



2580-2798 (e)  
2588-6225 (p)

**Inovtek Polbeng: Jurnal Inovasi Teknologi Politeknik Negeri Bengkalis**  
(Bengkalis State Polytechnic Technology Innovation Journal)

journal homepage: <https://jurnal.polbeng.ac.id/index.php/IP/index>

## ANALISA PENGARUH VARIASI SUDUT BILGA KEEL TERHADAP GERAKAN KAPAL CEPAT TIPE CREW BOAT

Romadhoni<sup>1)</sup>, Budhi Santoso<sup>1)</sup>, Khairul Anwar<sup>1)</sup>, Bobi Satria<sup>2)</sup>, Aprizawati<sup>2)</sup> Suzdayan<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Jurusan Teknik Perkapalan, Politeknik Negeri Bengkalis. Jl. Leseng Bengkalis, Riau, 28711

<sup>2)</sup> Jurusan Kemaritiman, Politeknik Negeri Bengkalis. Jl Simpang Ayam, Riau, 28711

Corresponding Author: [romadhoni@polbeng.ac.id](mailto:romadhoni@polbeng.ac.id)

### Article Info

### Abstract

#### Keywords:

bilge keel, seakeeping, crew boat, high speed craft,

#### Article history:

Received: 14/05/2025  
Last revised: 30/05/2025  
Accepted: 30/05/2025  
Available online: 03/06/2025  
Published: 03/06/2025

DOI: 10.35314/5tfcn66

### Abstrak

Dalam merancang kapal cepat, aspek kecepatan, kestabilan, dan perilaku dinamis menjadi sangat krusial untuk mencapai performa operasi yang optimal, terutama ketika berhadapan dengan kondisi laut yang bervariasi dan terkadang ekstrem. Penelitian ini menitikberatkan pada evaluasi pengaruh pemasangan bilge keel terhadap seakeeping kapal tipe crew boat berukuran Panjang 38 m, lebar 7,6 m, tinggi 3,65 m, serta sarat 1,89 m. Tujuan utama adalah membandingkan respons amplitudo (RAO) dan spektrum gelombang pada gerakan heave, roll, dan pitch sebelum dan sesudah penambahan bilge keel. Metode yang digunakan meliputi pemodelan numerik hull tanpa bilge keel dan hull dengan bilge keel pada sudut 15°, 30°, 45°, dan 60°—diukur dari perpotongan centre line dan waterline kapal—dengan panjang bilge keel 19 m, lebar 0,3 m, dan ketebalan 6 mm. Analisis seakeeping dilakukan dengan menghitung RAO untuk setiap mode gerakan pada berbagai kondisi gelombang harmonik. Hasil menunjukkan bahwa penambahan bilge keel mampu meredam amplitudo gerakan secara signifikan. Secara khusus, bilge keel pada sudut 45° memberikan performa terbaik dengan nilai RAO heave sebesar 2,369 m/m dan RAO roll sebesar 4,503 °/m, mengungguli konfigurasi lainnya dalam mengurangi perilaku osilasi kapal.

### Abstract

In the design of high-speed vessels, ensuring optimal performance requires careful consideration of speed, stability, and dynamic behavior, particularly under varying and occasionally extreme sea conditions. This study evaluates the effect of bilge keel installation on the seakeeping characteristics of a crew boat measuring 38 m in length, 7.6 m in beam, 3.65 m in height, and 1.89 m in draft. The primary objective is to compare the Response Amplitude Operators (RAOs) and wave spectra for heave, roll, and pitch motions before and after adding bilge keels. The methodology involves constructing numerical models of the hull without bilge keels and with bilge keels mounted at 15°, 30°, 45°, and 60°, measured from the intersection of the vessel's centerline and waterline, using a bilge keel 19 m long, 0.3 m wide, and 6 mm thick. Seakeeping analysis is conducted by computing RAOs for each motion mode across a range of harmonic wave conditions. Results indicate that installing bilge keels significantly reduces motion amplitudes. In particular, the 45° bilge keel configuration yields the best performance, with an RAO of 2.369 m/m for heave and 4.503 °/m for roll, outperforming the other configurations in mitigating the vessel's dynamic oscillations.

## 1. PENDAHULUAN

Perancangan dan perencanaan suatu kapal cepat menuntut perhatian khusus terhadap aspek kecepatan dan kestabilan guna memastikan performa operasional yang optimal. Kapal cepat dirancang untuk menempuh kecepatan tinggi, namun hal ini sering kali disertai tantangan berupa penurunan stabilitas dan efisiensi gerak saat berhadapan dengan kondisi laut yang bervariasi dan terkadang ekstrem. Salah satu solusi teknik yang banyak diadopsi untuk meningkatkan kestabilan gerak kapal ialah pemasangan lunas bilga (bilge keel)[5]. Lunas bilga merupakan pelat datar atau sirip tambahan yang dipasang di sisi bawah lambung kapal; bentuknya dapat berupa flat bar, V-bar,

atau bulb[6]. Material yang digunakan untuk lunas bilga pada umumnya sama dengan material lambung, sehingga mampu menyatu secara struktural dan berfungsi sebagai penahan gerakan roll (penggelungan) kapal saat melaju di atas permukaan air[1].

Pemasangan lunas bilga tidak hanya berpengaruh pada penurunan amplitudo roll, tetapi juga memengaruhi distribusi gaya hidrodinamika di lambung kapal. Dengan adanya lunas bilga, energi yang dihasilkan oleh gelombang dapat diubah menjadi gaya redaman yang mereduksi getaran berlebih, sehingga traksi kapal menjadi lebih stabil dan hambatan hidrodinamik dapat berkurang. Pada kondisi tertentu, pemilihan geometri dan sudut pemasangan lunas bilga terbukti mampu menurunkan nilai Root Mean Square (RMS) gerakan kapal hingga sekitar 2 %–3 %, terutama pada frekuensi gelombang yang dominan[1]. Selain itu, studi lain menunjukkan bahwa bilge keel dengan lebar 30 cm, ketebalan 6 mm, dan sudut penempatan 45° relatif memberikan kinerja redaman terbaik dibandingkan variasi lainnya.

Meskipun demikian, penambahan lunas bilga juga menimbulkan perubahan pola gerak kapal, seperti pergeseran titik pusat lepas lambung (center of buoyancy), modifikasi sudut kemiringan (heel), serta respons yang berbeda terhadap gelombang datang dan arus. Oleh karena itu, penting untuk memahami secara komprehensif bagaimana variasi sudut dan dimensi lunas bilga memengaruhi karakteristik gerak (seakeeping) dan kestabilan lateral kapal cepat, khususnya jenis crew boat yang banyak digunakan pada operasi lepas pantai.

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji secara mendalam pengaruh variasi sudut pemasangan lunas bilga (15°, 30°, 45°, dan 60°) terhadap respons gerak heave, roll, dan pitch pada kapal crew boat yang berbahan aluminium dengan panjang 38 m, lebar 7,6 m, dan sarat 1,89 m. Analisis akan difokuskan pada perbandingan nilai Response Amplitude Operator (RAO) dan RMS untuk masing-masing model, guna menentukan konfigurasi lunas bilga yang paling efektif dalam meminimalkan gerak osilasi tanpa mengorbankan performa lintas kapal. Diharapkan hasil penelitian ini dapat memberikan rekomendasi desain lunas bilga yang optimal sehingga dapat meningkatkan keselamatan, kenyamanan, dan efisiensi operasional kapal cepat pada kondisi laut nyata.

## 2. METODE

### 2.1 Pengumpulan Data

Dalam penelitian ini data kapal crew boat adalah berklasifikasi *American Bureau of Shipping* (ABS), kapal ini mengangkut 10 Crew dan 90 penumpang, memiliki kecepatan service 25 knot dengan menggunakan material Aluminium.

**Tabel 1.** Ukuran Utama Crew Boat

Symbol	Value	Satuan
LOA	38,00	m
LBP	34,71	m
LWL	36,77	m
Bmld	7,60	m
Hmld	3,65	m
T	1,89	m
Cb	0,501	
Cp	0,806	
VS	25	Knot

### 2.2 Parameter Bilge Keel

Dalam penelitian ini, variasi konfigurasi bilge keel pada kapal cepat diuji dengan lima kondisi utama: pertama, kapal tanpa bilge keel; kedua, kapal dengan bilge keel pada sudut 15°; ketiga, kapal

dengan bilge keel pada sudut 30°; keempat, kapal dengan bilge keel pada sudut 45°; dan kelima, kapal dengan bilge keel pada sudut 60°. Sudut pemasangan bilge keel diukur sebagai sudut antara bilge keel dengan garis pusat kapal (centre line) pada titik pertemuan dengan waterline. Pemilihan sudut ini sangat penting karena setiap perubahan sudut akan mempengaruhi interaksi aliran air di sekitar bilge keel dan, pada gilirannya, besaran gaya redaman roll yang dihasilkan saat kapal mengalami gerakan miring akibat gelombang atau gangguan lateral.

Menurut pedoman IMO (International Maritime Organization), faktor redaman total (k) yang dihasilkan oleh keberadaan bilge keel di atas redaman dasar kapal didefinisikan sebagai koefisien adimensional. Apabila kapal tidak dilengkapi bilge keel, maka nilai k dianggap sama dengan 1, artinya tidak ada kontribusi tambahan redaman roll. Untuk bilge keel berprofil tajam (sharp bilge keel), nilai k ditetapkan sebesar 0,7, yang menunjukkan efisiensi redaman roll mencapai 70 % dari redaman teoritis. Sementara itu, bilge keel dengan profil lain—seperti bentuk membulat, V-bar, atau bulb—memiliki nilai k di antara 0,7 hingga 1, tergantung pada geometri, ketebalan, dan lebar profil yang digunakan. Misalnya, bilge keel berbentuk bulb atau V-bar dengan ketebalan lebih besar biasanya memiliki nilai k yang mendekati 0,9, mencerminkan redaman roll yang lebih rendah dibandingkan bilge keel tajam. Dengan menguji variasi sudut pemasangan bilge keel (15°, 30°, 45°, dan 60°), penelitian ini juga akan mengevaluasi perubahan nilai k secara praktis, karena sudut pemasangan diperkirakan memodifikasi cara arus hidrodinamik berinteraksi dengan bilge keel dan mempengaruhi besaran redaman yang dihasilkan. Diharapkan hasil analisis ini dapat menentukan sudut pemasangan bilge keel yang paling efektif dalam mengurangi amplitudo roll tanpa menambah hambatan hidrodinamika yang signifikan [4].

**Tabel 2.** Penentuan nilai k

$\frac{Ak \times 100}{Lwl \times B}$	k
0	1,0
1,0	0,98
1,5	0,95
2,0	0,88
2,5	0,79
3,0	0,74
3,5	0,72
≥4,0	0,70

Sebelum menentukan nilai k untuk kapal yang memiliki bilga, terlebih dahulu harus di cari nilai persamaan berikut:

$$\frac{Ak \times 100}{LWL \times B} \quad (1)$$

Dimana :

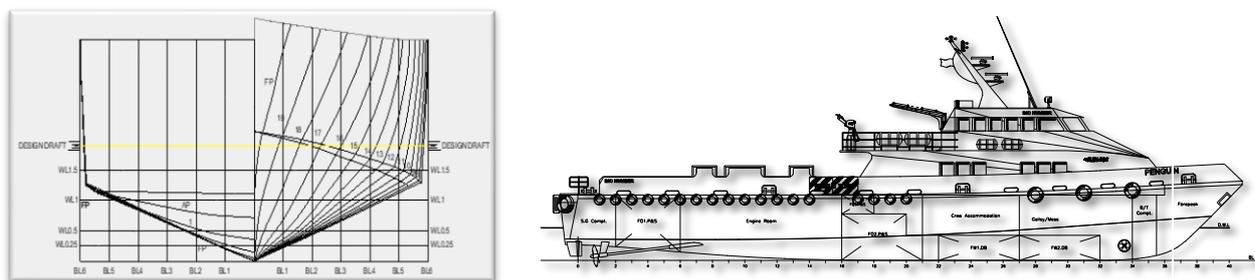
- Ak = luas *Bilge keel* (m<sup>2</sup> )
- Lwl = Panjang garis air kapal (m)
- B = Lebar kapal (m)

### 2.3 Pembuatan Model

Proses pembuatan model dimulai dengan merancang bentuk lambung kapal tanpa penambahan bilge keel, menggunakan data dasar kapal yang telah dikumpulkan. Lambung yang dimodelkan merupakan tipe High Speed Craft (HSC), yaitu kapal berkecepatan tinggi yang dirancang untuk melaju lebih cepat dibandingkan kapal konvensional. Menurut ketentuan dalam IMO HSC Code (2008), suatu kapal dikategorikan sebagai HSC apabila kecepatan layan maksimumnya, dalam satuan

meter per detik, memenuhi persamaan yang ditentukan berdasarkan volume ponton dan dimensi kapal. Pada tahap awal ini, geometri dasar lambung dihasilkan menggunakan perangkat lunak CAD, diikuti dengan verifikasi parameter seperti panjang keseluruhan (LOA), lebar maksimum, dan sarat kapal. Setelah itu, dilakukan pemilihan permukaan paneling dan segmentasi geometri untuk memudahkan pembuatan mesh numerik. Langkah selanjutnya meliputi pengecekan korespondensi antara data dimensi lapangan dengan model digital, sehingga representasi hull dapat mencerminkan kondisi sesungguhnya. Proses ini juga melibatkan penentuan titik referensi kritis—seperti pusat berat dan pusat apung—serta validasi bentuk luasan lambung dengan memeriksa backward dihedral dan curvature pada garis limpasan. Dengan struktur hull dasar selesai, model kemudian siap untuk ditambahkan variasi bilge keel pada sudut-sudut yang telah ditentukan  $3.7 \cdot \nabla^{0.1677} = 0.7.240,5^{0.1677} = 52,666$

Dengan,  $\nabla$  adalah Displasemen sesuai dengan desain garis air (m<sup>3</sup>).



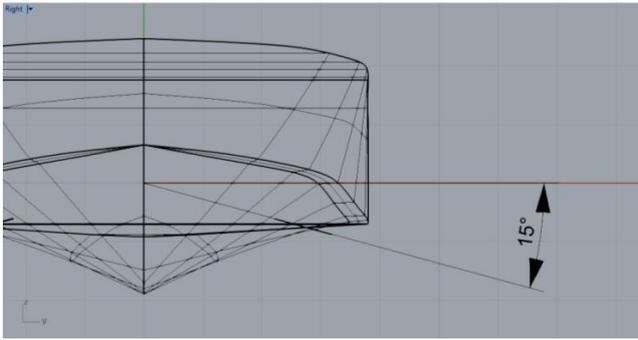
Gambar 1. Desain Model Kapal Crew Boat

## 2.4 Pembuatan Bilga Keel

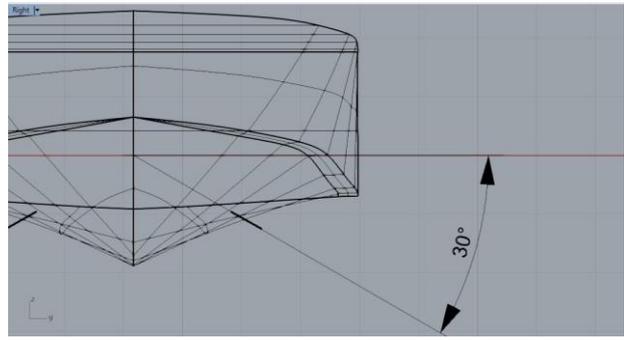
Pada Tabel 3 terlihat lima konfigurasi model yang direncanakan untuk analisis bilge keel. Model V1 berfungsi sebagai kasus dasar (baseline) tanpa penerapan bilge keel, sehingga akan memperlihatkan karakteristik hidrodinamika lambung murni. Sementara itu, Model V2 hingga V5 memiliki bilge keel dengan panjang 19 meter dan ketebalan 0,3 meter; perbedaannya terletak pada sudut pemasangan bilge keel, yaitu masing-masing 15°, 30°, 45°, dan 60°. Dengan menjaga konstanta panjang ( $P = 19$  m) dan tebal ( $t = 0,3$  m) pada keempat model tersebut, studi ini dapat mengevaluasi secara terfokus bagaimana perubahan sudut pemasangan memengaruhi gaya redaman roll dan stabilitas lateral kapal. Sudut yang lebih kecil (15° pada V2) diperkirakan menghasilkan redaman yang berbeda dibandingkan sudut menengah (30° pada V3) atau sudut yang lebih besar (45° pada V4 dan 60° pada V5), karena orientasi bilge keel relatif terhadap garis waterline memodifikasi pola aliran air dan tekanan hidrodinamika yang timbul. Dengan membandingkan hasil untuk setiap model, akan diperoleh pemahaman mengenai sudut optimal bilge keel yang mampu meminimalkan amplitudo roll tanpa menimbulkan peningkatan signifikan pada hambatan linier kapal.

Tabel 3. Rencana Model Bilga Keel

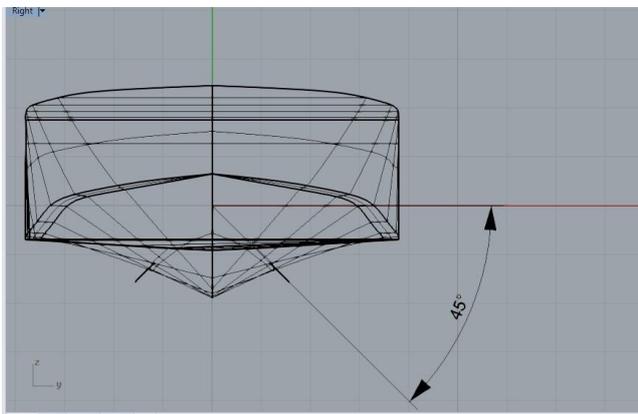
Nama Model	Panjang Bilga Keel
Model V 1	Planing Tanpa Bilga Keel
Model V 2	P 19 t 0,3 Sudut 15 <sup>0</sup>
Model V 3	P 19 t 0,3 Sudut 30 <sup>0</sup>
Model V 4	P 19 t 0,3 Sudut 45 <sup>0</sup>
Model V 5	P 19 t 0,3 Sudut 60 <sup>0</sup>



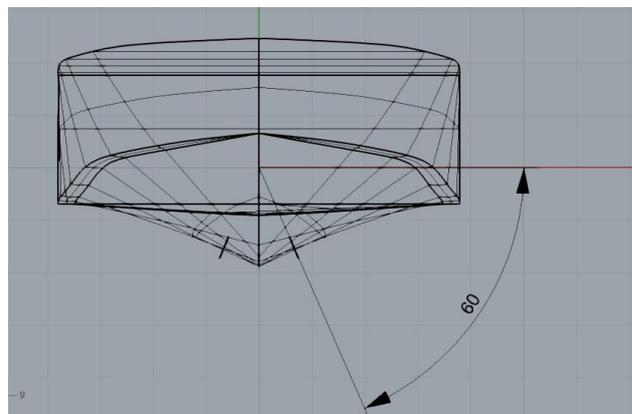
Gambar 3. Model V2



Gambar 4. Model V3



Gambar 5. Model V4



Gambar 6. Model V5

## 2.5 Analisa Seakeeping

Dalam analisis seakeeping, gerakan kapal di laut idealnya dianggap memiliki enam derajat kebebasan: surge (maju-mundur), sway (sisi-ke-sisi), heave (naik-turun), roll (guling), pitch (miring depan-belakang), dan yaw (belok kiri-kanan). Namun, memecahkan seluruh enam gerakan dalam satu waktu akan sangat kompleks karena besarnya interaksi hidrodinamika yang harus diperhitungkan[11]. Oleh karena itu, praktik umum di bidang kelautan adalah mengelompokkan gerakan-gerakan tersebut menjadi beberapa mode kopel (coupled), antara lain heave–pitch, yaw–sway, yaw–sway–roll, dan roll–yaw–pitch. Pasangan heave–pitch misalnya mewakili gerakan vertikal dan kemiringan longitudinal, sedangkan kopel yaw–sway menggambarkan perpaduan gerakan lateral dan perubahan arah haluan[12]. Dalam kopel yang lebih kompleks seperti yaw–sway–roll atau roll–yaw–pitch, gerakan kemiringan memadukan aspek perubahan arah dan geseran samping, sehingga mampu menggambarkan perilaku kapal pada kondisi gelombang datang miring atau arus silang. Karena intensitas gaya hidrodinamika pada tiap mode diasumsikan linier dan bersifat harmonik (berulang dengan frekuensi tertentu), maka masing-masing kopel gerakan ini dapat dimodelkan menggunakan sepasang atau triplet persamaan diferensial linier. Pada akhirnya, susunan persamaan diferensial gerakan kopel tersebut menjadi dasar untuk menghitung Response Amplitude Operator (RAO) dan nilai redaman, sehingga memudahkan perhitungan respons amplitudo kapal terhadap gelombang dengan pendekatan numerik atau semi-analitik.

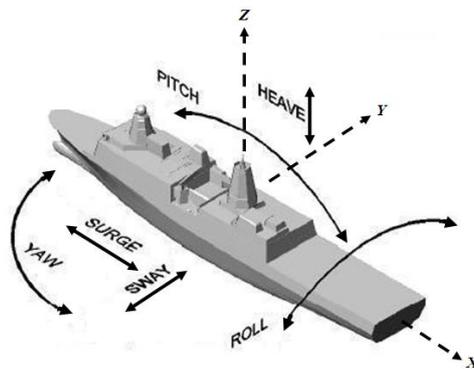
Enam mode gerakan di atas diasumsikan linier dan harmonik, maka enam persamaan diferensial gerakan kopel dapat dituliskan pada persamaan seperti dibawah ini:

$$\sum_{n=1}^6 [(M_{jk} + A_{jk})\ddot{\xi}_k + B_{jk}\dot{\xi}_k + C_{jk}\xi_k] = F_j e^{i\omega t}, j = 1 \quad (2)$$

dengan :

- $M_{jk}$  = komponen matriks massa kapal.
- $A_{jk}, B_{jk}$  = matriks koefisien massa tambah dan redaman.
- $C_{jk}$  = koefisien-koefisien gaya hidrostatik pengembali.
- $F_j$  = amplitudo gaya eksitasi dalam besaran kompleks.

Untuk mendapatkan gambaran menyeluruh mengenai perilaku hidrodinamika kapal, analisis difokuskan pada tiga gerakan utama—heave (naik-turun vertikal), roll (guling lateral), dan pitch (miring longitudinal)—yang sering terjadi saat kapal beroperasi. Masing-masing gerakan tersebut dievaluasi pada tiga kondisi kecepatan: kapal diam (0 knot), kecepatan operasi normal (12 knot), serta kecepatan jelajah maksimum (25 knot). Selain itu, pengujian dilakukan pada lima sudut haluan (heading) berbeda— $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$ , dan  $180^\circ$ —untuk mensimulasikan efek gelombang yang datang dari berbagai arah relatif terhadap arah haluan kapal. Dengan mengkombinasikan variasi kecepatan dan sudut haluan ini, dapat diketahui bagaimana interaksi antara kecepatan kapal dan arah gelombang memengaruhi besarnya gerakan heave, amplitudo roll, serta sudut pitch. Pendekatan ini membantu mengidentifikasi kondisi operasi yang paling kritis atau optimal dalam perancangan seakeeping, karena respons hidrodinamika cenderung berubah secara signifikan ketika arah gelombang tidak searah dengan haluan kapal atau pada saat kecepatan meningkat.



Gambar 7. Mode Gerak Kapal

(*Unified Facilities Criteria (UFC)*, 2005)

Keadaan seimbang pada kapal terjadi ketika gaya angkat (buoyancy) yang bekerja pada lambung sama besarnya dengan gaya berat (gravitasi) kapal, sehingga kapal ‘mengambang’ tanpa cenderung naik atau tenggelam. Jika pada suatu kondisi gaya buoyancy lebih besar daripada berat kapal, maka kapal akan terdorong ke atas dan cenderung bergerak hingga mencapai posisi perimbangan kembali—biasanya melewati titik keseimbangan semula dan kemudian berosilasi sebelum berhenti. Sebaliknya, jika berat kapal melebihi gaya buoyancy pada frekuensi tertentu—misalnya saat beban tambahan atau perubahan muatan—kapal akan mengalami penurunan posisi (sinkage) sampai gaya buoyancy kembali meningkat dan menyeimbangkan gaya berat. Pada momen ini, gerakan naik-turun kapal (heave) melambat hingga mencapai titik keseimbangan statis, di mana titik berat (center of gravity) dan titik angkat (center of buoyancy) berada pada garis vertikal yang sama. Proses kenaikan atau penurunan tersebut dipengaruhi pula oleh momen restorasi yang berkaitan dengan tinggi metasenter (metacentric height), di mana semakin besar tinggi metasenter, semakin cepat kapal kembali ke posisi seimbang setelah diganggu oleh gelombang ataupun muatan yang berubah.

## 2.6 Spektrum Gelombang

Dalam kajian hidrodinamika, spektrum gelombang menggambarkan bagaimana energi gelombang terdistribusi sepanjang berbagai frekuensi di perairan tertentu. Secara umum, formulasi spektrum diperoleh dengan menurunkan fungsi distribusi energi rata-rata untuk kondisi laut spesifik melalui prosedur matematis yang melibatkan asumsi kestasioneran dan keseragaman gelombang dalam rentang waktu pengamatan[2]. Berbagai model spektrum telah dipublikasikan, tetapi spektrum JONSWAP (Joint North Sea Wave Project) sering dipilih untuk daerah dengan batas perairan terbatas, seperti teluk atau wilayah kepulauan[13]. Model ini awalnya dikembangkan berdasarkan pengukuran di Laut Utara dan memperkenalkan faktor peningkatan puncak energi (peak enhancement factor,  $\gamma$ ) untuk memperbaiki bentuk puncak spektrum yang tidak tertangkap oleh model Pierson–Moskowitz. Rumus spektrum JONSWAP dapat dituliskan sebagai[14]:

$$S(\omega) = \alpha g^2 \omega^{-5} \exp\left(-1.25(\omega / \omega_0)^{-4} \gamma^{\exp\left[\frac{(\omega - \omega_0)^2}{2\tau\omega^2}\right]}\right) \quad (3)$$

Dimana  $S(\omega)$  adalah densitas energi gelombang pada frekuensi sudut  $\omega$ ,  $\alpha$  adalah koefisien skala (sering disebut Phillips constant),  $g$  percepatan gravitasi, dan  $\omega_p$  frekuensi sudut puncak. Parameter  $\sigma$  mengambil nilai 0,07 untuk  $\omega \leq \omega_p$  dan 0,09 untuk  $\omega > \omega_p$ , sehingga membentuk kemiringan tepat di sekitar puncak spektrum, sedangkan  $\gamma$  biasanya diambil antara 1 dan 7 (nilai umum pada laut lepas berkisar 3,3). Dengan memperhitungkan nilai  $\gamma$ , JONSWAP mampu menggambarkan kondisi fetch-limited (jarak tempuh angin yang terbatas), di mana puncak energi lebih tajam dibandingkan spektrum Pierson–Moskowitz. Karena karakteristik ini, spektrum JONSWAP sangat sesuai untuk melakukan simulasi respons kapal di daerah perairan tertutup atau kepulauan, termasuk situasi perairan tropis dengan kondisi fetch yang variatif.

Nilai  $\sigma$  pada spektrum JONSWAP diatur menjadi 0,07 ketika frekuensi sudut ( $\omega$ ) kurang dari atau sama dengan frekuensi puncak ( $\omega_0$ ), dan berubah menjadi 0,09 jika  $\omega$  melebihi  $\omega_0$ ; perbedaan ini bertujuan untuk menciptakan lekukan puncak spektrum yang sesuai dengan pola gelombang di sekitar frekuensi dominan. Sementara itu, faktor peningkatan puncak ( $\gamma$ ) pada asalnya ditetapkan sekitar 3,3 berdasarkan data Laut Utara, di mana kondisi angin dan fetch menghasilkan puncak energi yang relatif tajam. Namun, dalam praktik desain anjungan lepas pantai dan fasilitas kelautan di Indonesia,  $\gamma$  sering diturunkan menjadi sekitar 2,5 atau bahkan 2,0. Penyesuaian ini mencerminkan karakteristik gelombang di perairan tropis, di mana jarak tempuh angin (fetch) cenderung terbatas dan energi gelombang terdistribusi lebih merata di beberapa frekuensi. Dengan menggunakan nilai  $\gamma$  yang lebih rendah, kurva spektrum menjadi lebih lebar di bagian puncak, sehingga memodelkan kondisi gelombang yang kurang “tajam” dan lebih sesuai untuk perairan dengan variasi arah angin yang tinggi. Pada akhirnya, pemilihan  $\sigma$  dan  $\gamma$  yang tepat membantu insinyur kelautan mendapatkan representasi spektrum gelombang yang lebih akurat, sehingga perancangan struktur lepas pantai dapat menahan gaya dinamis gelombang yang sebenarnya terjadi di wilayah operasi.

## 2.7 Response Amplitude Operator (RAO),

Dalam analisis hidrodinamika struktur lepas pantai, metode spektral digunakan untuk menghitung bagaimana struktur tersebut merespon beban gelombang dengan memperhitungkan kontribusi pada setiap frekuensi gelombang. Salah satu alat utama dalam pendekatan ini adalah Response Amplitude Operator (RAO), yang sering disebut juga sebagai Fungsi Transfer[15]. RAO menggambarkan hubungan antara amplitudo respons struktur (misalnya simpangan gerak, tegangan material, atau percepatan getaran) dengan amplitudo gelombang pada frekuensi tertentu. Secara matematis, RAO didefinisikan sebagai rasio  $\zeta_{\text{respon}}/\zeta_{\text{gelombang}}$ , di mana  $\zeta_{\text{respon}}$  adalah amplitudo keluaran (response) dan  $\zeta_{\text{gelombang}}$  adalah amplitudo masukan (gelombang). Dengan mengetahui RAO untuk rentang frekuensi relevan, kita dapat menghitung spektrum respons struktur ketika

ditimpa gelombang yang memiliki spektrum energi tertentu. Sebagai contoh, jika spektrum gelombang  $S(\omega)$  telah diketahui, maka spektrum respons  $S_{respon}(\omega)$  dapat diperoleh melalui persamaan:

Bentuk umum dari persamaan RAO dalam fungsi frekuensi adalah sebagai berikut:

$$S_R(\omega_e) = S_\zeta(\omega_e)[H(\omega_e)]^2$$

$$S_R = S_\zeta(\omega_e) \left[ \frac{R_a}{\zeta_a} \right]^2 \quad (4)$$

$$RAO = \left( \frac{\text{Amplitudo Respon Gerakan}}{\text{Amplitudo Gelombang}} \right)^2 = \left( \frac{R_a}{\zeta_a} \right)^2 \quad (5)$$

Simbol  $S_\zeta(\omega)$  mengacu pada fungsi kerapatan spektrum gelombang pada frekuensi sudut  $\omega$  (dinyatakan dalam satuan  $\text{m}^2 \cdot \text{det}^{-1}$ ), yang menunjukkan bagaimana energi gelombang terdistribusi sepanjang rentang frekuensi. Sebaliknya,  $S_R(\omega)$  merupakan fungsi kerapatan spektrum respons gerakan kapal pada frekuensi sudut  $\omega$  (juga dalam  $\text{m}^2 \cdot \text{det}^{-1}$  untuk gerakan linier, atau  $\text{deg}^2 \cdot \text{det}^{-1}$  untuk gerakan rotasi).  $S_R(\omega)$ , kita dapat menghitung nilai root mean square (RMS) respons, yang dalam notasi umum sering ditulis sebagai  $SR$ —yakni spektrum respons gerakan teragregasi, dengan satuan  $\text{m}$  (untuk heave/pitch/Roll linier) atau  $\text{deg}$  (untuk roll/pitch sudut).

Response Amplitude Operator (RAO), yang dilambangkan sebagai  $H(\omega)$ , menggambarkan hubungan frekuensi-spesifik antara amplitudo gerakan kapal  $R_a$ , dalam satuan  $\text{m}$  (untuk gerakan vertikal/linier atau  $\text{deg}$  untuk gerakan rotasi) dan amplitudo gelombang insiden  $\zeta_a$ , dalam  $\text{m}$ . Dengan demikian, kuadrat RAO,  $[H(\omega)]^2$ , menunjukkan seberapa besar energi gerakan kapal pada frekuensi tertentu yang ditimbulkan oleh energi gelombang pada frekuensi tersebut. Secara matematis, spektrum respons  $S_R(\omega)$  dapat diekspresikan sebagai perkalian antara kuadrat RAO dan spektrum gelombang:

$$S_R(\omega) = |H(\omega)|^2 S_\zeta(\omega) \quad (6)$$

Dalam konteks ini,  $\zeta_a$  mewakili amplitudo puncak gelombang pada frekuensi sudut  $\omega$  (biasanya diukur dalam meter), sementara  $R_a$  adalah amplitudo gerakan kapal pada frekuensi yang sama (meter atau derajat, tergantung jenis gerakannya). Pemahaman terhadap hubungan antar-simbol ini memudahkan perhitungan nilai RMS atau nilai puncak gerakan kapal ketika diterpa kondisi gelombang yang memiliki spektrum energi tertentu.

## 2.8 Root Mean Square (RMS)

Root Mean Square (RMS) merupakan ukuran statistik yang diperoleh dari momen ke-nol spektrum respons ( $m_0$ ), yaitu luas di bawah kurva kerapatan spektrum gerakan. Secara matematis,  $m_0$  dihitung dengan mengintegrasikan fungsi densitas spektrum respons  $S_R(\omega)$  sepanjang semua frekuensi:

$$m_0 = \int_0^\infty S_R(\omega) d\omega \quad (7)$$

Karena momen ke-nol melambangkan total energi respons pada kapal, nilai RMS untuk amplitudo gerakan ( $\zeta$ ) diperoleh sebagai akar kuadrat dari  $m_0$ :

$$\text{RMS} = \sqrt{m_0}. \quad (8)$$

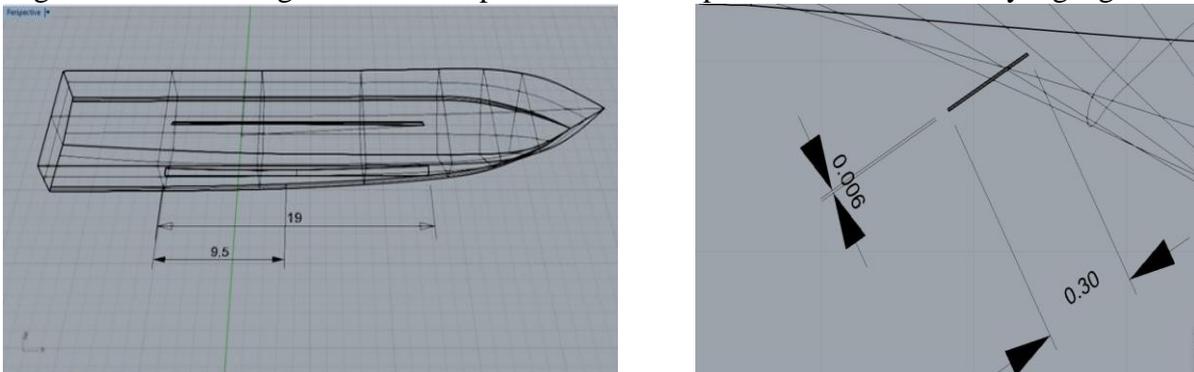
Dengan demikian,  $m_0$  memberikan perkiraan rata-rata amplitudo gerakan kapal selama paparan gelombang dengan spektrum tertentu. Selain itu, untuk memperkirakan amplitudo puncak yang lebih representatif dari perilaku ekstrem, digunakan istilah “amplitudo signifikan” ( $\zeta_s$ ), yaitu rata-rata dari sepertiga amplitudo tertinggi dalam serangkaian periode gelombang. Amplitudo signifikan ini dapat dihitung dengan mengalikan  $\sqrt{m_0}$  dengan faktor skala yang sesuai, misalnya untuk spektrum gelombang biasa sekitar  $4\sqrt{m_0}$ , atau untuk respons gerakan kapal pada nilai tertentu. Dengan mengetahui RMS dan amplitudo signifikan, insinyur dapat mengevaluasi baik kondisi rata-rata maupun potensi gerakan ekstrem yang mungkin dialami oleh kapal.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1 Desain Bilge Keel

Dalam perancangan bilge keel, pertama-tama ditentukan panjang bilge keel (LPR) berdasarkan panjang keseluruhan kapal (LBP). Dengan LBP sebesar 34,71 m, digunakan koefisien  $C_{LPR}$  sebesar 50 %—nilai ini dipilih agar bilge keel tidak terlalu pendek sehingga redaman roll menjadi kurang efektif, dan tidak terlalu panjang sehingga menambah hambatan hidrodinamik secara signifikan. Dengan demikian, LPR dihitung sebagai  $0,5 \times 34,71 \text{ m} \approx 17,36 \text{ m}$ , yang dibulatkan menjadi 19 m agar lebih mudah diukur dan diproduksi. Nilai  $k = 0,98$  yang dipakai menunjukkan bahwa profil bilge keel yang dirancang mendekati bentuk membulat (round-edged), sehingga redaman roll yang diperoleh hampir sama dengan redaman dasar kapal tanpa keel, hanya berkurang sekitar 2 %. Ketebalan plat sebesar 6 mm dipilih untuk menjamin kekuatan struktural yang memadai saat kapal mengalami beban gelombang dan beban dinamis dari gerakan roll, sekaligus menjaga berat bilge keel agar tidak berlebihan. Lebar plat 30 cm adalah kompromi antara luas permukaan yang cukup untuk menghasilkan gaya redaman yang berarti dan minimnya kenaikan hambatan linier, karena semakin lebar bilge keel akan meningkatkan gaya tahan (drag) pada kecepatan tinggi.

Penempatan bilge keel dilakukan simetris di kedua sisi lambung, dengan panjang sepanjang 9,5 m mengarah ke haluan (fore) dan 9,5 m mengarah ke buritan (aft) dari titik tengah (midship). Posisi ini memastikan bahwa bilge keel menutupi area di mana amplitudo roll cenderung maksimum, yaitu di sekitar titik quarter-length kapal. Dengan total panjang 19 m, bilge keel tidak mencapai ujung ceruk lambung di haluan dan buritan, sehingga menghindari benturan saat kapal melonjak di ombak tinggi. Profil bilge keel yang digunakan berada di antara frame nomor 10 hingga frame nomor 29 pada lambung kapal. Rentang profil tersebut dipilih karena di daerah antara frame 10 sampai 29 permukaan lambung relatif lurus dan lebar, memungkinkan pemasangan bilge keel dengan sudut kemiringan yang konsisten dan distribusi tekanan hidrodinamika yang lebih merata. Secara keseluruhan, parameter-parameter ini—panjang sama dengan setengah LBP, koefisien  $k$  mendekati 1, ketebalan 6 mm, lebar 30 cm, serta penempatan antara frame 10–29—dirancang untuk menghasilkan bilge keel yang efektif meredam gerakan roll tanpa menimbulkan penambahan hambatan yang signifikan.



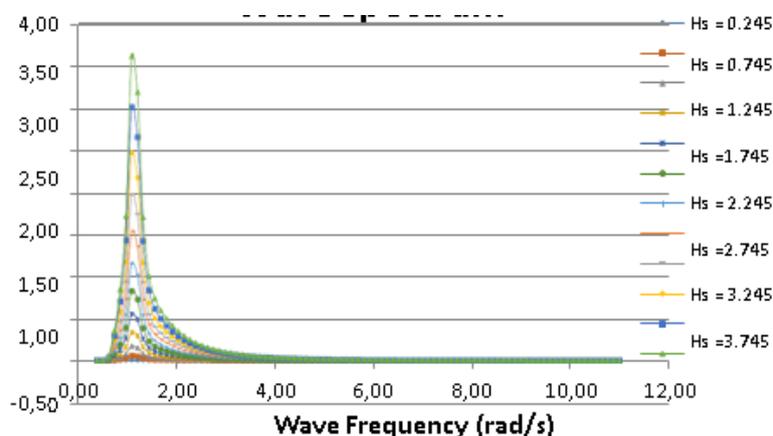
Gambar 8. Ukuran bilge keel crew boat

### 3.2 Hasil Spektrum Gelombang

Nilai puncak densitas energi pada spektrum JONSWAP dengan tinggi signifikan  $H_S=4,0$  m menunjukkan bahwa gelombang acak di perairan tertutup memiliki energi yang sangat terfokus pada rentang frekuensi tertentu. Ketika  $\gamma=3,3$ , yang merupakan nilai standar untuk kondisi laut lepas di Laut Utara, puncak  $S\zeta(\omega)$  mencapai sekitar  $5,0 \text{ m}^2/(\text{rad}/\text{det.})$ ; ini mengindikasikan konsentrasi energi yang sangat tajam pada frekuensi dominan. Dengan menurunkan  $\gamma$  menjadi  $2,5$  (nilai yang lebih sesuai untuk perairan tropis atau terbatas fetch), puncak spektrum menurun menjadi sekitar  $3,75 \text{ m}^2/(\text{rad}/\text{det.})$ , namun masih jauh di atas puncak spektrum dari model lain seperti Pierson–Moskowitz atau Bretschneider, yang cenderung menghasilkan puncak di bawah  $2,5 \text{ m}^2/(\text{rad}/\text{det.})$ . Perbedaan ini muncul karena  $\gamma$  mengatur “pengencangan” puncak spektrum: semakin tinggi  $\gamma$ , semakin sempit dan tinggi puncak energi, artinya lebih banyak gelombang berenergi tinggi terpusat di sekitar frekuensi puncak.

Pada grafik spektrum yang diplot, semua kurva yang menggunakan  $\gamma$  di atas ( $3,3$  dan  $2,5$ ) menempati wilayah lebih tinggi dibandingkan kurva spektrum lain—karena pada  $\gamma$  tinggi, model JONSWAP secara eksplisit mencerminkan kondisi fetch-limited dengan akumulasi energi di frekuensi dominan. Dalam konteks  $H_S=4,0$  m, puncak energi tersebut terletak sekitar frekuensi sudut  $0,55\text{--}0,70 \text{ rad}/\text{det.}$ , yang jika dihitung menjadi periode gelombang setara berkisar antara  $9$  sampai  $11$  detik ( $T=2\pi/\omega$ ). Rentang ini menunjukkan bahwa gelombang-gelombang dominan cenderung mempunyai periode sedang—cukup panjang untuk menghasilkan gaya dinamis signifikan pada struktur lepas pantai dan kapal, tetapi tidak terlalu panjang sehingga berperilaku seperti swell laut lepas.

Karena spektrum lain (misalnya spektrum Pierson–Moskowitz untuk laut lepas terbuka) biasanya memunculkan puncak densitas energi di bawah  $2,5 \text{ m}^2/(\text{rad}/\text{det.})$ , hasil JONSWAP dengan  $\gamma=3,3$  dan  $2,5$  menunjukkan peningkatan intensitas energi hampir dua kali lipat. Ini berarti, dalam perairan tertutup atau dengan fetch terbatas, gelombang-gelombang menengah (periode sekitar  $9\text{--}11$  detik) akan memproduksi gaya ayunan (heave, roll, pitch) yang lebih besar dibandingkan prediksi menggunakan spektrum lain. Insinyur dan perancang struktur seperti anjungan minyak, kapal, atau fasilitas terapung di wilayah tersebut perlu memperhatikan bahwa gelombang-gelombang frekuensi ini akan memiliki kontribusi terbesar pada momen redaman dan respons keseluruhan struktur. Dengan kata lain, untuk  $H_S=4,0$  m, lebih dari separuh energi gelombang total terkonsentrasi pada frekuensi antara  $0,55$  dan  $0,70 \text{ rad}/\text{det.}$ , sehingga perancangan sistem redaman roll atau perhitungan RAO harus difokuskan pada respons di frekuensi-frekuensi tersebut.



Gambar 9. Spektra gelombang JONSWAP

### 3.3 Perbandingan Nilai RMS

Berdasarkan grafik “Single Amplitude Average Heave (m)” versus “Significant Wave Height, H (m)” yang diberikan, kita dapat mengamati beberapa pola penting terkait bagaimana nilai RMS (root mean square) untuk gerakan heave berubah seiring peningkatan tinggi gelombang, dan bagaimana variasi sudut bilge keel mempengaruhi respons tersebut.

#### 1. Zona Gelombang Rendah ( $H \approx 0-1,5$ m):

Pada rentang tinggi gelombang hingga sekitar 1,5 m, kelima kurva—yaitu hull tanpa bilge keel (planning hull) dan hull dengan bilge keel pada sudut  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ , serta  $60^\circ$ —menunjukkan nilai heave yang relatif seragam, berkisar di sekitar 1,0–1,2 m. Ini menandakan bahwa pada gelombang kecil, penambahan bilge keel dengan berbagai sudut belum memberikan perbedaan signifikan pada amplitudo heave rata-rata. Semua konfigurasi masih “mengikuti” gelombang dengan respons serupa karena energi gelombang yang masuk masih cukup rendah dan kapal belum mengalami efek hidrodinamika nonlinier yang kuat akibat bilge keel.

#### 2. Zona Gelombang Menengah ( $H \approx 1,5-4$ m):

Begitu tinggi gelombang melewati kisaran 1,5 m, perbedaan antara hull tanpa bilge keel dan hull berbilge keel mulai muncul secara jelas:

- a. Hull Tanpa Bilge Keel (planning hull): Menskalakan heave secara lebih moderat. Pada  $H \approx 2$  m, nilai heave planning hull masih sekitar 1,1 m, lalu perlahan naik menjadi sekitar 1,3 m pada  $H \approx 2,5$  m, dan mencapai puncak kira-kira 1,5 m saat  $H$  mendekati 3 m. Di atas itu—sekitar  $H = 3,5$  m—planning hull menunjukkan gelombang kenaikan heave yang lebih teredam dibandingkan model bilge keel, dengan puncak di kisaran 1,7 m sebelum nilai heave-nya melandai.
- b. Hull dengan Bilge Keel Sudut  $15^\circ$  (merah): Mulai menampilkan peningkatan heave yang lebih cepat. Saat  $H \approx 2$  m, heave-nya sudah berada di sekitar 1,7 m, kemudian naik tajam hingga puncak  $\approx 2,0$  m pada  $H \approx 2,5$  m. Puncak tertinggi untuk konfigurasi  $15^\circ$  terjadi di sekitar  $H \approx 3,5$  m, yakni mencapai hampir 2,4 m. Ini menunjukkan bahwa bilge keel pada sudut  $15^\circ$  kurang efektif menahan dorongan gelombang menengah, sehingga heave-nya cenderung lebih besar.
- c. Hull dengan Bilge Keel Sudut  $30^\circ$  (hijau): Memiliki pola heave yang sedikit lebih rendah dibandingkan sudut  $15^\circ$  pada gelombang menengah. Pada  $H \approx 2$  m, heave-nya berada di kisaran 1,5 m; kemudian naik ke sekitar 1,8 m pada  $H \approx 2,5$  m, dan mencapai puncak  $\approx 2,1$  m ketika  $H \approx 3,5$  m. Meskipun demikian, perbedaannya dengan sudut  $15^\circ$  tidak terlalu besar pada  $H = 2-3$  m, namun pada  $H$  mendekati 3,5 m,  $30^\circ$  sedikit lebih rendah ( $\approx 2,1$  m) dibandingkan  $15^\circ$  ( $\approx 2,4$  m).
- d. Hull dengan Bilge Keel Sudut  $45^\circ$  (ungu): Menampilkan nilai heave terbesar di antara semua konfigurasi pada rentang  $H \approx 2-3,5$  m. Contohnya, di  $H \approx 2,5$  m puncak heave-nya sudah mendekati 2,2 m, kemudian meraih nilai tertinggi sekitar 2,5–2,6 m pada  $H \approx 3,5$  m. Hal ini mengindikasikan bahwa pada rentang gelombang menengah, sudut  $45^\circ$  justru menghasilkan peningkatan heave yang paling besar—mungkin karena profil dan orientasi bilge keel di sudut itu memicu interaksi hidrodinamika yang mendorong respons vertikal lebih kuat.
- e. Hull dengan Bilge Keel Sudut  $60^\circ$  (cyan/teal): Pola heave-nya berada di antara sudut  $30^\circ$  dan  $45^\circ$ . Saat  $H \approx 2$  m, heave-nya masih sekitar 1,6 m; lalu naik ke sekitar 2,0 m pada  $H \approx 2,5$  m, dan memuncak di kisaran 2,3 m pada  $H \approx 3,5$  m. Dengan demikian, sudut  $60^\circ$  memberikan

efek peredaman heave yang lebih baik dibandingkan  $45^\circ$ , tetapi masih kalah jika dibandingkan  $30^\circ$  atau  $15^\circ$  untuk gelombang yang sama.

Ringkasnya, pada **gelombang menengah** (1,5–4 m), semua model bilge keel menunjukkan peningkatan amplitudo heave yang lebih besar daripada hull tanpa bilge keel, dengan urutan besar puncak heave berturut-turut adalah sudut  $45^\circ$  (terbesar), lalu  $60^\circ$ , kemudian  $15^\circ$ , kemudian  $30^\circ$ , dan terakhir planning hull (paling rendah). Pola ini menunjukkan bahwa justru penambahan bilge keel pada sudut-sudut tertentu—khususnya di sekitar  $30^\circ$ – $45^\circ$ —dapat menghasilkan resonansi vertikal yang lebih kuat pada kapal, sehingga heave RMS-nya meningkat. Hal ini mungkin disebabkan karena orientasi bilge keel di sudut-sudut tersebut memicu perpindahan massa air dan efek gelombang yang mendorong bagian bawah lambung lebih kuat saat skippering pada frekuensi gelombang menengah.

3. Transisi Menuju Gelombang Tinggi ( $H \approx 4$  m ke atas):

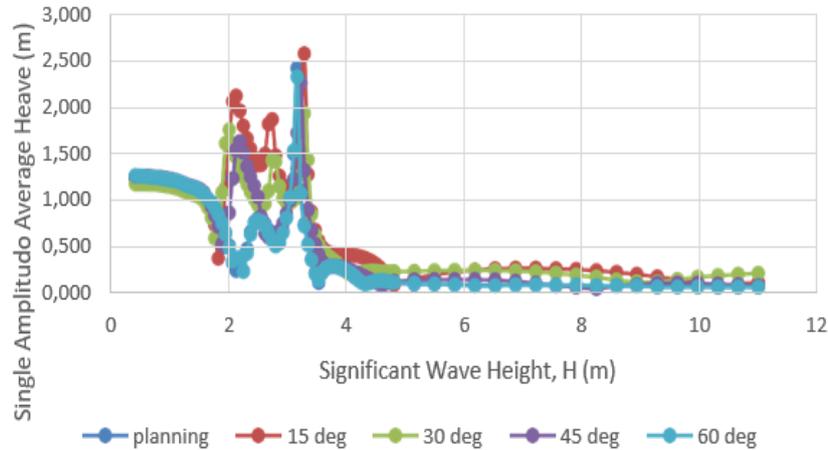
Setelah  $H$  melewati angka sekitar 4 m, nilai heave untuk semua konfigurasi tiba-tiba menurun tajam mendekati nol (mendekati garis sumbu-x) dan tetap rendah hingga  $H = 10$ – $11$  m. Penurunan mendadak ini bisa diinterpretasikan sebagai titik di mana kapal mulai “melempar” gelombang (wave breaking) atau keluar dari profil hidrodinamika normal—dalam arti bahwa tinggi gelombang sudah cukup besar sehingga kapal “bouncing” di puncak gelombang, mengurangi resonansi heave yang terukur pada tingkat yang sama. Dengan kata lain, saat gelombang sudah jauh melebihi tinggi tertentu (sekitar  $H = 4$  m), struktur gelombang acak menjadi terlalu tinggi untuk memicu peningkatan respons vertikal yang linier; kapal cenderung surfing atau part-out of phase, sehingga amplitudo rata-rata (RMS) terdeteksi menjadi sangat rendah.

4. Kesimpulan Umum dari Perbandingan Nilai RMS Heave:

- a. Hull tanpa bilge keel secara konsisten menghasilkan nilai heave RMS paling rendah pada gelombang menengah, menunjukkan bahwa tambahan bilge keel—walaupun dimaksudkan untuk meredam roll—justru meningkatkan respons heave pada rentang gelombang tertentu.
- b. Sudut  $45^\circ$  memunculkan “resonansi” tertinggi dalam heave pada gelombang 2–3,5 m, sehingga paling tidak cocok apabila tujuan utamanya adalah menekan gerakan vertikal.
- c. Sudut  $30^\circ$  memberikan kompromi yang paling moderat: puncak heave-nya tidak setinggi  $45^\circ$  atau  $60^\circ$ , namun tetap lebih tinggi daripada  $15^\circ$  pada  $H \approx 2,5$  m. Dengan demikian, jika bilge keel diperlukan namun ingin meminimalkan dampak heave, sudut sekitar  $30^\circ$  bisa menjadi pilihan yang lebih baik dibandingkan  $45^\circ$ .
- d. Lebih jauh, di atas  $H \approx 4$  m, semua konfigurasi memperlihatkan penurunan drastis, yang menandakan bahwa pada kondisi gelombang sangat tinggi, perbedaan sudut bilge keel tidak lagi signifikan memengaruhi RMS heave karena dinamika kapal sudah memasuki regime di mana kapal “mendaki” puncak gelombang atau bahkan dikeluarkan dari resonansi normalnya.

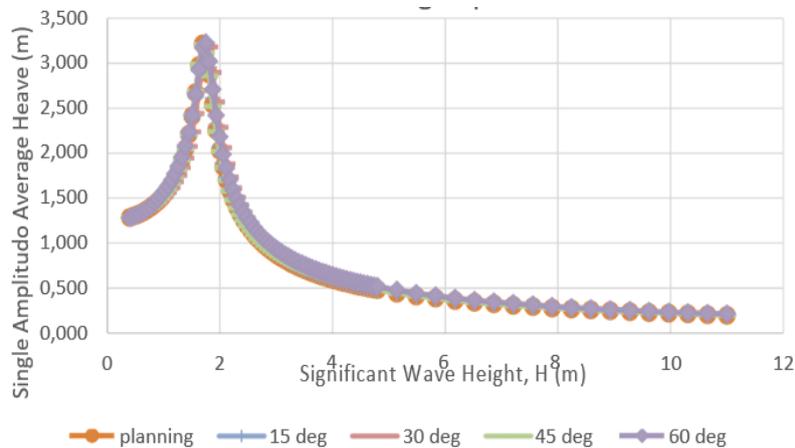
Secara keseluruhan, grafik ini menunjukkan bahwa dalam mendesain bilge keel, tidak hanya aspek redaman roll yang perlu diperhatikan, tetapi juga potensi peningkatan respons heave pada frekuensi gelombang menengah—terutama ketika sudut bilge keel mendekati  $45^\circ$ . Untuk kondisi operasi yang didominasi oleh gelombang dengan tinggi signifikan sekitar 2–3 m, bilge keel dengan sudut kecil (misalnya  $15^\circ$ – $30^\circ$ ) akan lebih efektif untuk menekan heave RMS dibandingkan sudut  $45^\circ$  atau  $60^\circ$ . Pada akhirnya, pilihan sudut pemasangan perlu mempertimbangkan trade-off antara meredam roll dan

menjaga agar gerakan vertikal tidak meningkat drastis di kisaran gelombang yang paling sering dihadapi.



Gambar 10. RMS gerakan *heaving*

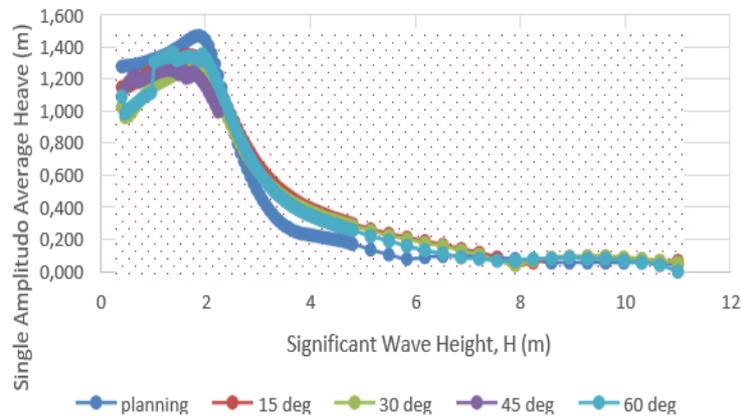
Pada gambar 10 menggambarkan hasil perhitungan dari RMS pada kapal crewboat dari variasi model yang telah dilakukan, dimana gerakan *heaving* mengalami kenaikan dengan nilai tertinggi berada pada variasi *bilge keel* sudut  $15^\circ$  mengalami kenaikan yaitu 2,630 m, *bilge keel* sudut  $30^\circ$  mengalami kenaikan yaitu 2,455 m, *bilge keel* sudut  $45^\circ$  yang mengalami kenaikan yaitu 2,438 m, lambung *planning* mengalami kenaikan yaitu 2,480m, *bilge keel* sudut  $60^\circ$  yang mengalami kenaikan yaitu 2,461 m sehingga dapat di simpulkan bahwa bilga  $45^\circ$  memiliki nilai yang rendah dibandingkan kelima model lambung kapal.



Gambar 11. RMS gerakan *rolling*

Pada Gambar 11 terlihat kurva nilai RMS gerakan roll kapal sebagai fungsi tinggi gelombang signifikan ( $H$ ). Secara umum, setiap konfigurasi lambung—baik tanpa bilge keel (*planning hull*) maupun dengan berbagai sudut bilge keel—memperlihatkan puncak RMS roll pada rentang  $H$  sekitar 2 m, sebelum kemudian menurun secara relatif tajam saat  $H$  terus bertambah. Jika kita meninjau nilai puncak tertinggi dari kelima konfigurasi, urutan besar RMS roll (dalam meter) pada  $H$  khusus tersebut Pada puncak gelombang sekitar 2 m, lambung tanpa bilge keel (*planning hull*) menunjukkan RMS roll tertinggi (3,481 m). Penambahan bilge keel menurunkan nilai ini: sudut  $15^\circ$  menjadi 3,370 m,  $30^\circ$  menjadi 3,358 m,  $45^\circ$  terendah di 3,233 m, dan  $60^\circ$  sedikit naik kembali ke sekitar 3,240 m. Artinya, bilge keel efektif meredam roll, dengan sudut  $45^\circ$  sebagai titik optimal untuk kondisi gelombang

menengah. Setelah gelombang melebihi ~3–4 m, nilai RMS roll menurun drastis untuk semua konfigurasi, sehingga perbedaan sudut bilge keel menjadi kurang signifikan pada gelombang sangat tinggi.



Gambar 12. RMS gerakan pitching

Pada Gambar 12 menggambarkan hasil perhitungan RMS gerakan *Pitching* mengalami kenaikan dengan nilai tertinggi berada pada variasi *bilge keel* sudut  $15^\circ$  mengalami kenaikan yaitu 1,398 m, *bilge keel* sudut  $30^\circ$  mengalami kenaikan yaitu 2,455 m, *bilge keel* sudut  $45^\circ$  yang mengalami kenaikan yaitu 1,215 m, lambung planning mengalami kenaikan yaitu 1,537 m, *bilge keel* sudut  $60^\circ$  yang mengalami kenaikannya yaitu 1,261 m sehingga dapat disimpulkan bahwa bilga  $45^\circ$  memiliki nilai yang rendah dibandingkan kelima model lambung kapal.

#### 4. KESIMPULAN

Berdasarkan analisis nilai RMS untuk gerakan heave, roll, dan pitch pada kapal crew boat dengan variasi sudut bilge keel  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ , dan  $60^\circ$ , serta perbandingan dengan lambung planning tanpa bilge keel, dapat disimpulkan bahwa bilge keel dengan sudut  $45^\circ$  memberikan pengurangan respons dinamis paling signifikan. Untuk heave, lambung planning mencapai RMS sebesar 2,480 m, sedangkan bilge keel sudut  $45^\circ$  hanya menghasilkan 2,438 m. Pada gerakan roll, lambung tanpa bilge keel memiliki RMS tertinggi 3,481 m, sementara bilge keel  $45^\circ$  menurunkan nilai ini hingga 3,233 m. Demikian pula pada gerakan pitch, lambung planning mencatat RMS 1,537 m, sedangkan bilge keel sudut  $45^\circ$  hanya 1,215 m. Dengan demikian, konfigurasi bilge keel pada sudut  $45^\circ$  terbukti paling efektif dalam meredam ketiga mode gerakan, sehingga menjadi pilihan optimal untuk meningkatkan stabilitas dan kenyamanan kapal.

#### UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan apresiasi yang setinggi-tingginya kepada seluruh kolega di Jurusan Teknik Perkapalan dan Jurusan Kemaritiman Politeknik Negeri Bengkalis atas kerja sama dan dukungan yang telah diberikan sepanjang penelitian ini.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Saputra, U. Budiarto, and G. Rindo, "Analisa Pengaruh Bilge Keel Tipe Bulb Terhadap Lambung V Dan U Pada Kapal Patroli Dengan Menggunakan Metode Computational Fluid Dynamic (CFD)," *Jurnal Teknik Perkapalan*, vol. 7, no. 1, Jan. 2019.
- [2] Bhattacharyya, R. 1972. Dynamics of Marine Vehicles. John Wileys & Sons, New York.

- [3] Djatmiko, E.B. 2003. "Perilaku Bangunan Apung di Atas Gelombang". Jurusan Teknik Kelautan ITS, Surabaya.
- [4] H. Hendratmoko and I. K. A. P. Utama, "Studi Eksperimen Pengaruh Lunas Bilga Terhadap Gerakan Rolling," *Digilib ITS*, vol. 12, no. 3, pp. 94–97, 2012.
- [5] Imam.M, "Pengembangan Geometri Lunas Bilga Untuk Meningkatkan Performa Kapal Ikan Tradisional" *Kapal*, vol. 4, no. 4, pp-756, 2016
- [6] Ganang Adi Baskoro, B.A Adiyeta, dan Eko Sasmito Hadi (2018), Analisa pengaruh pemasangan bilge keel dengan variasi kecepatan terhadap hambatan gelombang, viskos dan gesek serta olah gerak dan stabilitas pada kapal ikan tradisional 70 GT (Universitas Diponegoro).
- [7] Kristian Bendix Nielsen., Stefan Mayer. 2004. "Numerical prediction of green water incident". *Technical University of Denmark*, Denmark.
- [8] Rawson, K. E. 2001. Basic Ship Theory, Volume 1, *Fifth Edition*. *Butterworth Heinemann. Oxford* 5 Kapal Patroli Pilot Boat 15 Meter," *Kapal*, vol. 7, no. 2, pp. 1-8, 2017
- [9] Oni, R., & Utama, I. K. A. P. (2015). Analisa pengaruh bentuk lambung axe bow pada kapal high speed craft terhadap hambatan total. *Kapal: Jurnal Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Kelautan*, 12(2), 78-87.
- [10] Xantiano.S, "Analisa Pengaruh Geometri Lunas Bilgaterhadap Performa Kapal pada Kapal Patroli Pilot Boat 15 Meter," *Kapal*, vol. 7, no. 2, pp. 1-8, 2017
- [11] Suzuki, R., Ueno, M., & Tsukada, Y. (2021). Numerical simulation of 6-degrees-of-freedom motions for a manoeuvring ship in regular waves. *Applied Ocean Research*, 113, 102732. <https://doi.org/10.1016/J.APOR.2021.102732>.
- [12] Hou, L., Wang, X., Sun, H., Sun, Y., & Wei, Z. (2024). A long sequence time-series forecasting model for ship motion attitude based on informer. *Ocean Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117861>.
- [13] Prendergast, J., Li, M., & Sheng, W. (2020). A Study on the Effects of Wave Spectra on Wave Energy Conversions. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 45, 271-283. <https://doi.org/10.1109/JOE.2018.2869636>.
- [14] Yang, S., Deng, X., Zhang, M., & Xu, Y. (2023). Effect of wave spectral variability on the dynamic response of offshore wind turbine considering soil-pile-structure interaction. *Ocean Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.113222>.
- [15] Qu, X., Yao, Y., & Du, J. (2022). A comparison study on the hydrodynamic performance of a buoyancy-distributed floating foundation in regular waves. *Ocean Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111166>.