

# Analisis Pengaruh Jumlah *Bilge Keel* terhadap Gerakan *Rolling* pada Kapal Patroli 14 m

Ari Widyatmoko<sup>1</sup>, Samuel<sup>\*1</sup>, Parlindungan Manik<sup>1</sup>, Andi Trimulyono<sup>1</sup>

Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro<sup>1</sup>  
Jl. Prof. Soedarto SH, Semarang 50275, Indonesia  
E-mail: samuel@ft.undip.ac.id\*

Diterima: 11 Desember 2020, disetujui: 27 Mei 2021, diterbitkan *online*: 30 Juni 2021

## Abstrak

Kapal Patroli merupakan kapal yang memiliki ukuran yang relatif kecil, namun memiliki kecepatan yang cukup tinggi. Bentuk kapal yang kecil akan berpengaruh terhadap gerakan *rolling* kapal, sehingga menarik untuk dibahas secara mendalam pengaruh pemasangan *bilge keel* terhadap gerakan kapal. Penelitian ini akan menganalisis pengaruh *bilge keel* yang ditambah jumlahnya menjadi 2 pasang dan 3 pasang terhadap efek gerakan *rolling* kapal agar dapat memperbaiki performa kapal menjadi lebih baik. Model kapal patroli yang telah didesain akan dianalisis menggunakan metode *Boundary Element Method* (BEM) yang terintegrasi untuk mendapatkan nilai *rolling* pada setiap model yang dianalisis. Pada penelitian ini, didapatkan kesimpulan bahwa penambahan jumlah *bilge keel* akan menambah RMS *rolling* sebesar 11-50% pada kecepatan rendah, namun dapat mengurangi RMS *rolling* sebesar 7-28% pada kecepatan tinggi.

**Kata kunci:** *Bilge Keel*, Kapal Patroli, Olah Gerak Kapal, *Rolling*.

## Abstract

**A Study on the Effects of Bilge Keel Number on 14 m Patrol Boat's Rolling Motion:** *Patrol boats can move at such high speed despite their relatively small size. This relatively small size will affect its rolling motions, hence the effect of bilge keel installation on ship motions is an interesting topic to discuss. In this study, the effect of adding bilge keel pair to 2 and 3 pairs of bilge keel on ship's rolling motions was studied so that the ship's performance becomes more optimal. The patrol boat model that had been designed was studied using integrated Boundary Element Method (BEM) to obtain each model's rolling value. This study concluded that the addition of installed bilge keel pairs increased RMS rolling by 11-50% on low speed, but it reduced 7-28% RMS rolling at high speed.*

**Keywords:** *Bilge Keel, Patrol boats, Ship motions, Rolling.*

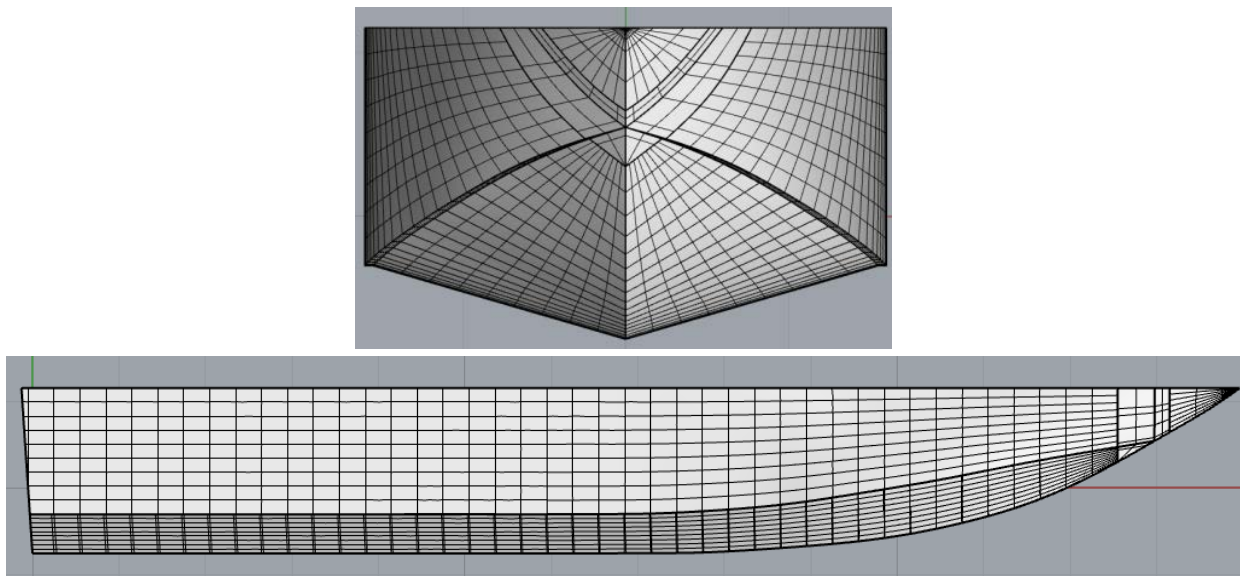
## 1. Pendahuluan

Kapal patroli adalah kapal yang memiliki ukuran yang relatif kecil, namun memiliki kecepatan yang cukup tinggi dan berfungsi untuk menjaga keamanan suatu negara, khususnya di daerah perairan [1]. Oleh karena itu, Indonesia tentu membutuhkan kapal patroli yang berfungsi secara optimal untuk menjaga wilayah perairannya.

Gerakan *rolling* merupakan gerakan kapal dari segi rotasi terhadap sumbu aksis. Ketika terjadi *rolling*, maka sisi kanan kapal akan bergerak ke sisi kiri kapal secara longitudinal dan terulang secara bergantian [2]. Stabilitas kapal ketika sedang beroperasi di laut sangat bergantung pada gerakan *rolling* yang dialami oleh kapal. Dengan kata lain, pendekatan pada ketahanan kapal ketika beroperasi di laut sangat bergantung kepada analisis gerakan *rolling* [3]. Analisis terhadap gerakan pada kapal, khususnya gerakan *rolling*, sangat penting untuk dilakukan karena jika kapal mengalami gerakan *rolling* secara terus-menerus, maka akan menimbulkan ketidakstabilan pada kapal dan berisiko membuat kapal menjadi terbalik [4].

*Bilge keel* mampu mengurangi gerakan *rolling* yang dihasilkan oleh kapal dengan memperbesar koefisien damping kapal. Koefisien damping (koefisien redaman) adalah parameter yang penting dalam meredam gerakan *rolling* kapal. *Roll damping* yang dihasilkan oleh *bilge keel* lebih besar dari *anti-roll device* lain dan mempunyai keuntungan karena instalasinya yang mudah dan bersifat pasif sehingga banyak digunakan pada kapal secara umum [5]. Penelitian mengenai *bilge keel* masih banyak dilakukan karena sejauh ini belum ada pendekatan numerik yang mampu memprediksi secara akurat nilai *roll damping* yang dihasilkan oleh *bilge keel*, sehingga penelitian tentang efek yang dihasilkan oleh *bilge keel* sangat menarik untuk dilakukan [6]. Penelitian tentang gerakan *heave* dan *trim* pada kapal cepat dilakukan untuk melihat gerakan kapal yang dinamis. Penelitian tersebut menghasilkan hambatan total kapal yang dipengaruhi oleh gerakan pada kapal cepat [7][8].

*Bilge keel* yang berfungsi sebagai alat penambah stabilitas pada kapal dan untuk mengurangi gerakan *rolling* mampu mengurangi gerakan *rolling* pada kapal sebesar 27% ketika kapal melaju pada Fr 1,185



Sumber: [9]

Gambar 1. Desain Geometri 3-D Kapal Patroli

[9]. Pada penelitian sebelumnya, didapatkan kesimpulan bahwa penambahan *bilge keel* berbentuk *flat bar* tidak efektif untuk mengurangi efek gerakan *rolling* [10], sedangkan *bilge keel* berbentuk *bulb* dapat mengurangi RMS *rolling* kapal sebesar 2,12% [11]. RMS adalah gerakan osilasi kapal terhadap gelombang datang. Penelitian lainnya juga menyebutkan bahwa ukuran *bilge keel* dengan lebar 30 cm, tebal 6 mm, dan sudut 45° merupakan ukuran *bilge keel* yang paling efektif [12][13][14].

Berdasarkan permasalahan tersebut, maka tujuan dari penelitian ini ialah untuk mengetahui perbandingan nilai RMS *rolling* kapal patroli yang tidak menggunakan *bilge keel* maupun menggunakan sepasang *bilge keel* dengan nilai RMS *rolling* kapal patroli yang sudah ditambah jumlah *bilge keel* menjadi 2 pasang dan 3 pasang. Dengan demikian, akan didapatkan kesimpulan apakah penambahan jumlah *bilge keel* mampu mengurangi nilai RMS *rolling* kapal atau justru menambah nilai RMS *rolling* tersebut.

## 2. Metodologi

Metode yang digunakan dalam penelitian ini meliputi metode pengumpulan data, kemudian pengolahan data, dan analisis data. Pengumpulan data dilakukan dengan mencari ukuran utama, kecepatan kapal, dan ukuran *bilge keel* kapal patroli yang akan dianalisis. Kemudian, data yang telah didapatkan akan diolah kembali menggunakan bantuan *software* perkapalan yang telah terintegrasi untuk mendapatkan model kapal patroli dan model *bilge keel*. Data yang telah diolah kemudian akan dianalisis menggunakan formula-formula dalam bentuk persamaan dan menggunakan *software* perkapalan yang telah terintegrasi. Hasil analisis diharapkan dapat mengidentifikasi apakah penambahan jumlah pasang *bilge keel* menjadi 2

pasang dan 3 pasang berpengaruh terhadap nilai RMS *rolling* pada kapal patroli yang akan dianalisis.

### 2.1. Metode Pengumpulan Data

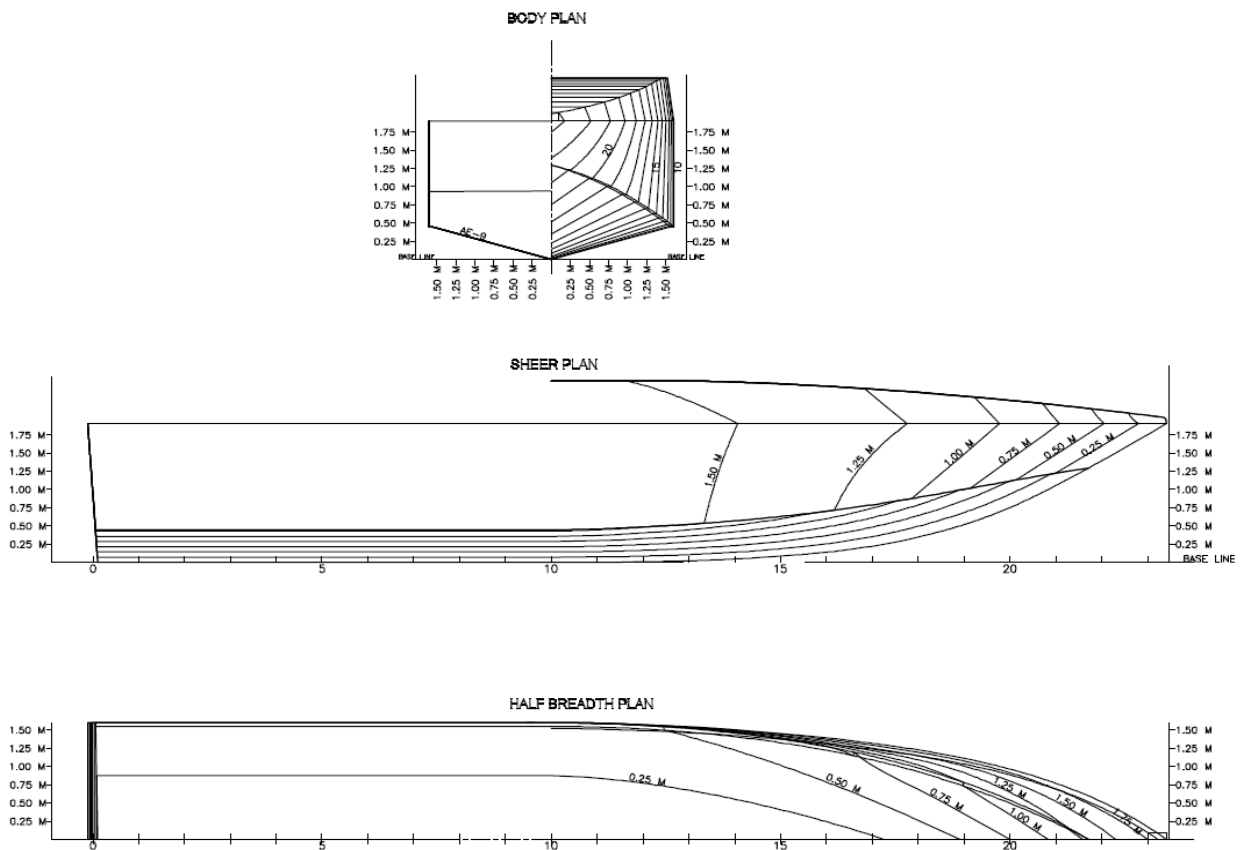
Penelitian ini menggunakan data pada pengujian eksperimen yang dilakukan oleh Agus Saputra pada tahun 2019 [9]. Penelitian tersebut menggunakan desain kapal patroli dari PT Samudra Jasa Utama Indonesia. Kapal patroli ini memiliki desain lambung berbentuk V seperti Gambar 1.

Gambar 1 menunjukkan bentuk geometri 2-D kapal yang diproyeksikan dari depan dan samping. Selanjutnya, Gambar 2 menunjukkan gambar *modelling* kapal patroli yang akan dianalisis pada penelitian ini. *Modelling* dilakukan dengan menggunakan bantuan *software* perkapalan yang telah terintegrasi. Tahapan pemodelan dilakukan dengan mendefinisikan garis, *surface*, dan volume. Ukuran utama kapal patroli dapat dilihat pada Tabel 1 untuk mendefinisikan bentuk dan volume kapal pada Gambar 1.

Tabel 1. Ukuran utama kapal patroli

Dimensi (unit)	Ukuran
LOA (m)	14,10
LWL (m)	12,00
B (m)	3,20
H (m)	1,90
T (m)	0,75 m
Cb	0,5515
Vdinas (kn)	25
Vdinas (m/s)	12,86
$\Delta$ (Kg)	15,8835
Volume Displacement (ton)	16,2806

Sumber : [9]



Sumber: [9]

Gambar 2. Geometri 2-D Kapal Patroli

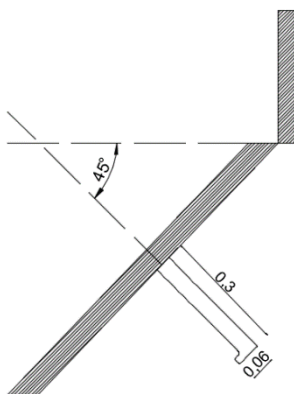
2.2. Parameter Penelitian

Penelitian ini menggunakan dua parameter. Pertama, parameter tetap sebagai acuan data yang digunakan, seperti data ukuran utama kapal patroli, sudut gelombang yaitu 90° (*beam wave*), lebar *bilge keel* yaitu 30 cm, tebal *bilge keel* yaitu 6 mm, sudut *bilge keel* yaitu 45°, dan geometri *bilge keel* yang digunakan yaitu berbentuk *bulb*. Kedua, parameter tidak tetap sebagai variasi model yang akan dianalisis, seperti variasi panjang *bilge keel* yang digunakan yaitu 4 m, 6 m, dan 8 m, variasi jumlah *bilge keel* yaitu 1 pasang, 2 pasang, dan 3 pasang,

karakteristik gelombang berupa tinggi gelombang yaitu 0,875 m, 1,875 m, dan 3,25 m, dan periode rata-rata yang digunakan yaitu 7,5 s, 8,8 s, dan 9,7 s.

2.3. Pembuatan *Bilge Keel*

Model *bilge keel* berdasarkan ukuran yang telah ditetapkan yaitu dengan lebar 30 cm dan tebal 6 mm. Panjang *bilge keel* berkisar antara 25-50% dari panjang kapal dan dipasang di bagian tengah kapal, tidak terlalu ke depan maupun ke belakang [15]. Tabel 2 menunjukkan konfigurasi *bilge keel* pada penelitian ini.



Sumber: Hasil Analisis, 2020  
Gambar 3. Desain *Bilge Keel*

Tabel 2. Variasi Jumlah dan Panjang *Bilge Keel*

Jumlah <i>Bilge Keel</i>	Panjang <i>Bilge Keel</i>
1 Pasang (Model 1)	4 meter
2 Pasang (Model 2)	4 meter
3 Pasang (Model 3)	4 meter
1 Pasang (Model 4)	6 meter
2 Pasang (Model 5)	6 meter
3 Pasang (Model 6)	6 meter
1 Pasang (Model 7)	8 meter
2 Pasang (Model 8)	8 meter
3 Pasang (Model 9)	8 meter

Sumber : Hasil Analisis, 2020  
Keterangan : Tanpa *Bilge Keel*

Gambar 4 sampai dengan 7 adalah beberapa gambar model variasi *bilge keel* setelah didesain dan dipasang pada model kapal patroli menggunakan bantuan *software*.

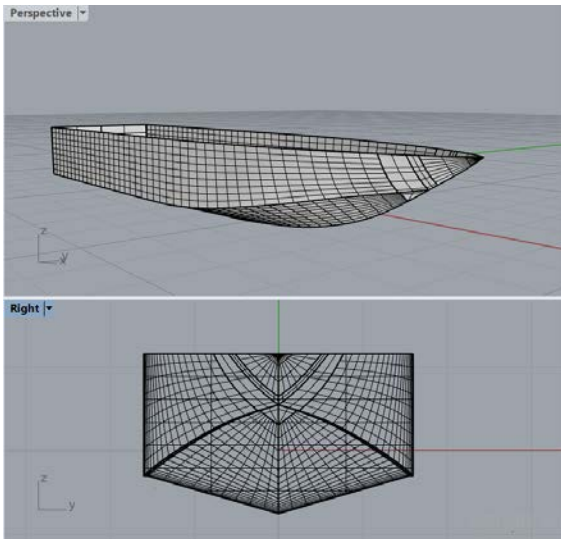
Hipotesis awal peneliti dalam penelitian ini ialah *bilge keel* yang ditambah jumlahnya menjadi 2 pasang dan 3 pasang seperti yang telah didesain pada gambar di atas diharapkan dapat mengurangi efek *rolling* kapal patroli ini, mengacu kepada penelitian sebelumnya yang menyimpulkan bahwa penambahan *bilge keel* sebanyak satu pasang saja yang sudah efektif untuk mengurangi efek *rolling*.

2.4. *Response Amplitude Operator* (RAO)

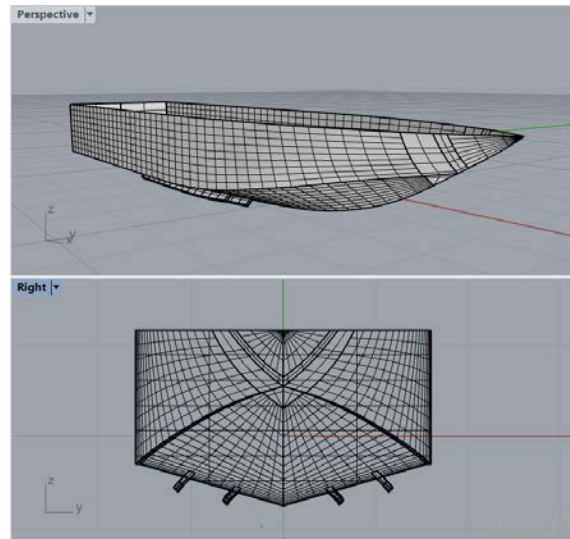
Respons gerakan kapal terhadap gelombang reguler dinyatakan dalam *Response Amplitude Operator* (RAO), dimana pengertian RAO sendiri adalah rasio antara amplitudo gerakan kapal baik itu translasi maupun rotasi terhadap amplitudo gelombang pada frekuensi tertentu [16]. Dalam

penelitian ini, metode untuk menghitung nilai RAO kapal patroli menggunakan bantuan *software* CFD ANSYS AQWA yang menggunakan metode *Boundary Element Method* (BEM). Ansys AQWA digunakan untuk menghitung koefisien linear hidrodinamis seperti *added mass, radiation damping*, dan gaya eksitasi gelombang menggunakan teori 3 *dimensional radiation/diffraction theory* dengan mendefinisikan *geometry, mesh, setup, dan solution* [17].

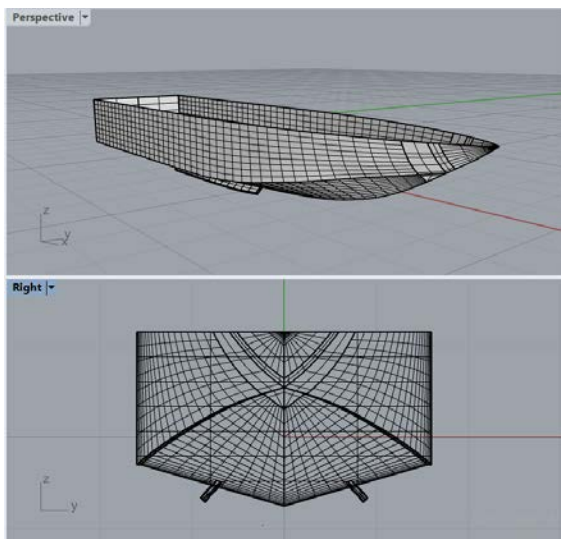
Pada keadaan sesungguhnya, gelombang yang terbentuk di laut adalah gelombang acak sehingga respons kapal terhadap gelombang reguler yang dinyatakan dalam RAO tidak dapat menggambarkan respons kapal dalam keadaan sesungguhnya. Oleh karena itu, untuk mendapatkan respons gerakan kapal terhadap gelombang acak pada saat keadaan sesungguhnya di laut dapat digambarkan menggunakan spektrum respons. Spektrum respons



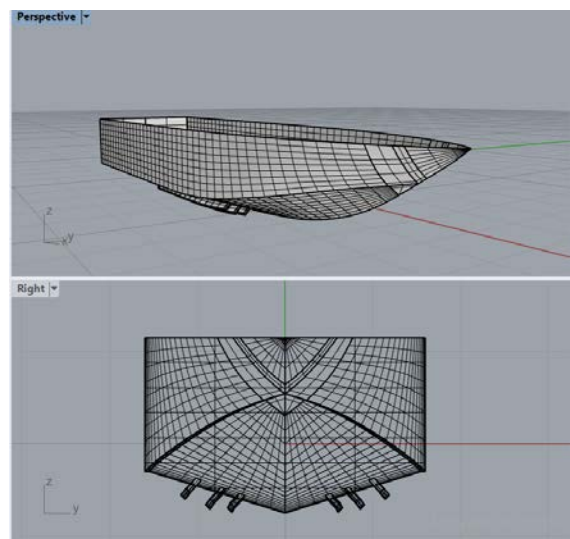
Sumber: [9]  
**Gambar 4.** Kapal Patroli Tanpa *Bilge Keel*



Sumber: Hasil Analisis, 2020  
**Gambar 6.** Kapal Patroli dengan *Bilge Keel* 2 Pasang



Sumber: Hasil Analisis, 2020  
**Gambar 5.** Kapal Patroli dengan *Bilge Keel* 1 Pasang



Sumber: Hasil Analisis, 2020  
**Gambar 7.** Kapal Patroli dengan *Bilge Keel* 3 Pasang

didapatkan dengan mengalikan  $RAO^2$  dengan Spektrum Gelombang ( $S_{\zeta}$ ) seperti pada (1).

$$S_{\zeta r}(\omega) = RAO^2 \times S_{\zeta}(\omega) \quad (1)$$

2.5. Boundary Element Method (BEM)

Pada CFD, terdapat beberapa metode pendekatan numerik untuk menyelesaikan permasalahan aliran fluida, salah satu di antaranya adalah metode BEM. BEM merupakan metode numerik untuk menyelesaikan permasalahan nilai pada kondisi batas (*boundary value problems*) dengan menggunakan formulasi *Boundary Integral Equations* (BIEs). Dalam metode BEM, diskritisasi dilakukan pada *boundary*-nya saja di mana untuk analisis 3D diskritisasi dilakukan pada *surface boundary*, sedangkan pada analisis 2D, diskritisasi dilakukan pada garis kurva *boundary*.

Langkah pertama dari diskritisasi adalah mendefinisikan bagian kapal yang tercelup air dan bagian kapal yang tidak tercelup air (*free surface*) lalu membagi domain komputasi menjadi jumlah yang terbatas atau biasa disebut *meshing* pada *surface boundary* bagian bawah kapal. Langkah selanjutnya adalah mendefinisikan kecepatan kapal dan sudut arah datang gelombang dan kemudian mendefinisikan hasil gerakan yang dihasilkan oleh badan kapal yaitu rotasi pada sumbu X atau dapat disebut gerakan *rolling* [18]. Keunggulan dari pendekatan menggunakan metode BEM ialah metode ini hanya mendiskritisasi pada bagian *boundary* model sehingga proses analisis numerik pada metode ini mudah dan efektif. Metode ini juga cocok digunakan pada analisis komputer untuk memecahkan masalah pada tegangan, regangan, kepecahan, aliran, dan hambatan pada *domain* maupun *boundary*. Di sisi lain, metode ini mempunyai kelemahan yaitu tidak bisa memecahkan masalah pada persamaan diferensial dengan koefisien yang berubah-ubah jika dibandingkan dengan metode FEM (*Finite Element Method*) [19].

Proses diskritisasi pada BEM (*Boundary Element Method*) dapat dihitung menggunakan 3 metode, yaitu:

2.5.1 Collocation Method

Metode ini merupakan metode yang paling sederhana karena hanya memerlukan satu integrasi saja dengan persamaan:

$$\sum_{j=1}^N (A\mu_h^j)(x_k)\gamma_j = f(x_k) \quad (k = 1, \dots, N) \quad (2)$$

2.5.2 Galerkin Method

Metode ini merupakan metode yang menggunakan dua integrasi dengan persamaan:

$$\sum_{j=1}^N (\mu_h^k, A\mu_h^j)\gamma_j = (\mu_h^k, f) \quad (k = 1, \dots, N) \quad (3)$$

2.5.3 Least Square Method

Metode ini merupakan metode yang menggunakan tiga integrasi dengan persamaan:

$$\sum_{j=1}^N (A\mu_h^k, A\mu_h^j)\gamma_j = (A\mu_h^k, f) \quad (k = 1, \dots, N) \quad (4)$$

Sehingga, didapatkan hasil akhir berupa persamaan diskrit sebagai berikut:

$$\mu_h(x) = \sum_{j=1}^N \gamma_j \mu_h^j(x) \quad (5)$$

Permasalahan paling umum adalah penyelesaian dari integral singular dan metode yang biasa digunakan adalah memecah singularitas tersebut kemudian mengevaluasi integral secara analitis [20].

2.6. Spektrum Gelombang

Spektrum gelombang yang digunakan dalam penelitian ini adalah ITTC seperti pada persamaan 6. ITTC (The International Towing Tank Conference) merupakan asosiasi independen di seluruh dunia yang memiliki tanggung jawab untuk memprediksi kinerja hidrodinamika kapal. Periode gelombang yang digunakan berdasarkan tabel 3. Periode rata-rata yang digunakan adalah 7,5 detik dan tinggi gelombang signifikan ( $H_s$ ) adalah 0,875 m. Kategori perairan ini termasuk pada *Sea State 3*.

$$S_{ITTC\zeta}(\omega) = \frac{A}{\omega^5} \exp\left(\frac{-B}{\omega^4}\right) \quad (6)$$

Di mana  $\omega$  adalah frekuensi gelombang, A adalah hasil dari gelombang signifikan dibagi dengan periode rata-rata kemudian dikalikan dengan 172,75, dan B adalah hasil dari 691 dibagi dengan periode rata-rata.

Spektrum gelombang ( $S_w$ ) yang diperoleh berdasarkan persamaan (6) sangat bergantung pada frekuensi gelombang, hal ini terjadi karena pengaruh dari kecepatan kapal itu sendiri dan sudut datang gelombang. Frekuensi gelombang ( $\omega_w$ ) akan berubah menjadi *encounter wave frequency* ( $\omega_e$ ) atau bisa disebut sebagai frekuensi gelombang papasan. Frekuensi gelombang papasan inilah yang selanjutnya akan digunakan untuk membuat

Tabel 3. ITTC Sea State

Jenis Perairan	Tinggi Gelombang	Periode Rata-Rata
Sea State 3	0,875 m	7,5 s
Sea State 4	1,875 m	8,8 s
Sea State 5	3,25 m	9,7 s

Sumber : [21]

spektrum gelombang papasan ( $S_e$ ). Rumus untuk menghitung frekuensi gelombang papasan dapat dilihat pada persamaan (7).

$$\omega_e = \omega \left( 1 - \frac{\omega V}{g} \cos \mu \right) \quad (7)$$

Di mana  $\omega$  adalah frekuensi gelombang,  $V$  adalah kecepatan kapal, dan  $g$  adalah percepatan gravitasi.

### 2.7. Root Mean Square (RMS)

Luasan di bawah kurva spektrum respons dapat dinyatakan dalam  $m_0$  seperti (8), sedangkan untuk mendapatkan nilai rata-rata amplitudo dapat menggunakan (9), dan kemudian untuk mendapatkan nilai amplitudo signifikan atau bisa disebut dengan rata-rata dari 1/3 amplitudo tertinggi dapat didapatkan dari (10) [22].

$$m_0 = \int_0^{\infty} S\xi r(\omega) d\omega \quad (8)$$

$$(\xi)_{av} = 1,253 \sqrt{m_0} \quad (9)$$

$$(\xi)_s = 2 \sqrt{m_0} \quad (10)$$

Persamaan selanjutnya yaitu (11) dan (12) adalah persamaan yang menggambarkan luasan spektrum respons kecepatan kapal dan percepatan yang dinyatakan dalam  $m_2$  dan  $m_4$ . Sementara itu, RMS dari kecepatan dan percepatan setiap gerakan tersebut dinyatakan dalam  $\sqrt{m_2}$  dan  $\sqrt{m_4}$ .

$$m_2 = \int_0^{\infty} \omega^2 S\xi r(\omega) d\omega \quad (11)$$

$$m_4 = \int_0^{\infty} \omega^4 S\xi r(\omega) d\omega \quad (12)$$

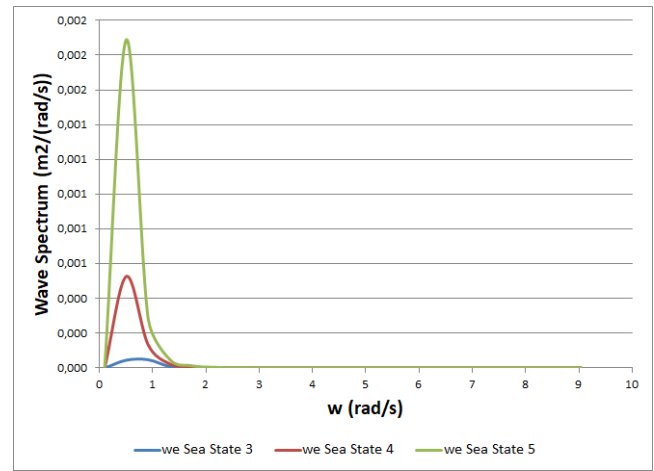
### 2.8. Kriteria Rolling Kapal

Hasil perhitungan *rolling* harus dievaluasi dengan menggunakan standar kriteria *seakeeping* sesuai dengan jenis kapal yang dianalisis. Dalam penelitian ini, standar *seakeeping* yang digunakan adalah standar NORDFORSK untuk kapal cepat yang berukuran kecil, yaitu maksimal nilai *RMS of Rolling* sebesar 4 *degree* [23].

## 3. Hasil dan Pembahasan

### 3.1. Hasil Spektrum Gelombang

Kondisi gelombang laut digambarkan dalam kondisi sebenarnya dalam bentuk spektrum gelombang. Hasil perhitungan spektrum gelombang terdapat pada Gambar 10. Karena pada sudut datang gelombang 90° (*beam wave*), nilai spektrum gelombang insiden ( $S_{ww}$ ) dan nilai spektrum gelombang papasan sama, maka pada Gambar 10 hanya akan ditampilkan nilai dari frekuensi papasan.



Sumber: Hasil Analisis, 2020

Gambar 8. Spektrum Gelombang

### 3.2. Hasil Roll Period

Pengertian dari *Roll Period* adalah seberapa cepat sebuah kapal dapat kembali ke posisi awalnya ketika mengalami gerakan *rolling*. Dengan kata lain, *roll period* adalah waktu yang dibutuhkan oleh kapal dari posisi tegak, lalu bergerak ke beberapa derajat ke arah *portside*, lalu bergerak ke beberapa derajat ke arah *starboard*, kemudian kembali ke posisi tegak ketika mengalami gerakan *rolling*.

Validasi hasil dari *Roll Period* dilakukan dengan tujuan untuk membandingkan hasil dari perhitungan *software* dengan perhitungan manual. *Roll Period* dapat dicari menggunakan:

$$T = \frac{2\pi cB}{\sqrt{gGM}} \quad (13)$$

Di mana  $c$  adalah koefisien berdasarkan jenis lambung kapal yang digunakan,  $B$  adalah lebar kapal, dan  $G$  adalah percepatan gravitasi [24].

Hasil simulasi numerik dan perhitungan persamaan 13 menunjukkan *Roll Period* akuarsi yang baik. Pada tabel 4 memberikan informasi tentang validasi simulasi numerik dan perhitungan empiris.

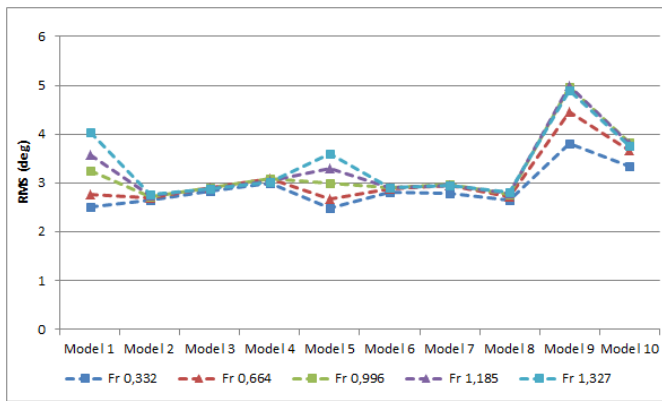
### 3.3. Hasil RMS Rolling Kapal

Setelah melakukan proses analisis, data RAO diolah menggunakan persamaan 1 untuk mendapatkan spektrum respons, kemudian diolah lagi untuk mendapatkan luasan di bawah kurvanya. Gambar RMS *rolling* dalam penelitian ini ditampilkan dalam 5 Froude Number ( $Fr$ ), yaitu  $Fr$  0,332,  $Fr$  0,664,  $Fr$  0,996,  $Fr$  1,185, dan  $Fr$  1,327. Selain itu, gambar

Tabel 4. Validasi Roll Period

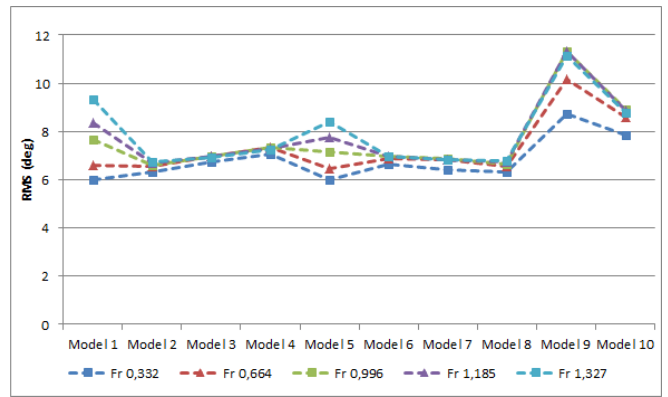
Roll Period menggunakan persamaan (13)	Roll Period menggunakan simulasi numerik	Error
3,87 s	3,75 s	3,10%

Sumber : hasil analisis, 2020



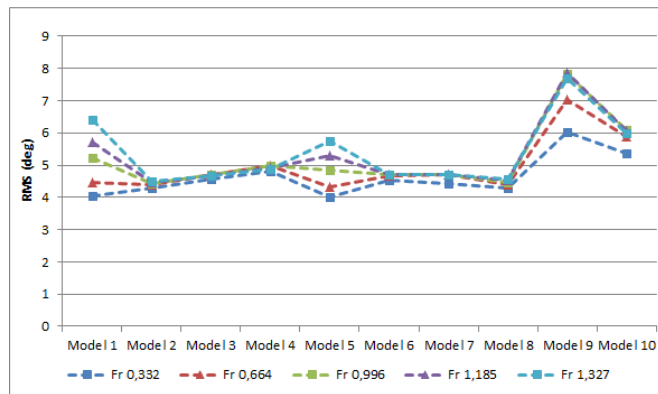
Sumber : Hasil Analisis, 2020

Gambar 9. Grafik RMS Rolling Sea State 3



Sumber : Hasil Analisis, 2020

Gambar 11. Grafik RMS Rolling Sea State 5



Sumber : Hasil Analisis, 2020

Gambar 10. Grafik RMS Rolling Sea State 4

Tabel 5. Hasil Roll Period

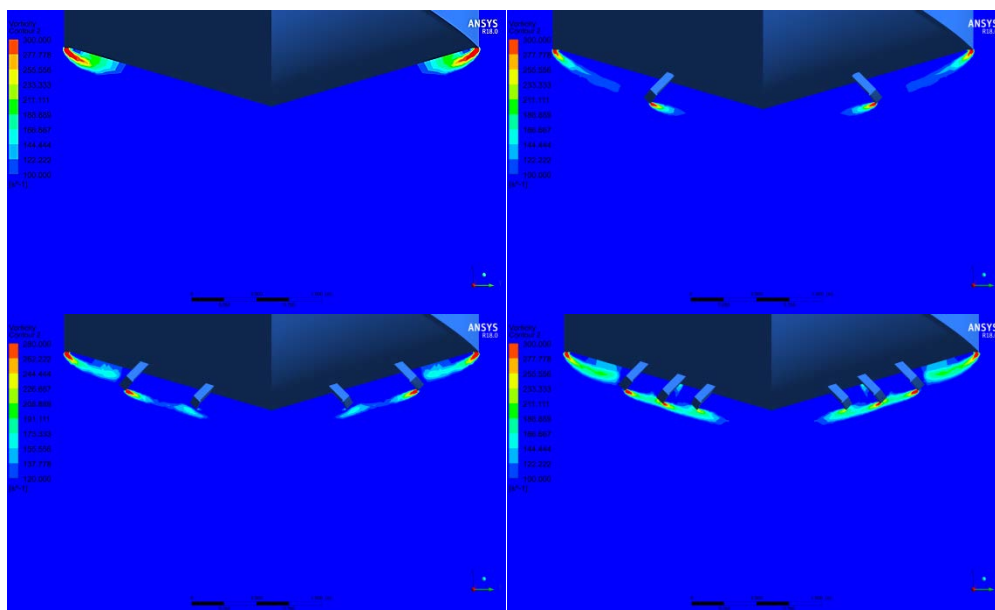
Model Kapal	Roll Period
Tanpa Bilge Keel	3,75 s
Bilge Keel 4 m, 1 Pasang	3,42 s
Bilge Keel 4 m, 2 Pasang	3,55 s
Bilge Keel 4 m, 3 Pasang	3,68 s
Bilge Keel 6 m, 1 Pasang	3,7 s
Bilge Keel 6 m, 2 Pasang	3,6 s
Bilge Keel 6 m, 3 Pasang	3,63 s
Bilge Keel 8 m, 1 Pasang	3,45 s
Bilge Keel 8 m, 2 Pasang	4,3 s
Bilge Keel 8 m, 3 Pasang	3,78 s

Sumber : Hasil Analisis, 2020

RMS *rolling* juga ditampilkan dalam 3 kondisi perairan, yaitu *Sea State 3*, *Sea State 4*, dan *Sea State 5*.

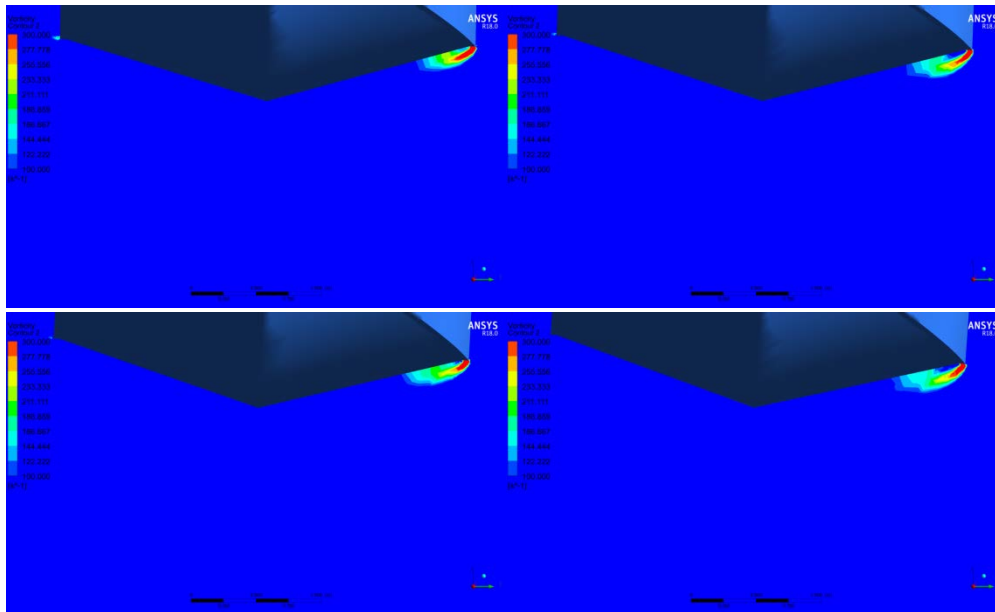
Kesimpulan yang dapat diambil dari Gambar 11-15 adalah semua model kapal yang dianalisis memenuhi NORDFORSK *Criteria of Ships* 1987 kecuali model kapal yang menggunakan *bilge keel* 8 m, 2 pasang dikarenakan model ini tidak sesuai dengan karakteristik kapal.

Ketika kapal melaju pada Fr 0,332, penambahan *bilge keel* menjadi 2 pasang maupun 3 pasang tidak efektif untuk meredam efek gerakan *rolling* dan justru akan menambah nilai RMS *rolling* kapal hingga 11-50% dikarenakan *bilge keel* memang berfungsi secara maksimal pada saat kecepatan tinggi saja. Hanya model 5, yaitu kapal dengan *bilge keel* 6 M, 1



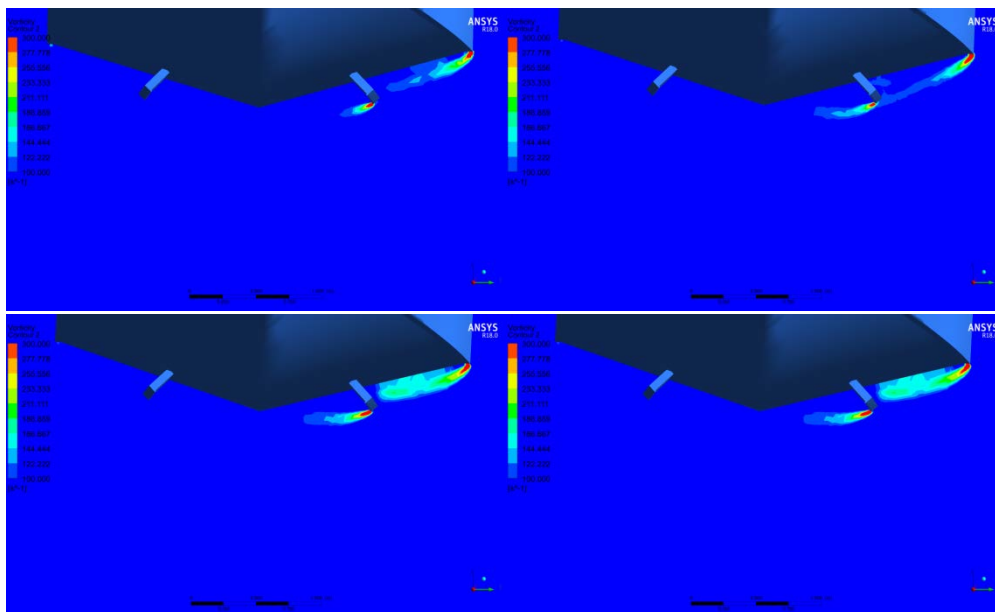
Sumber : Hasil Analisis, 2020

Gambar 12. Vorticity Kapal



Sumber : Hasil Analisis, 2020

Gambar 13. *Vorticity* Kapal Tanpa *Bilge Keel*



Sumber : Hasil Analisis, 2020

Gambar 14. *Vorticity* Model Kapal Paling Optimal

Pasang, yang mampu mengurangi nilai RMS *rolling* sebesar 0,51% pada kecepatan ini.

Sementara itu, pada Fr 0,664, semua model kapal yang hanya menggunakan 1 pasang *bilge keel* mampu mengurangi nilai RMS *rolling* kapal sebesar 1-3%. Namun, penambahan jumlah *bilge keel* menjadi 2 pasang maupun 3 pasang justru menambah nilai RMS *rolling* kapal hingga 4-30%.

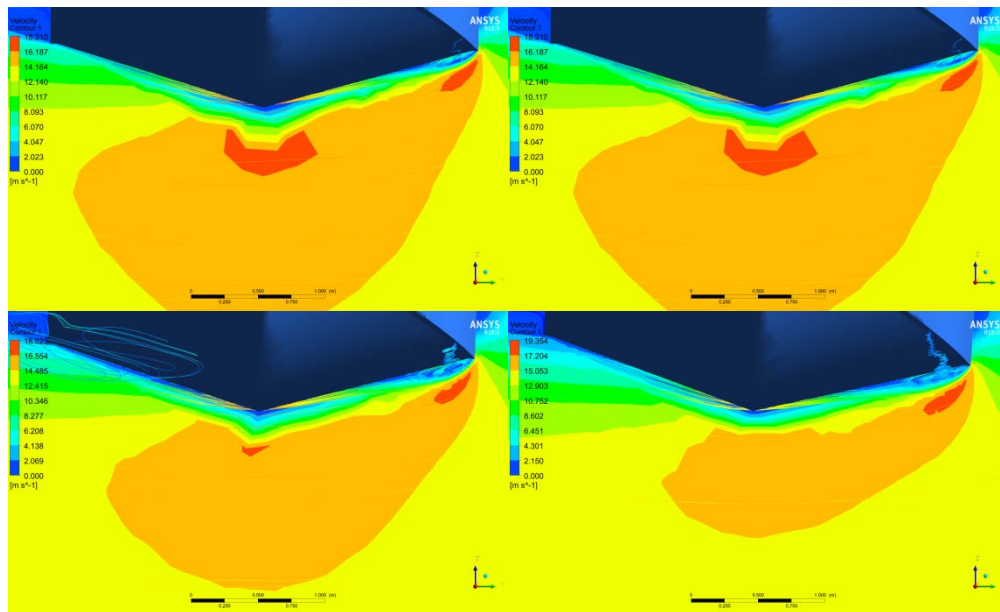
Selanjutnya, pada Fr 0,996 hingga Fr 1,327, semua model kapal bekerja sangat efektif dalam mengurangi nilai RMS *rolling* kapal patroli ini hingga sebesar 5-38%, kecuali model 9 dan model 10, yaitu kapal dengan *bilge keel* 8 m, 2 pasang, dan kapal dengan *bilge keel* 8 m, 3 pasang dikarenakan khusus untuk model ini tidak sesuai dengan karakteristik kapal

patroli ini sehingga diperlukan adanya penelitian lebih lanjut.

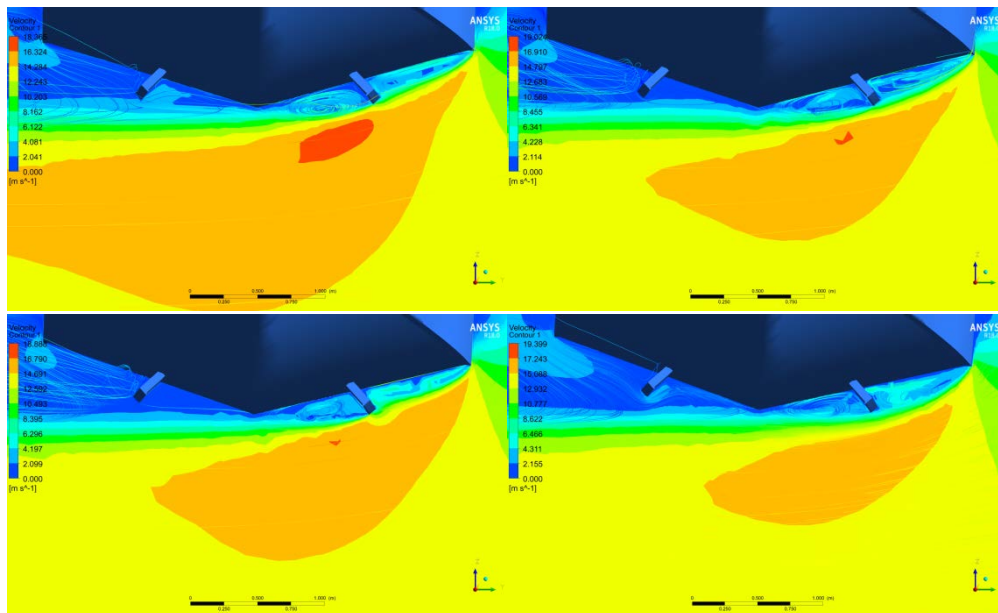
Pada Gambar 11-15, dapat diambil kesimpulan bahwa model 5 yaitu kapal dengan *bilge keel* 6 m, 1 pasang merupakan model yang paling optimal ketika kapal beroperasi dengan kecepatan rendah. Sementara itu, ketika kapal beroperasi dalam kecepatan tinggi, model yang paling optimal dalam mengurangi nilai RMS *rolling* kapal adalah model 2 yaitu kapal dengan *bilge keel* 4 m, 1 pasang.

Berdasarkan penjelasan di atas, bisa disimpulkan bahwa penambahan *bilge keel* menjadi 2 pasang ataupun 3 pasang cukup efektif untuk mengurangi nilai RMS *rolling* kapal jika dibandingkan dengan kapal yang tidak menggunakan *bilge keel* sama sekali.





Sumber : Hasil Analisis, 2020  
**Gambar 15.** Kontur Kecepatan *Rolling* Kapal Model Tanpa *Bilge Keel*



Sumber : Hasil Analisis, 2020  
**Gambar 16.** Kontur Kecepatan *Rolling* Kapal Model Paling Optimal

Namun, jika dibandingkan dengan model kapal yang hanya menggunakan 1 pasang *bilge keel*, tentu lebih efektif jika hanya menggunakan 1 pasang *bilge keel* saja. Oleh karena itu, bisa disimpulkan kembali bahwa penambahan *bilge keel* menjadi 2 pasang maupun 3 pasang tidak cukup efektif dibandingkan dengan kapal yang hanya menggunakan 1 pasang *bilge keel* saja.

#### 4. Kesimpulan

Model kapal yang paling efektif untuk mengurangi nilai RMS *rolling* kapal patroli pada saat kecepatan rendah adalah model 5, yaitu kapal dengan *bilge keel* 6 m, 1 pasang yang mampu mengurangi nilai RMS *rolling* kapal sebesar 1-3% dibandingkan dengan kapal yang tidak menggunakan *bilge keel*. Kemudian, saat kapal beroperasi dengan kecepatan

tinggi, model 2 yaitu kapal dengan *bilge keel* 4 m, 1 pasang merupakan model yang paling optimal untuk mengurangi nilai RMS *rolling* kapal hingga 16-31% dibandingkan dengan kapal yang tidak menggunakan *bilge keel*.

Dapat disimpulkan bahwa penambahan *bilge keel* menjadi 2 pasang maupun 3 pasang cukup efektif untuk mengurangi nilai RMS *rolling* kapal jika dibandingkan dengan kapal yang tidak menggunakan *bilge keel*. Namun, penambahan tersebut tidak cukup efektif jika dibandingkan dengan kapal yang menggunakan 1 pasang *bilge keel* saja.

#### Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada segenap dosen Departemen Teknik Perkapalan Fakultas Teknik Universitas Diponegoro, khususnya

Dosen Pembimbing dan Dosen Penguji atas bimbingan, saran, dan masukan sehingga penelitian ini dapat selesai dengan baik.

## Daftar Pustaka

- [1] D. J. P. Laut, "Pedoman Teknis Kriteria Penempatan Kapal Negara Patroli," Kementerian Perhub. Direktorat Jenderal Perhub. Laut, pp. 1–38, (2019).
- [2] R. Romadhoni, "Optimasi Respon Gerakan Kapal Ikan Catamaran Terhadap Gelombang Reguller," *J. IPTEK*, vol. 21, no. 1, p. 17, (2017), doi: 10.31284/j.ipitek.2017.v21i1.46.
- [3] A. B. Mahfouz, "Identification of the nonlinear ship rolling motion equation using the measured response at sea," *Ocean Eng.*, vol. 31, no. 17–18, pp. 2139–2156, (2004), doi: 10.1016/j.oceaneng.2004.06.001.
- [4] Y. Liu, F. Han, and Y. Lu, "Stability and capsizing analysis of nonlinear ship rolling in wind and stochastic beam seas," *Appl. Ocean Res.*, vol. 57, pp. 52–63, (2016), doi: 10.1016/j.apor.2016.02.008.
- [5] H. Hendratmoko and Hasanudin, "Studi Eksperimen Pengaruh Lunas Bilga Terhadap Gerakan Rolling," *J. Tek. Its*, vol. 1, no. 1, pp. 94–97, (2012).
- [6] X. Zhang, X. Gu, and N. Ma, "Bilge keel load and hull pressure distribution on a rolling ship section with a high-order fractional step finite volume solver," *Ocean Eng.*, vol. 199, no. November 2019, (2020), doi: 10.1016/j.oceaneng.2020.107014.
- [7] S. Samuel, S. Jokosisworo, M. Iqbal, P. Manik, and G. Rindo, "Verifikasi Deep-V Planing Hull Menggunakan Finite Volume Method Pada Kondisi Air Tenang," *Teknik*, vol. 41, no. 2, pp. 126–133, (2020), doi: 10.14710/teknik.v0i0.29391.
- [8] Samuel, A. Trimulyono, and A. W. B. Santosa, "Simulasi CFD pada Kapal Planing Hull," *Kapal*, vol. 16, no. 3, pp. 123–128, (2019), doi: 10.14710/kapal.v16i3.26397.
- [9] A. Saputra, U. Budiarto, and G. Rindo, "Analisa Pengaruh Bilge Keel Tipe Bulb Terhadap V Dan U Pada Kapal Patroli Dengan Menggunakan Metode Computational Fluid Dynamic (CFD)," *J. Tek. Perkapalan*, vol. 7, no. 1, pp. 20–28, (2019).
- [10] X. Sinaga, P. Manik, and D. Chrismianto, "Analisa Pengaruh Geometri Lunas Bilga terhadap Performa Kapal pada Kapal Patroli Pilot Boat 15 Meter," *Tek. Perkapalan*, vol. 6, no. 2, pp. 326–332, (2018).
- [11] M. I. Malik, P. Manik, and M. Iqbal, "Pengembangan Desain Geometri Lunas Bilga Untuk Meningkatkan Performa Kapal Ikan Tradisional (Studi Kasus Kapal Tipe Kragan)," *J. Tek. Perkapalan*, vol. 4, no. 1, pp. 748–757, (2016).
- [12] M. A. R. Irkal, S. Nallayarasu, and S. K. Bhattacharyya, "CFD approach to roll damping of ship with bilge keel with experimental validation," *Appl. Ocean Res.*, vol. 55, no. February, pp. 1–17, (2016), doi: 10.1016/j.apor.2015.11.008.
- [13] D. G. M. Watson, *Practical Ship Design*, vol. 1, no. C. 1998.
- [14] A. C. Notations, "Rules for the Classification of Naval Ships," *Bur. Verit.*, no. April, pp. 1–27, (2020).
- [15] T. C. Smith and W. L. I. Thomas, "A survey of ship motion reduction devices," *David W Taylor Nav. Sh. Res. Dev. Cent.*, vol. DTRC/SHD-1, p. 47, (1990), [Online]. Available: <http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA229278>.
- [16] D. Skandali, E. Lourens, and R. H. M. Ogink, "Calibration of response amplitude operators based on measurements of vessel motions and directional wave spectra," *Mar. Struct.*, vol. 72, no. April, (2020), doi: 10.1016/j.marstruc.2020.102774.
- [17] R. May, "ANSYS AQWA for Hydrodynamic Analysis," pp. 1–29, (2010).
- [18] Y. L. Shao and O. M. Faltinsen, "A numerical study of the second-order wave excitation of ship springing by a higher-order boundary element method," *Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng.*, vol. 6, no. 4, pp. 1000–1013, (2014), doi: 10.2478/IJNAOE-2013-0227.
- [19] J. T. Katsikadelis, *Boundary Elements: Theory and Applications*, no. June 2002. 2002.
- [20] M. Costabel, "Principles of Boundary Element Methods," *Comput. Phys. Reports*, vol. 6, no. 1–6, pp. 1–28, (1987), doi: 10.1016/0167-7977(87)90014-1.
- [21] ITTC, "Practical guidelines for ship CFD applications," 2014.
- [22] M. Iqbal and G. Rindo, "Optimasi Bentuk Demihull Kapal Katamaran Untuk Meningkatkan Kualitas Seakeeping," *Kapal*, vol. 12, no. 1, pp. 19–24, (2015), doi: 10.12777/kpl.12.1.19-24.
- [23] Nordforsk, "NORDFORSK Seakeeping Criteria," (1987).
- [24] M. Grimm, W. Smith, and D. Fortescue, "The influence of roll radius of gyration including the effect of inertia of fluids on motion predictions," *RINA, R. Inst. Nav. Archit. - PACIFIC 2017 Int. Marit. Conf.*, (2017).