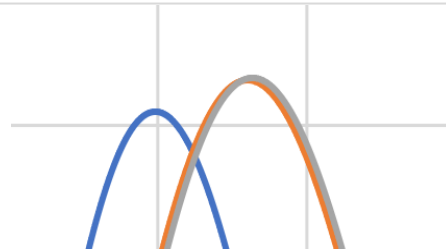
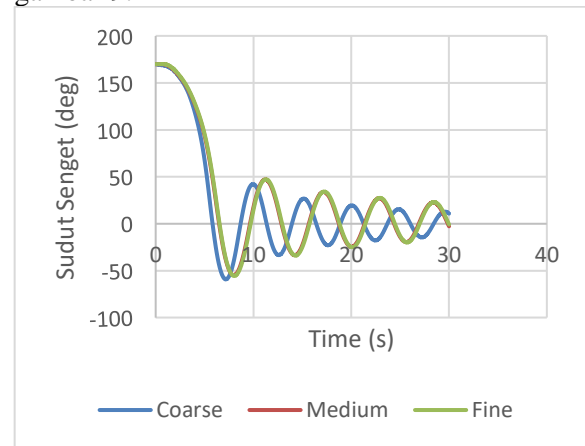
Hasil dari GCI akan menunjukkan seberapa besar nilai error atau kesalahan terhadap simulasi yang dibandingkan dengan hasil meshing. Direkomendasikan agar presentase dari nilai GCI di bawah 5%.

Menurut tabel menunjukkan bahwa analisis ini memiliki nilai GCI dengan hasil rendah yaitu 0.66 %, menandakan error pada simulasi CFD ini kecil. Tipe konvergen monotonik menunjukkan stabilitas yang diinginkan dalam simulasi numerik. Hal tersebut juga menandakan bahwa hasil simulasi mendekati solusi yang benar secara yang terus menerus dan konsisten. Hal ini menunjukkan tidak terjadinya perubahan yang drastis atau fluktuasi yang signifikan terhadap hasil numerik. Perbandingan hasil simulasi pada setiap tingkat kerapatan mesh kemudian divisualisasikan dalam bentuk grafik untuk menunjukkan konvergensi numerik terhadap proses grid refinement.

3.3. Analisa Numerikal Roll Decay Verifikasi

Simulasi CFD (*Computational Fluid Dynamics*) akan dimulai pada kapal dengan sumbu kemiringan 170°. Hal ini diberlakukan untuk menunjukkan bahwa kapal memiliki kemampuan *self-righting* pada saat sudut kemiringan ekstrim. Simulasi ini juga akan memperlihatkan gerakan *rolling* hingga kapal mengalami kestabilan. Model kapal yang digunakan menggunakan skala asli.

Variasi kapal yang digunakan sebagai verifikasi menggunakan tiga jenis *grid* adalah variasi gabungan dengan titik berat I. Hasil yang didapatkan dari analisis terhadap tiga jenis *grid* ini berupa kapal mengalami kestabilan pada detik ke-6 dan terus mengalami gerakan oleng hingga berusaha kembali ke posisi tegak. Persentase grafik *grid coarse* dengan *grid mesh* bernilai 3.38%, persentase grafik *grid medium* 1.19% dan *grid fine* bernilai 0.43%. Grafik analisis perbandingan tiap *mesh* dapat dilihat pada gambar 9.



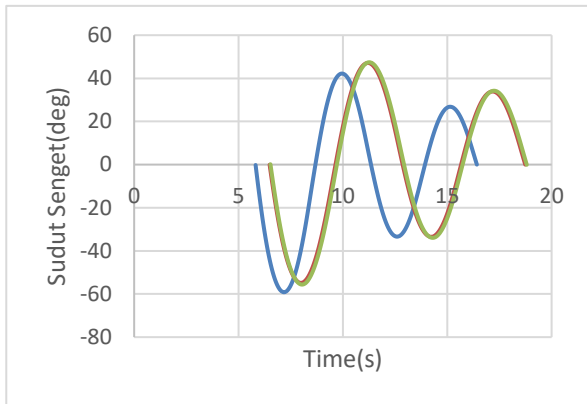
Gambar 7. Perbandingan Grafik Roll Decay antar Mesh

Gambar 7 menunjukkan grafik yang berisi waktu untuk mendapatkan kecepatan *roll period*. Dari domain waktu tersebut akan diubah menjadi domain frekuensi untuk mendapatkan roll amplitude menggunakan bantuan algoritma matematika FFT (Fast Fourier Transform).

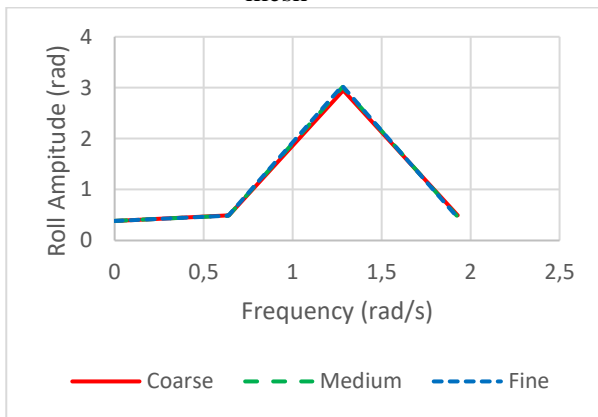
Derajat oleng yang didapatkan melalui analisis ini akan diubah menjadi radian yang selanjutnya akan diterapkan *Fourier Series* untuk mendapatkan *roll amplitude*. Hasil yang didapatkan akan diubah menjadi satuan rad/s.

Algoritma FFT membutuhkan data secara eksponen dari nilai 2. Dikarenakan hal tersebut, data yang digunakan berupa 8 orde dengan 2 kali siklus rolling. Data yang digunakan berupa saat variasi kapal menyentuh sudut kemiringan 0° pada sekitar detik 6 hingga sekitar detik 18. Melalui data yang

diolah menggunakan FFT akan didapatkan puncak amplitudo dan rolling frequency yang selanjutnya akan dianalisis konvergensi. Grafik 2 siklus rolling dapat dilihat di gambar 8. Hasil perhitungan FFT dapat dilihat pada gambar 9 dan table 9.



Gambar 8. Grafik 2 siklus *rolling* terhadap antar mesh



Gambar 9. Grafik *Scatter* FFT Antar Mesh pada Domain Frekuensi

Tabel 8. Hasil perhitungan FFT verifikasi

Keterangan	Grid		
	Coarse	Medium	Fine
Frekuensi <i>Roll</i> (rad/s)	1.30	1.29	1.29
<i>Roll Period</i> (s)	5.55	6.35	6.4
<i>Roll Amplitude</i> (deg)	2.95	3.01	3.03

3.4. Analisa *Roll Decay* Variasi Desain Menggunakan Titik Berat I

3.4.1. *Roll Decay* Baseline

Berdasarkan hasil simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD), kapal tanpa modifikasi tetap menunjukkan kemampuan untuk kembali menuju posisi tegak setelah mengalami kemiringan ekstrem. Namun, respons gerakan roll yang dihasilkan cenderung lebih lambat dibandingkan dengan kapal yang telah mengalami modifikasi. Hal ini disebabkan oleh distribusi tekanan fluida di sekitar lambung kapal yang tidak

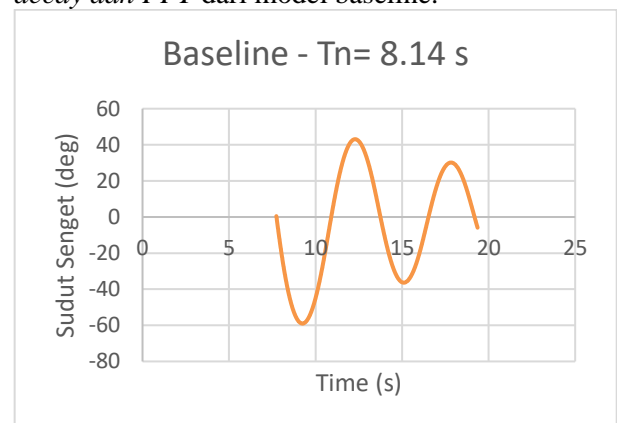
mengalami peningkatan signifikan seperti pada konfigurasi kapal dengan penambahan elemen modifikasi.

Grafik *Baseline* menunjukkan respons roll decay kapal tanpa modifikasi tambahan. Pada awalnya, sudut oleng berada pada nilai besar 170° dan menurun cepat akibat redaman alami. Fase awal ($t = 0-7$ s), dan kapal pertama kali mencapai 0° pada $t = 7.739$ s, menandai awal proses *self-righting*.

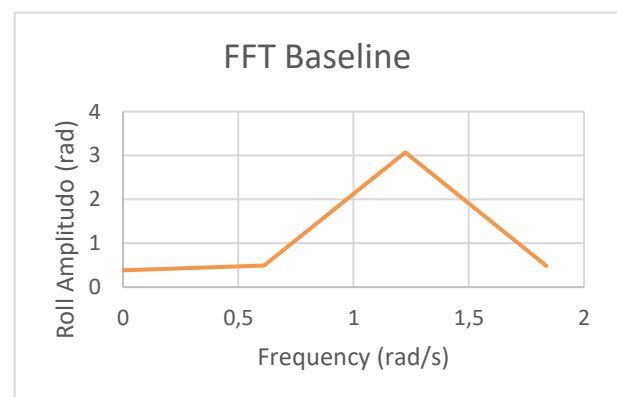
Analisis hingga 8 orde (node) menunjukkan pola osilasi yang semakin teratur, dengan amplitudo menurun dari sekitar $\pm 60^\circ$ menjadi $\pm 30^\circ$. Hal ini mengindikasikan adanya disipasi energi, namun redaman pada baseline relatif lebih lambat dibandingkan variasi dengan modifikasi.

Nilai *roll period* yang didapat adalah $T_n = 8.14$ s Periode akhir ini lebih representatif untuk analisis stabilitas.

Secara keseluruhan, kapal tetap memiliki kemampuan *self-righting*, tetapi dengan efektivitas redaman yang terbatas, sehingga membutuhkan waktu lebih lama untuk mencapai kondisi stabil. Gambar 10 dan gambar 11 merupakan grafik *roll decay* dan *FFT* dari model baseline.



Gambar 10. Grafik *roll decay* baseline



Gambar 11. Grafik *Scatter* FFT model baseline pada domain frekuensi

3.4.2. *Roll Decay* Chine

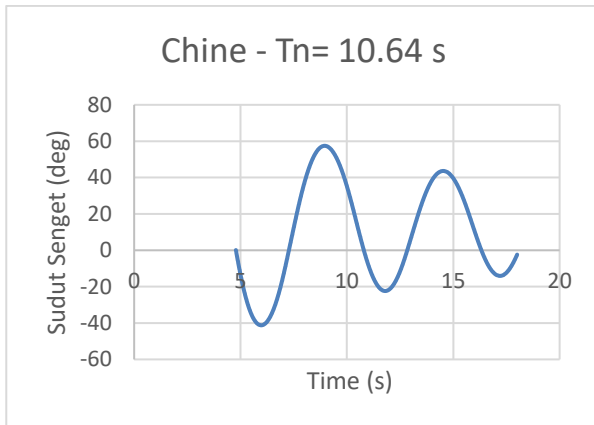
Grafik *Chine* menunjukkan respons roll decay kapal dengan penambahan chine yang meningkatkan *restoring moment*. Pada awalnya, sudut oleng berada pada nilai besar 170° dan menurun cepat, dengan

kapal pertama kali mencapai 0° pada $t = 4.7824$ s, lebih cepat dibanding baseline, yang menandakan peningkatan kemampuan *self-righting*.

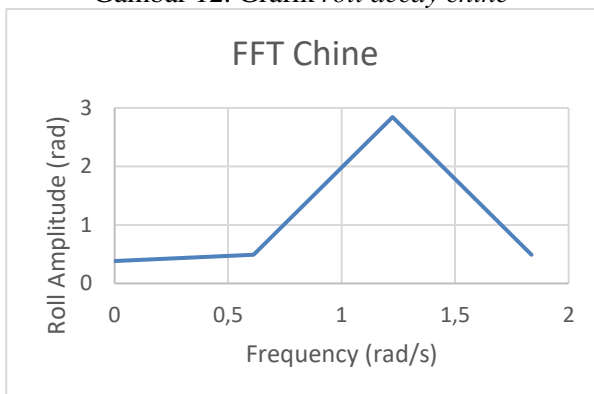
Analisis hingga 8 orde (node) menunjukkan pola osilasi yang semakin stabil, dengan amplitudo menurun dari sekitar $\pm 50-60^\circ$ menjadi $\pm 30-40^\circ$. Hal ini mengindikasikan energi yang cukup efektif, meskipun osilasi masih bertahan dalam beberapa siklus.

Nilai *roll period* yang didapat adalah $T_n = 10.64$ s. Periode akhir yang lebih besar dibanding baseline.

Secara keseluruhan, penambahan *chine* meningkatkan kemampuan *self-righting* dan kestabilan pada sudut besar, namun menghasilkan respons dinamis yang lebih lambat dibandingkan variasi tanpa modifikasi. Gambar 12 dan gambar 13 merupakan grafik *roll decay* dan grafik scatter FFT dari modifikasi *chine*.



Gambar 12. Grafik *roll decay chine*



Gambar 13. Grafik *Scatter FFT model chine* pada domain frekuensi

3.4.3. Roll Decay Spray Rails

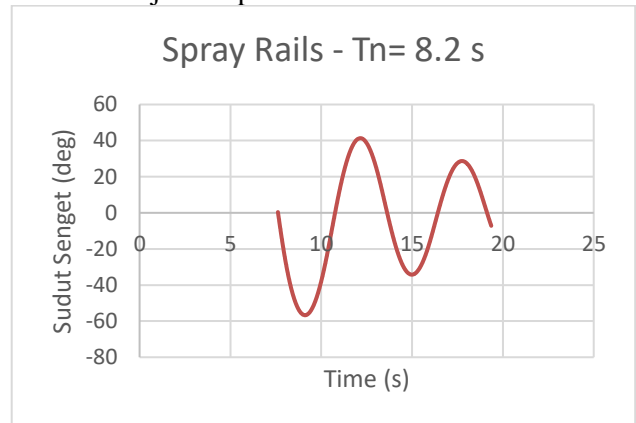
Grafik *Spray Rails* menunjukkan respons *roll decay* kapal dengan penambahan *spray rails* yang meningkatkan redaman melalui *flow separation*. Pada awalnya, sudut oleng besar 170° menurun cepat, dan kapal pertama kali mencapai 0° pada $t = 7.6216$ s, menandai awal *self-righting*.

Analisis hingga 8 orde (node)

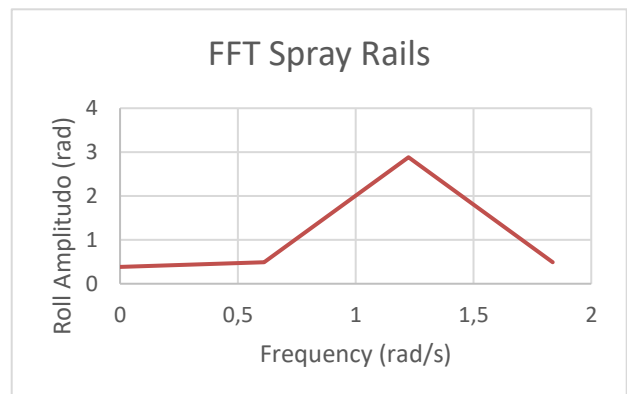
menunjukkan amplitudo menurun dari sekitar $\pm 56^\circ$ menjadi $\pm 27^\circ$, yang menandakan energi lebih cepat dibanding baseline. Pola osilasi juga terlihat lebih teratur seiring waktu.

Nilai *roll period* yang didapat adalah $T_n = 8.2$ s. Nilai akhir sedikit lebih besar dari baseline, menandakan osilasi stabil meskipun lebih lambat.

Secara keseluruhan, *spray rails* efektif meningkatkan *roll damping* dan mempercepat penurunan amplitudo, meskipun tidak secara langsung meningkatkan *restoring moment*. Grafik *roll decay spray rails* dan grafik scatter FFT *spray rails* ditunjukkan pada Gambar 14 dan 15.



Gambar 14. *Roll decay spray rails*



Gambar 15. Grafik *Scatter FFT model spray rails* pada domain frekuensi

3.4.4. Roll Decay Interceptor

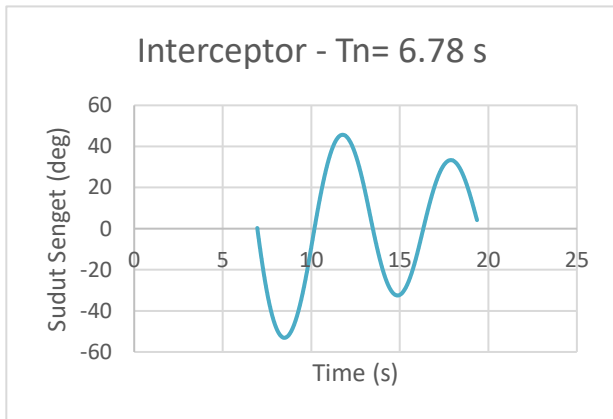
Grafik *Interceptor* menunjukkan respons *roll decay* kapal dengan penambahan *interceptor* yang mempengaruhi distribusi tekanan dan trim. Pada awalnya, sudut oleng besar 170° menurun cepat, dan kapal pertama kali mencapai 0° pada $t = 6.9608$ s, menunjukkan percepatan proses *self-righting* dibanding beberapa variasi lain.

Analisis hingga 8 orde (node) menunjukkan amplitudo menurun dari sekitar $\pm 53^\circ$ menjadi $\pm 33^\circ$, menandakan adanya disipasi energi yang konsisten, meskipun tidak secepat variasi dengan peningkatan damping seperti *spray rails*. Pola osilasi menjadi lebih teratur seiring waktu.

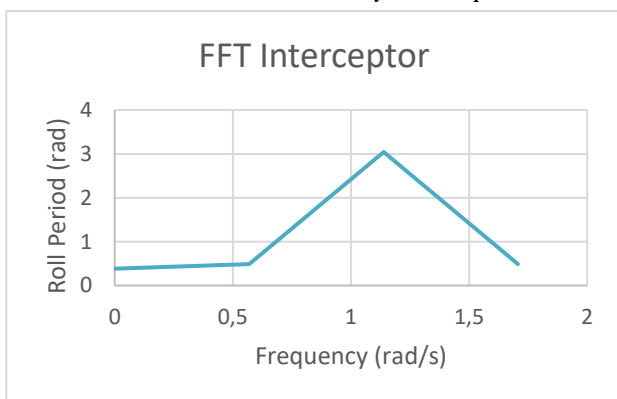
Nilai *roll period* yang didapat senilai $T_n = 8.78$ s. Periode awal yang sedikit lebih besar

mengindikasikan pengaruh trim terhadap dinamika awal.

Secara keseluruhan, *interceptor* tidak dominan dalam meningkatkan *roll damping*, namun efektif dalam mempercepat respons awal *self-righting*, sehingga berperan sebagai elemen pendukung dalam meningkatkan performa stabilitas dinamis kapal. Grafik *grafik roll decay* dan grafik *scatter interceptor* ditunjukkan pada Gambar 16 dan 17.



Gambar 16. Roll decay interceptor



Gambar 17. Grafik Scatter FFT model *interceptor* pada domain frekuensi

3.4.5. Roll Decay Gabungan

Modifikasi gabungan yang mencakup penambahan *chine*, *spray rails*, dan *interceptor* pada badan kapal dilakukan untuk memahami dampak gabungan ketiga modifikasi tersebut terhadap kemampuan kapal untuk kembali ke posisi awal. Setiap komponen modifikasi memiliki karakteristik hidrodinamika yang unik, sehingga kombinasi ketiganya diharapkan dapat meningkatkan stabilitas kapal dengan lebih baik dibandingkan jika modifikasi dilakukan secara terpisah.

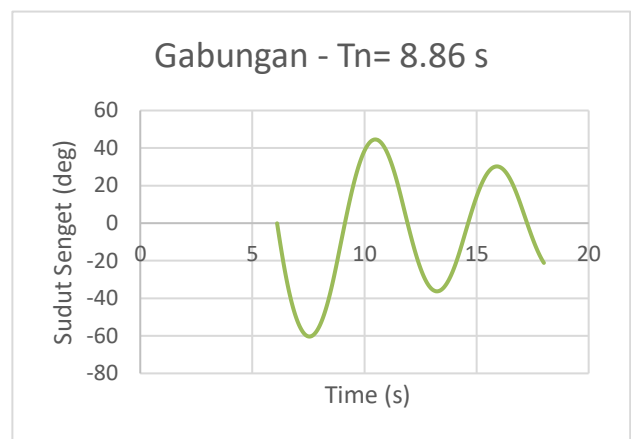
Grafik Gabungan menunjukkan respons roll decay kapal dengan kombinasi *chine*, *spray rails*, dan *interceptor* yang bekerja secara simultan. Pada awalnya, sudut oleng besar 170° menurun sangat cepat, dan kapal pertama kali mencapai 0° pada $t = 6.104$ s, menjadi yang tercepat di antara semua variasi.

Analisis hingga 8 orde (node) menunjukkan

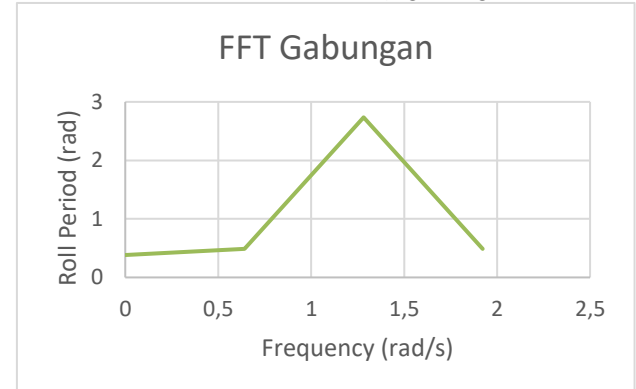
amplitudo menurun dari sekitar $\pm 60^\circ$ menjadi $\pm 30^\circ$, dengan pola osilasi yang cepat menjadi teratur. Hal ini menandakan disipasi energi paling efektif dibandingkan variasi lain.

Nilai roll period yang didapat dari perhitungan sebesar $T_n = 8.86$ s yang merupakan nilai kecil di antara semua variasi. Ini menunjukkan bahwa kapal memiliki respons dinamis paling cepat baik.

Secara keseluruhan, konfigurasi gabungan memberikan performa terbaik dalam *self-righting* dan *roll damping*, karena mampu mempercepat pencapaian posisi tegak sekaligus meredam osilasi secara lebih efisien dan stabil. Grafik *roll decay* ditunjukkan pada Gambar 14.



Gambar 18. Roll decay gabungan



Gambar 19. Grafik Scatter FFT model gabungan pada domain frekuensi

Tabel 9. Hasil perhitungan FFT variasi

Variasi	Roll Amplitude (rad)	Frekuensi (rad/s)
Baseline	3.07	1.20
Chine	2.84	1.42
Spray Rails	2.88	1.22
Interceptor	3.04	1.13
Gabungan	2.74	1.28

3.5. Perbandingan Kinerja Self-Righting dan Roll Period

Evaluasi kinerja *self-righting* kapal dilakukan dengan membandingkan dua parameter utama, yaitu waktu mencapai posisi tegak pertama (0°) dan roll period

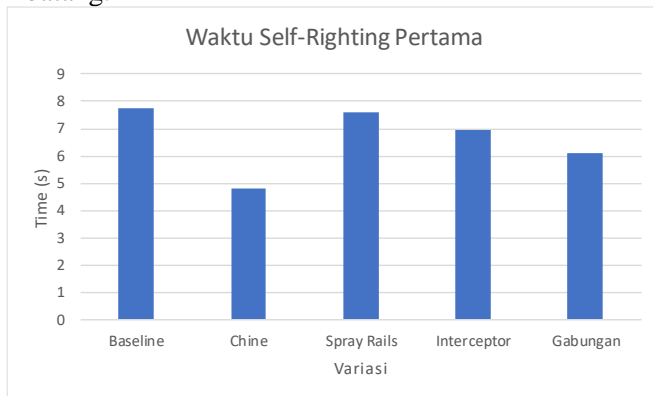
pada kondisi awal dan akhir. Parameter waktu ke 0° pertama merepresentasikan kecepatan kapal dalam kembali ke posisi tegak setelah mengalami kondisi ekstrem, sedangkan roll period menggambarkan karakteristik osilasi dan kestabilan dinamis kapal.

Berdasarkan hasil simulasi, diperoleh data perbandingan seperti ditunjukkan pada Tabel 9.

Tabel 9. Perbandingan *self-righting* dan *roll period*

Variasi	t (0°) pertama(s)	Tn (s)
Baseline	7.74 s	8.14 s
Chine	4.78 s	10.64 s
Spray Rails	7.62 s	8.20 s
Interceptor	6.96 s	8.78 s
Gabungan	6.10 s	8.86 s

Untuk memperjelas perbandingan, hasil tersebut juga disajikan dalam bentuk diagram batang.

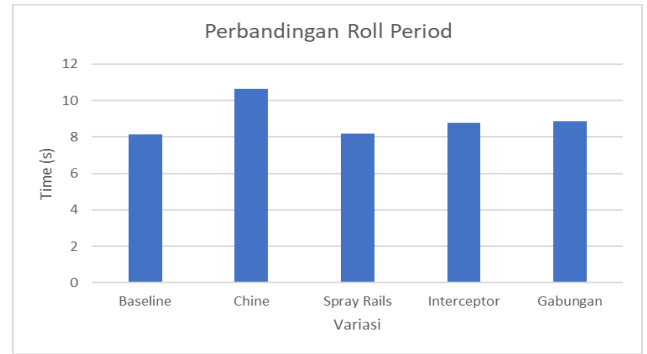


Gambar 20. Diagram batang *self-righting* pertama

Dari grafik terlihat bahwa variasi chine memiliki waktu tercepat dalam mencapai posisi tegak (4.7824 s), diikuti oleh konfigurasi gabungan (6.104 s), sedangkan baseline memiliki waktu paling lama (7.739 s). Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan *restoring moment* sangat berpengaruh pada fase awal *self-righting*.

Hasil ini menunjukkan adanya *trade-off* antara kecepatan *self-righting* dan karakteristik osilasi. Peningkatan *restoring moment* cenderung mempercepat pencapaian posisi tegak, sedangkan peningkatan *damping* berkontribusi terhadap kestabilan dan penurunan amplitudo osilasi.

Secara keseluruhan, modifikasi gabungan tetap menunjukkan performa yang baik karena mampu memberikan keseimbangan antara kecepatan *self-righting* dan kestabilan dinamis, meskipun tidak lagi menjadi yang paling unggul dalam hal roll period akhir.



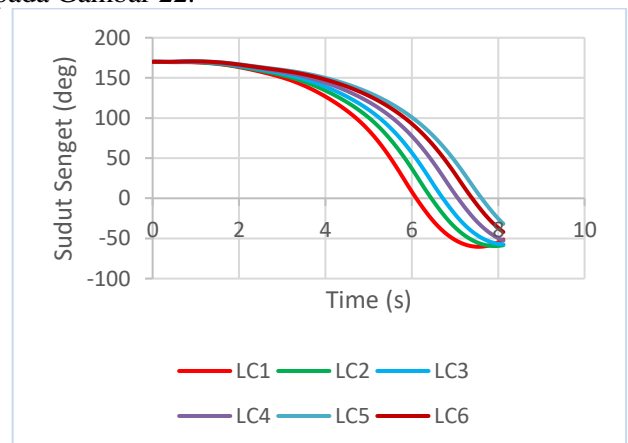
Gambar 21. Diagram perbandingan roll period

Gambar tersebut menunjukkan bahwa seluruh variasi mengalami peningkatan *roll period* dari kondisi awal ke akhir. Variasi gabungan tidak lagi menjadi yang paling kecil pada kondisi akhir, melainkan berada pada nilai menengah (8.86 s), mendekati *interceptor*. Sementara itu, nilai terkecil tetap ditunjukkan oleh baseline dan spray rails, sedangkan chine tetap yang terbesar. Selain itu, perbandingan waktu *self-righting* pertama ditunjukkan pada Gambar 20.

3.6. Analisa Numerical Roll Decay Gabungan dengan 6 Titik Berat

Grid medium digunakan untuk melakukan simulasi pada kapal dengan konfigurasi modifikasi gabungan yang kemudian diuji dengan beberapa variasi titik berat (*center of gravity*). Simulasi ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh perubahan distribusi muatan terhadap karakteristik gerakan roll dan kemampuan *self-righting* kapal. Dengan mengikuti tahapan yang sama seperti pada proses analisis verifikasi grid sebelumnya, hasil simulasi yang diperoleh berupa grafik gerakan rolling yang dimulai dari sudut kemiringan awal sebesar 170°.

Perbandingan grafik roll decay untuk setiap variasi titik berat pada kapal gabungan dapat dilihat pada Gambar 22.



Gambar 22 Grafik perbandingan antar titik berat

Berdasarkan grafik *roll decay* yang sudah dianalisis terhadap variasi distribusi muatan, dapat dilihat bahwa sesuai dengan hasil analisis kurva GZ. Variasi I, II, III, IV, V, dan VI memiliki momen *self-righting*. Dari grafik tersebut juga, dapat dilihat perbedaan kerapatan gelombang antar variasi.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi CFD terhadap variasi kapal yang meliputi baseline, penambahan *chine, spray rails, interceptor*, modifikasi gabungan, serta variasi distribusi titik berat, dapat disimpulkan bahwa modifikasi pada lambung kapal memberikan pengaruh terhadap kemampuan *self-righting* dan karakteristik gerakan roll kapal. Kapal *baseline* masih mampu mengalami proses *self-righting*, namun waktu yang dibutuhkan untuk kembali ke posisi tegak relatif lebih lama dibandingkan dengan kapal yang telah dimodifikasi. Penambahan *chine, spray rails*, dan *interceptor* memberikan peningkatan *self-righting*.

Selain itu, variasi distribusi titik berat kapal terbukti memiliki pengaruh yang signifikan terhadap stabilitas kapal. Penempatan titik berat yang lebih rendah dan mendekati midship mampu meningkatkan kestabilan kapal serta memperbesar panjang maksimum kurva GZ, sehingga kapal dapat kembali ke posisi tegak meskipun berada pada sudut kemiringan ekstrem sebesar 170°. Variasi dengan posisi LCG 5.59 m dan VCG 1.30 m menunjukkan kemampuan *self-righting* yang paling optimal. Secara keseluruhan, modifikasi lambung kapal serta penempatan titik berat yang tepat dapat meningkatkan kemampuan *self-righting* kapal dan mendukung konsep kapal *anti-capsized*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] G. H. Priowirjanto, "Mengenal Jenis-Jenis Kapal. Direktorat Jenderal Pendidikan Dasar dan Menengah, Departemen Pendidikan Nasional.," 2003.
- [2] A. Trimulyono, M. A. Fuadi, A. F. Zakki, O. Mursid, and M. Iqbal, "Design of Anti-Capsized Ship for Patrol Vessel with the Self-Righting Moment," *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 11, no. 1, Jan. 2023, doi: 10.3390/jmse11010133.
- [3] F. De Luca and C. Pensa, "The Naples Warped Hard Chine Hulls Systematic Series," *Ocean Eng.*, vol. 139, no. March, pp. 205–236, 2017, doi: 10.1016/j.oceaneng.2017.04.038.
- [4] M. Biddison, "Chine System For a Boat Hull," 2003
- [5] M. Satrio Elang Prakoso, T. Perkapalan, F. Teknik, U. Diponegoro, and J. Soedarto Tembalang Semarang, "Analisa Hambatan Total Karena Perubahan Bentuk Chine pada Kapal Patroli.," 2022, doi: 10.24853/jurtek.14.1.47-54.
- [6] S. Nasional and T. Riset, "Perancangan Kapal Interceptor Sergap Berbahan HDPE," vol. 9, no. 1, pp. 965–975, 2023.
- [7] T. Sahk, H. Andreasson, and K. Tabri, "The Effect of Spray Rails , Chine Strips and V-Shaped Spray Interceptors on The Performance of Low Planing High-Speed Craft in Calm Water Miklo ˇ s Lakato ˇ," vol. 122, no. March, 2022, doi: 10.1016/j.apor.2022.103131.
- [8] H. J. Nussbaumer and H. J., "The fast Fourier transform. Springer," *Ocean Eng.*, 1982, doi:10.1016/j.oceaneng.2022.111733
- [9] C. Ş. Hakan Akyıldız, "Self-Righting Boat Design," pp. 41–54, 2016.
- [10] A. T. Ocid Mursid, "Analysis of Deck House Height and Center of Gravity in Anti-Capsized Patrol Boat," *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 7, no. 12, 2019, doi: 10.3390/JMSE7120468.
- [11] H. Hasanudin dan Putra, "Desain Self- Righting Rescue Boat untuk BASARNAS," *Desain Self- Righting Rescue Boat untuk BASARNAS*, p. 16, 2019, doi: DOI: 10.5957/JSPD.11170053.
- [12] B.B. and C. R. Derret, "Ship Stability for Master and Mates," *Appl. Ocean Res.*, 2006, doi:10.1016/j.apor.2016.
- [13] J. Hasil Karya Ilmiah, M. Zianza, and A. Trimulyono, "Pengaruh Distribusi Muatan Pada Kapal Patroli Anti- Capsized Terhadap Roll Decay Menggunakan Metode Computational Fluid Dynamics," 2024.
- [14] ITTC, "Practical Guidelines for Ship CFD Applications," *ITTC – Recomm. Proced. Guidel. ITTC*, pp. 1–8, 2011.
- [15] O. Mursid, S. Yulianti, and M. Iqbal, "Evaluation of Interceptor Design to Reduce Drag on Hull," vol. 73, no. 3, pp. 93–110, 2022.
- [16] I. B. Celik, U. Ghia, P. J. Roache, C. J. Freitas, H. Coleman, and P. E. Raad, "Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications," *J. Fluids Eng. Trans. ASME*, vol. 130, no. 7, pp. 0780011–0780014, Jul. 2008, doi:10.1115/1.2960953.
- [17] J. Liu and G. Hou, "Numerical Computation of Restoring Time and Prediction of Self-Righting Process," 202