

BAB IV PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan pelaksanaan penelitian sesuai diagram alir pada Bab III (Gambar 3.4) dan pembahasan hasilnya. Setiap perangkat lunak pada Subbab 3.2 dipakai pada tahap tertentu dan menghasilkan keluaran yang menjadi masukan tahap berikutnya, sebagaimana diringkaskan pada Tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Ringkasan penggunaan perangkat lunak pada penelitian ini

Perangkat lunak	Tahap penggunaan	Masukan	Keluaran	Subbab
Maxsurf Modeler	Pemodelan lambung dan validasi koefisien bentuk	Lines plan dan principal dimension	Model lambung 3D; Cb, Cp, Cm, Cw	4.1.2, 4.1.4
Rhinoceros	Perbaikan surface dan penambahan rudder dan skeg	Model dari Maxsurf Modeler	Surface tertutup siap di-mesh	4.1.3
Maxsurf Stability	Penentuan kondisi muat (arrival condition)	LWT, tangki, dan Rencana Umum	Δ , LCG, VCG (KG), GM	4.1.5
SolidWorks	Perhitungan momen inersia massa	Model lambung, sarat 2,4 m, dan COG yang di-override sesuai LCG/VCG	Ixx, Iyy, Izz dan Kxx, Kyy, Kzz	4.2.1
ANSYS AQWA (Hydrodynamic Diffraction)	RAO dan uji konvergensi mesh	Geometri, Point Mass, dan pengaturan gelombang	RAO 6 DOF, hidrostatis	4.2
ANSYS AQWA (Hydrodynamic Response)	Simulasi roll decay test 68 skenario	Hasil difraksi, parameter bilge keel, dan sudut awal	Time history sudut roll	4.3
Skrip Python	Ekstraksi Tn, B1, B2, dan ζ dengan tiga metode	Time history sudut roll	Tabel koefisien redaman	4.4

4.1 Permodelan Kapal

4.1.1 Data Principal Dimension dan Lines Plan Kapal Ikan

Kapal ikan yang menjadi objek penelitian memiliki data utama (principal dimension) sebagai berikut:

Tabel 4. 2 Data Utama Kapal

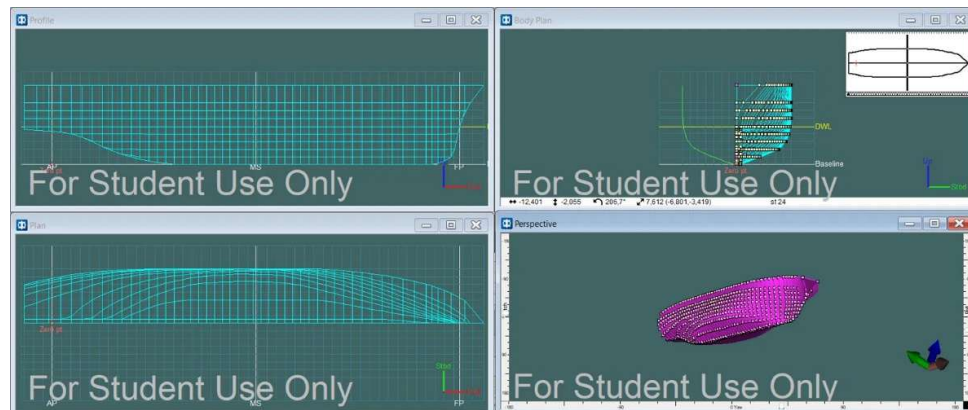
Parameter	Nilai	Satuan
Length Overall (LOA)	29,0	m
Length Water Line (LWL)	27,98	m
Length Between Perpendicular (LPP)	26,18	m
Breadth (B)	7,0	m
Depth (H)	3,1	m
Draft (T)	2,4	m
Gross Tonnage (GT)	120	-
Kecepatan Dinas	10	knot

Koefisien bentuk kapal berdasarkan lines plan adalah $C_b = 0,419$; $C_p = 0,581$; $C_m = 0,723$; dan $C_w = 0,729$. Lines plan kapal terdiri dari Body Plan, Sheer Plan, dan Half Breadth Plan yang menjadi acuan pemodelan pada Maxsurf Modeler.

Rasio dimensi utama pada Tabel 4.2 memberi gambaran karakter lambung: $L/B = 26,18/7,0 \approx 3,74$ dan $B/T = 7,0/2,4 \approx 2,92$. Lambung yang relatif lebar terhadap sarat ini konsisten dengan nilai GM yang cukup besar ($\approx 1,5$ m; Subbab 4.2.1), sehingga kapal bersifat kaku (stiff) terhadap roll dan periode natural roll-nya relatif pendek (≈ 4 detik; Subbab 4.4). Kondisi sarat $T = 2,4$ m dipertahankan konstan pada seluruh simulasi sehingga geometri bidang basah tidak menjadi variabel tambahan.

4.1.2 Permodelan Lambung pada Maxsurf Modeler

Model lambung kapal dibangun pada Maxsurf Modeler berdasarkan data lines plan pada Subbab 4.1.1. Gambar 4.1 menunjukkan hasil pemodelan pada empat tampilan (Profile, Body Plan, Plan, dan Perspective).

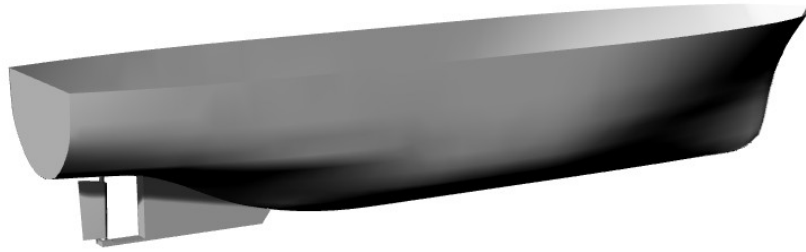


Gambar 4. 1 Hasil Permodelan di Maxsurf Modeler

Hasil pemodelan menunjukkan bentuk lambung yang mengikuti karakteristik umum kapal ikan, dengan bentuk buritan (*stern*) landai pada Profile view dan bentuk midship yang relatif U-shaped pada Body Plan, sebagaimana umum dijumpai pada kapal ikan untuk mengoptimalkan ruang muat/palka.

4.1.3 Penyempurnaan Geometri pada Rhinoceros

Model lambung hasil ekspor Maxsurf Modeler disempurnakan pada Rhinoceros melalui dua tahap: perbaikan kualitas surface (surface fairing) untuk menghilangkan cacat permukaan yang berpotensi mengganggu proses meshing, serta penambahan komponen appendage kapal berupa rudder (kemudi) dan skeg, yang belum tercakup dalam model dasar hasil Maxsurf Modeler. Gambar 4.2 menunjukkan hasil akhir model geometri kapal setelah penambahan rudder dan skeg tersebut.



Gambar 4. 2 Model lambung kapal hasil penyempurnaan di Rhinoceros, dengan penambahan rudder dan skeg pada bagian buritan

Model pada Gambar 4.2 inilah yang diekspor ke ANSYS AQWA sebagai geometri bidang basah pada seluruh tahap analisis (uji konvergensi mesh, Hydrodynamic Diffraction, dan Hydrodynamic Response), sehingga model NOBK dan model berbilge keel berbeda hanya pada parameter bilge keel dan untuk design rudder dan skeg dibuat sama yang kemudian diinput di AQWA (Subbab 4.3.1).

4.1.4 Validasi Hidrostatik Model

Model hasil pemodelan divalidasi terhadap koefisien bentuk dari lines plan, menggunakan hasil perhitungan hidrostatik dari menu Hydrostatics bawaan Maxsurf Modeler pada sarat 2,4 m (Gambar 4.3). Koefisien C_b , C_p , C_m , dan C_w pada Tabel 4.3 diambil dari keluaran tersebut dan dibandingkan dengan nilai pada lines plan

	Measurement	Value	Units
1	Displacement	195,6	t
2	Volume (displaced)	190,790	m ³
3	Draft Amidships	2,400	m
4	Immersed depth	2,400	m
5	Immersed depth of station w	2,400	m
6	Immersed depth amidships	2,400	m
7	WL Length	27,971	m
8	Beam max extents on WL	6,826	m
9	Beam max on WL	6,826	m
10	Beam extents on WL of stati	6,826	m
11	Beam on WL of station with	6,826	m
12	Beam extents on WL amidsh	6,820	m
13	Beam on WL amidships	6,820	m
14	Wetted Area	189,742	m ²
15	Max sect. area	11,842	m ²
16	Sect. area amidships	11,823	m ²
17	Waterpl. Area	136,593	m ²
18	Waterpl. box (trans.)	382,506	m ⁴
19	Waterpl. lyy (long.)	5833,812	m ⁴
20	Prismatic coeff. (Cp)	0,576	
21	Block coeff. (Cb)	0,416	
22	Max Sect. area coeff. (Cm)	0,723	
23	Waterpl. area coeff. (Cwp)	0,715	
24	LCB length	12,859	from z
25	LCF length	11,401	from z
26	LCB %	45,974	from z
27	LCF %	40,762	from z
28	VCB	1,506	m
29	TCB	0,000	m

Gambar 4. 3 Hasil Hidrostatik dari Maxsurf Modeler

Tabel 4. 3 Validasi Koefisien

Koefisien	Nilai Lines Plan	Nilai Model Maxsurf Modeler	Selisih (%)
Cb	0,419	0,416	0,716%
Cp	0,581	0,576	0,861%
Cm	0,723	0,723	0,000%
Cw	0,729	0,715	1,920%

Seluruh koefisien menunjukkan kesesuaian yang baik, dengan selisih tertinggi pada Cw (1,920%) dan Cb/Cp/Cm di bawah 1%. Seluruh nilai berada dalam batas toleransi yang umum digunakan pada validasi model kapal (di bawah 2%). Berdasarkan hasil ini, model dinyatakan valid dan layak digunakan untuk tahap simulasi hidrodinamis selanjutnya

4.1.5 Prosedur Penentuan VCG Menggunakan Maxsurf Stability

A. Input Lightweight (LWT) dan Titik Beratnya

Langkah pertama adalah memasukkan Lightweight (LWT) kapal — yaitu berat kapal kosong tanpa muatan, bahan bakar, air tawar, kru, maupun perbekalan (terdiri dari berat baja/konstruksi, permesinan, dan perlengkapan/outfitting). Pada menu **Weights & Tanks Maxsurf Stability**, LWT diinput sebagai satu item berat dengan tiga komponen titik berat:

- LCG_LWT (titik berat memanjang)
- VCG_LWT (titik berat vertikal/tinggi dari baseline)
- TCG_LWT (titik berat melintang, umumnya 0 untuk kapal simetris)

LIGHTWEIGHT (SAY)	95.81	TON
LONG. CENTRE OF GRAVITY FROM AP	10.19	MEETER
VERT. CENTRE OF GRAVITY ABOVE BL	1.65	MEETER

Gambar 4. 4 Data LWT sumber: Data Lapangan

B. Pemodelan Tangki Sesuai Rencana Umum (General Arrangement)

Setiap tangki yang tercantum pada Rencana Umum kapal dimodelkan sebagai objek tangki terpisah di **Maxsurf Stability (Add Tank)**, masing-masing dengan parameter:

Parameter	Keterangan
Jenis fluida	Bahan bakar (fuel oil), air tawar (fresh water), air laut/ballast, hasil tangkapan (fish hold), dll.
Kapasitas maksimum	Volume tangki (m ³), sesuai gambar Rencana Umum
Posisi (LCG, VCG, TCG)	Lokasi geometris tangki pada kapal, sesuai Rencana Umum
Densitas fluida	Menentukan berat aktual dari volume yang diisi

Untuk penelitian ini, tangki yang relevan meliputi (d disesuaikan dengan Rencana Umum kapal ikan objek penelitian):

- Tangki Bahan Bakar (Fuel Oil Tank)
- Tangki Air Tawar (Fresh Water Tank)
- Palka Ikan (Fish Hold)

Tangki lain sesuai Rencana Umum (ballast, minyak lumas, dll., jika ada)

Item Name	Quantity	Unit Mass Tonnes	Total Mass Unit(Tonnes	Units Volume M^3	Total Volume M^3	Long Arm m.	Trans Arm m.	Vert Arm m.	Total FSM Tonnase
Lightship	1	95,81	95,81			10,19	0	1,65	0
FWT 2 SB	35%	1,411	0,494	1,411	0,494	0,22	1,554	2,583	0,324
FWT 2 PS	35%	1,411	0,494	1,411	0,494	0,22	-1,554	2,583	0,324
FWT 1 SB	35%	5,192	1,817	5,192	1,817	4,655	2,153	2,151	0,934
FWT 1 PS	35%	5,192	1,817	5,192	1,817	4,655	-2,153	2,151	0,934
FOT 4 SB	15%	8,484	1,273	8,984	1,348	9,441	2,147	1,093	1,095
FOT 4 PS	15%	8,484	1,273	8,984	1,348	9,441	-2,147	1,093	1,095
DOT	40%	0,554	0,222	0,587	0,235	7,248	-0,799	0,46	0,04
BILGE	0%	0,601	0	0,587	0	7,793	0,334	0,152	0
SEAWAGE	100%	1,845	1,845	2,02	2,02	9,575	0	0,556	0
WBT	50%	4,68	2,34	4,566	2,283	24,608	0	1,44	0,939
FS 3	100%	18,653	18,653	21,945	21,945	13,725	-1,3	2,05	0
FS 2	100%	20,753	20,753	24,415	24,415	13,723	1,424	2,051	0
FS 1	100%	43,368	43,368	51,022	51,022	18,891	0	2,1	0
FOT 3 PS	5%	6,466	0,323	6,847	0,342	13,738	0,25	0,111	6,061
FOT 3 SB	5%	6,466	0,323	6,847	0,342	13,738	-0,25	0,111	6,061
FOT 2 PS	5%	3,464	0,173	3,668	0,183	17,592	0,228	0,104	1,947
FOT 2 SB	5%	3,464	0,173	3,668	0,183	17,592	-0,228	0,104	1,947
FOT 1 PS	5%	2,544	0,127	2,694	0,135	20,723	0,157	0,093	0,55
FOT 1 SB	5%	2,544	0,127	2,694	0,135	20,723	-0,157	0,093	0,55
MUD BOX	80%	0,438	0,351	0,48	0,384	23,3	0	1,2	0,047
Total Loadcase			196,625	168,945	116,098	12,806	0,026	1,824	23,639
FS correction								0,12	
VCG fluid								1,945	

C. Penetapan Kondisi Muatan — Kondisi Kedatangan (Arrival Condition)

Setelah seluruh tangki dimodelkan, kondisi muatan spesifik ditetapkan melalui fitur Loadcase Maxsurf Stability, dengan mengatur persentase isi (%) tiap tangki sesuai skenario operasional yang ditinjau. Untuk Kondisi Kedatangan (Arrival Condition) — yaitu kondisi kapal saat tiba kembali di pelabuhan setelah operasi penangkapan ikan — persentase pengisian tangki umumnya mengikuti logika operasional berikut:

Tangki	Kondisi Kedatangan (%)	Alasan
Fish Hold (Palka Ikan)	100%	Palka penuh berisi hasil tangkapan saat kapal kembali ke pelabuhan
Bahan Bakar	Sisa minimum	Bahan bakar telah terpakai sepanjang operasi penangkapan
Air Tawar	Sisa minimum	Air tawar telah terpakai untuk kebutuhan awak selama operasi

D. Hasil Otomatis dari Maxsurf Stability

Setelah seluruh item berat (LWT + tangki-tangki pada persentase isi yang ditetapkan) dimasukkan, Maxsurf Stability secara otomatis menjumlahkan seluruh berat dan momen vertikal menggunakan prinsip kesetimbangan momen berat:

$$VCG_{total} = \frac{\sum (W_i \times VCG_i)}{\sum W_i} \quad (29)$$

dengan i mencakup LWT dan seluruh tangki pada kondisi pengisian yang ditetapkan. Nilai VCG hasil perhitungan inilah (bersama Displacement total) yang kemudian digunakan sebagai input KG pada perhitungan hidrostatik ($GM = KM - KG$) dan selanjutnya diteruskan sebagai parameter Point Mass pada model ANSYS AQWA (Subbab 4.2.1).

4.2 Proses Analisis di Ansys Aqwa Hydrodynamic Diffraction

4.2.1 Persiapan Model dan Definisi Properti Massa

Properti massa kapal yang diinput pada modul Point Mass ANSYS AQWA adalah sebagai berikut:

Parameter	Nilai	Satuan
Displacement (Δ)	195.900	kg
LCG (dari titik referensi)	11,877	m
VCG (dari sarat)	-0,431	m
KG	1,969	m
GM	1,5140647	m
Kxx	2,169851725	m
Kyy	6,990182962	m
Kzz	7,081940155	m

Radius girasi (K_{xx} , K_{yy} , K_{zz}) diperoleh dari perhitungan momen inersia massa menggunakan fitur Mass Properties SolidWorks, dengan titik referensi pusat gravitasi di-override agar sesuai lokasi LCG/VCG desain kapal. Verifikasi konsistensi menunjukkan bahwa momen inersia (I_{xx} , I_{yy} , I_{zz}) yang diperoleh dari perkalian Displacement $\times K^2$ sesuai dengan matriks momen inersia keluaran SolidWorks ($I_{xx} = 922.347,45 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$; $I_{yy} = 9.572.194,67 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$; $I_{zz} = 9.825.144,38 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$), mengonfirmasi tidak ada kesalahan konversi.

4.2.2 Uji Konvergensi Mesh Panel

Uji independensi mesh dilakukan pada kondisi NOBK, draft 2,4 m, dengan variasi ukuran elemen pada permukaan basah kapal. Untuk efisiensi komputasi, uji ini dilakukan khusus pada satu arah gelombang (90° /beam sea), karena RAO roll paling relevan dan paling responsif pada kondisi tersebut, sebagaimana dibahas pada Subbab 4.2.5. Parameter pembanding yang digunakan adalah nilai puncak RAO roll.

Ukuran Elemen (m)	Total Elements	Total Nodes	Puncak RAO Roll (deg/m)	Selisih vs Mesh Sebelumnya
0,4	2.548	2.629	109.380	-
0,3	4.410	4.520	109.956	0,53%
0,2	10.015	10.177	110.462	0,46%

Gambar 4. 5 Konvergensi Mesh Panel

Hasil menunjukkan tren konvergensi yang baik dan stabil selisih puncak RAO antar ukuran mesh berurutan berada pada kisaran 0,46%–0,53%, jauh di bawah ambang toleransi 2% yang ditetapkan sebagai kriteria konvergensi (Subbab 3.4.2). Karena selisih sudah kecil dan stabil (tidak menunjukkan tren perubahan signifikan lebih lanjut), serta mempertimbangkan efisiensi waktu komputasi untuk 68 skenario simulasi utama, ukuran elemen 0,2 m ditetapkan sebagai mesh final yang digunakan pada seluruh simulasi Hydrodynamic Diffraction dan Hydrodynamic Response dalam penelitian ini.

4.2.3 Analysis Settings

Pengaturan analisis pada modul Hydrodynamic Diffraction adalah sebagai berikut:

Tabel 4. 4 Common Analysis Options:

Parameter	Nilai
Parallel Processing	Program Controlled
Include Multi-Directional Wave Interaction	Yes
Near Field Solution	Program Controlled
Linearized Morison Drag	No
Calculate Full QTF Matrix	No

Tabel 4. 5 Wave Directions:

Parameter	Nilai
Type	Range of Directions, No Forward Speed
Wave Range	-180° hingga 180°
Interval	45° (9 arah gelombang, termasuk 90°/beam sea)

Tabel 4. 6 Wave Frequencies:

Parameter	Nilai
Lowest Frequency	0,1 rad/s (periode terpanjang 62,83185 s)
Highest Frequency	4 rad/s (periode terpendek 1,5708 s)
Jumlah Titik Frekuensi	100 titik
Interval Frekuensi	0,03939 rad/s

Rentang dan jumlah titik frekuensi ini konsisten dengan data Response Amplitude Operator (RAO) yang diperoleh (Subbab 4.2.5), yang juga terdiri dari

100 titik pada rentang frekuensi yang sama mengonfirmasi tidak ada kejanggalan antara pengaturan analisis dan hasil yang diperoleh.

4.2.4 Hasil Hidrostatik dan Validasi terhadap Maxsurf Stability

Hasil hidrostatik dari ANSYS AQWA (pada draft 2,4 m) dibandingkan dengan hasil Maxsurf Stability sebagai berikut:

Tabel 4. 7 Validasi Hidrostatik

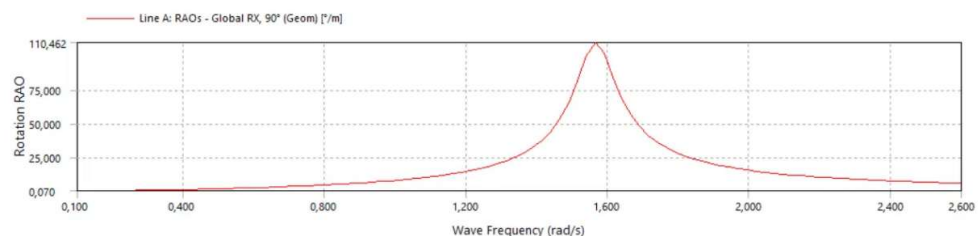
Parameter	Maxsurf Stability	ANSYS AQWA	Selisih (%)
GM	1,5 m	1,5140647 m	0,94%
LCB (dari titik referensi)	12,916 m	12,713403 m	1,57%
LCF (dari titik referensi)	11,877 m	11,399682 m	4,02%

GM dan LCB menunjukkan konsistensi yang baik (selisih di bawah 2%) antara kedua perangkat lunak. LCF menunjukkan selisih yang lebih besar (4,02%), yang kemungkinan disebabkan oleh perbedaan titik referensi pengukuran atau metode numerik antara Maxsurf Stability dan AQWA. Secara keseluruhan, ketiga parameter menunjukkan konsistensi yang cukup baik antar kedua perangkat lunak, mendukung keandalan model yang digunakan.

Sebagai catatan tambahan, laporan hidrostatik AQWA melaporkan Volumetric Displacement Aktual sebesar 193,19591 m³ dan Volumetric Displacement Ekuivalen (dari massa yang diinput, dengan densitas air laut 1,025 t/m³) sebesar 191,12195 m³, dengan selisih 1,085% yang konsisten dengan Out of Balance Force (FZ) sebesar $1,0852 \times 10^{-2}$ (1,09%) yang dilaporkan langsung oleh AQWA. Nilai ini berada dalam batas wajar dan mengindikasikan model dalam kondisi kesetimbangan (in balance) yang baik.

4.2.5 Hasil Response Amplitude Operator (RAO) Kapal Ikan

RAO roll dihitung pada kondisi *beam sea* (arah gelombang 90°) untuk kondisi NOBK pada draft 2,4 m, dengan rentang frekuensi 0,1–4,0 rad/s (100 titik data). Hasil menunjukkan puncak RAO roll sebesar 112,99 deg/m pada frekuensi 1,557580 rad/s, setara dengan periode 4,034 detik.



Gambar 4. 6 Kurva RAO Roll pada beam sea (90°), kondisi NOBK, draft 2,4 m menunjukkan puncak resonansi tajam pada 1,5576 rad/s]

Bentuk kurva RAO menunjukkan puncak resonansi yang tajam dan tinggi, karakteristik umum RAO roll berbasis *potential-flow* tanpa tambahan redaman viscous eksplisit pada tahap Hydrodynamic Diffraction. Terdapat pula gundukan sekunder kecil pada frekuensi sekitar 3,2–3,3 rad/s yang kemungkinan merupakan artefak numerik (*irregular frequency*) yang umum dijumpai pada metode panel, namun tidak memengaruhi interpretasi puncak resonansi utama.

Sebagai pemeriksaan konsistensi internal, periode resonansi RAO (4,034 detik) dibandingkan dengan periode natural roll hasil roll decay test pada kondisi NOBK (4,058 detik), menghasilkan selisih hanya 0,59% menunjukkan konsistensi yang sangat baik antara modul Hydrodynamic Diffraction dan Hydrodynamic Response.

4.3 Proses Analisis di Ansys Aqwa Hydrodynamic Response (Roll Decay Test)

4.3.1 Setup Time Response Analysis dan Kondisi Awal

Roll decay test dilakukan pada modul Hydrodynamic Response dengan pemberian simpangan sudut awal (initial heel angle) sebesar 5°, 10°, 15°, dan 20°, kemudian kapal dibiarkan berosilasi bebas tanpa gaya luar. Simulasi menggunakan time step (interval pencatatan) sebesar 0,1 detik untuk seluruh skenario, dengan durasi total simulasi yang dibedakan menjadi:

- Kondisi NOBK (tanpa bilge keel): durasi 50 detik
- Kondisi dengan bilge keel: durasi 40 detik

Perbedaan durasi ini didasarkan pada kriteria dari literatur bahwa durasi roll decay test perlu mencakup lebih dari 8 periode osilasi agar peluruhan amplitudo dapat teridentifikasi dengan baik. Berdasarkan periode natural roll (T_n) yang diperoleh (Subbab 4.4), durasi yang digunakan mencakup:

Kondisi	Durasi	T_n	Jumlah Periode Tercakup
NOBK	50 detik	4,058 detik	12,32 periode
Dengan bilge keel (T_n terbesar, 4,095 detik)	40 detik	4,095 detik	9,77 periode

Kedua kondisi telah memenuhi kriteria minimum 8 periode osilasi tersebut. Durasi yang lebih panjang pada kondisi NOBK (50 detik, dibandingkan 40 detik pada skenario berbilge keel) memberikan jumlah siklus osilasi yang lebih banyak, yang terbukti meningkatkan presisi estimasi koefisien redaman kuadratik (B_2) pada kondisi tersebut (Subbab 4.4.4) mengingat redaman pada kondisi NOBK jauh lebih kecil sehingga memerlukan lebih banyak siklus untuk teridentifikasi dengan baik secara statistik.

4.3.2 Skema Variasi Konfigurasi Bilge Keel

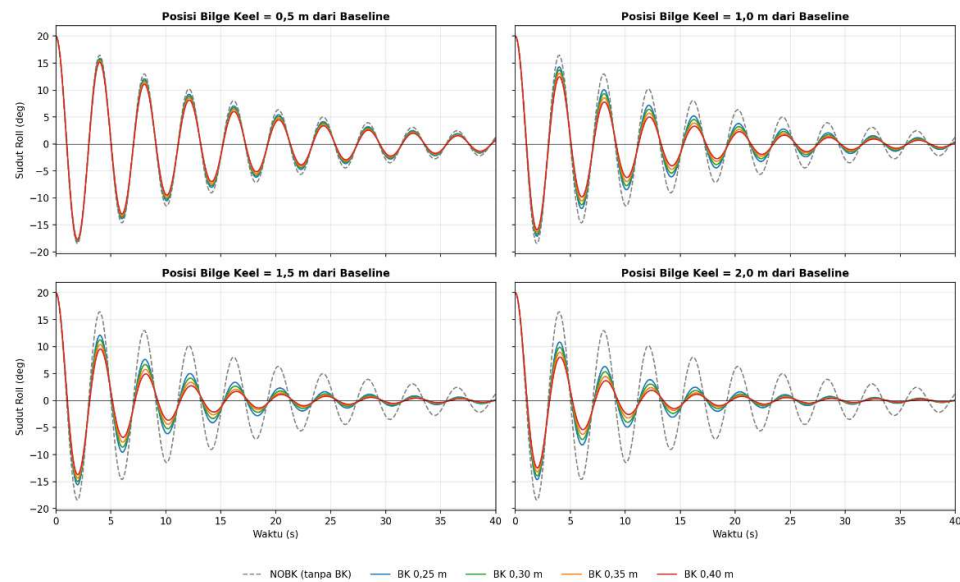
Variasi konfigurasi bilge keel yang disimulasikan meliputi:

- Lebar bilge keel: 0,25 m; 0,30 m; 0,35 m; 0,40 m
- Posisi vertikal (tinggi) pemasangan bilge keel dari baseline: 0,5 m; 1,0 m; 1,5 m; 2,0 m
- Sudut awal roll decay test: 5°; 10°; 15°; 20°
- Panjang bilge keel: tetap 8,7 m, dipasang pada posisi longitudinal Station 9–16
- Draft kapal: konstan 2,4 m di seluruh skenario

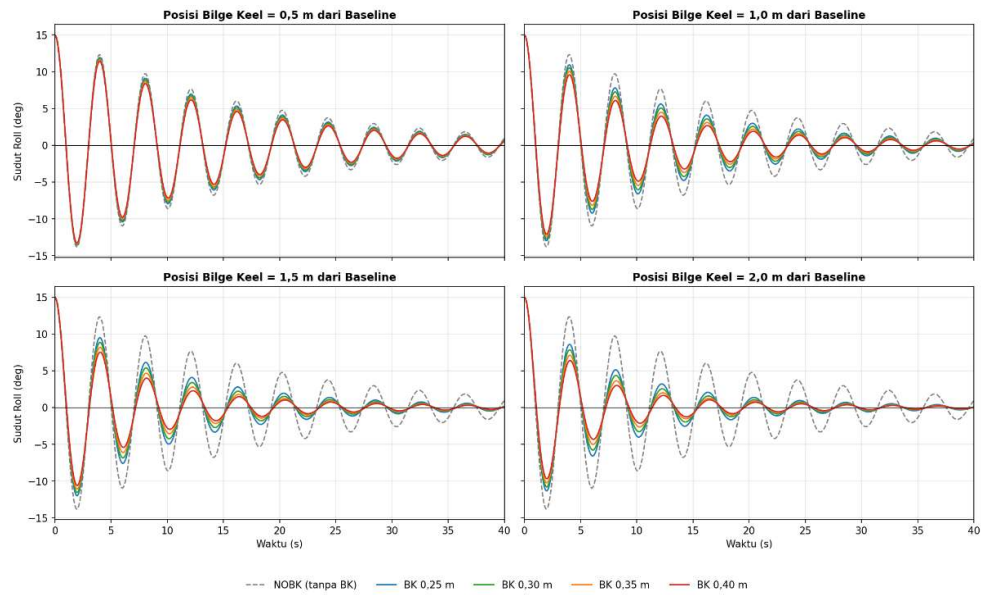
Kombinasi tersebut menghasilkan 64 skenario ($4 \text{ lebar} \times 4 \text{ posisi} \times 4 \text{ sudut}$) ditambah 4 skenario NOBK (kondisi tanpa bilge keel) pada keempat sudut awal, sehingga total 68 skenario simulasi roll decay test.

4.3.3 Hasil Simulasi Time History Roll Decay per Variasi

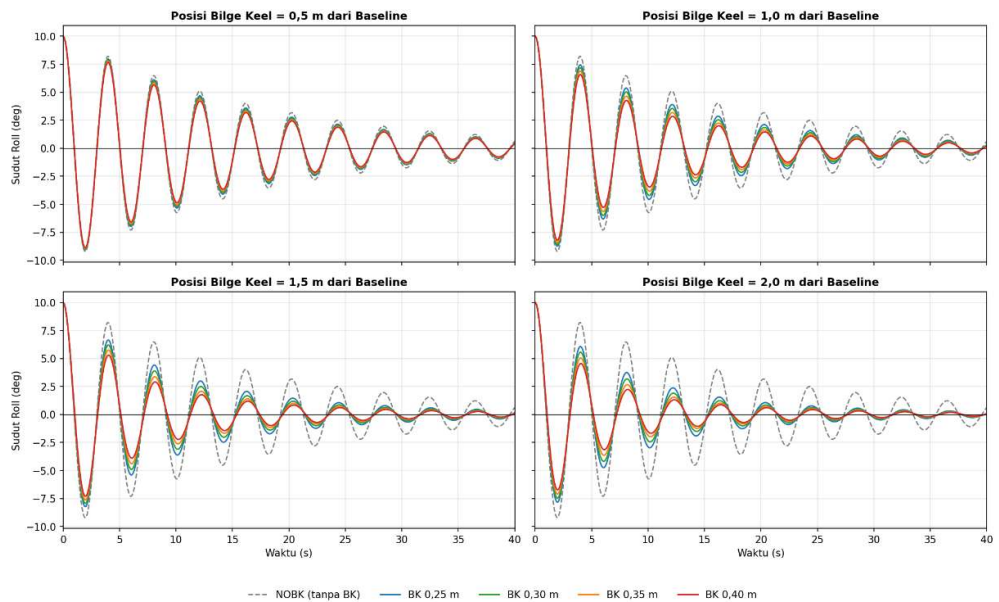
Seluruh 68 skenario menghasilkan data time history sudut roll terhadap waktu yang menunjukkan pola peluruhan osilasi khas: amplitudo berkurang secara progresif setiap siklus hingga mencapai kondisi diam. Secara kualitatif, skenario dengan bilge keel menunjukkan laju peluruhan yang lebih cepat dibandingkan skenario NOBK, terutama pada posisi pemasangan yang lebih tinggi (mendekati garis air).



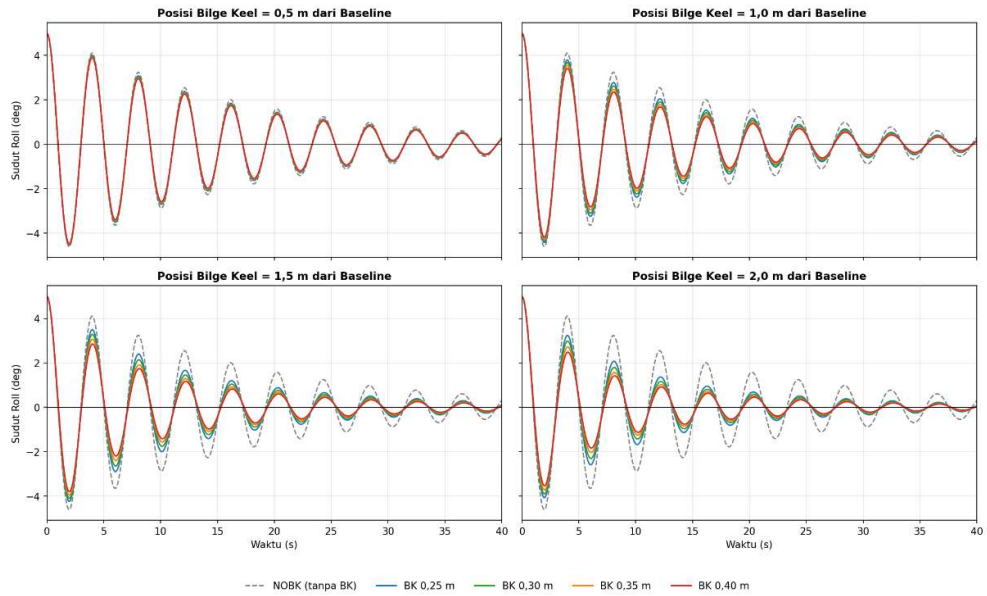
Gambar 4. 7 Overlay Roll Decay - Sudut Awal 20°, Variasi Lebar Bilge Keel per Posisi Pemasangan



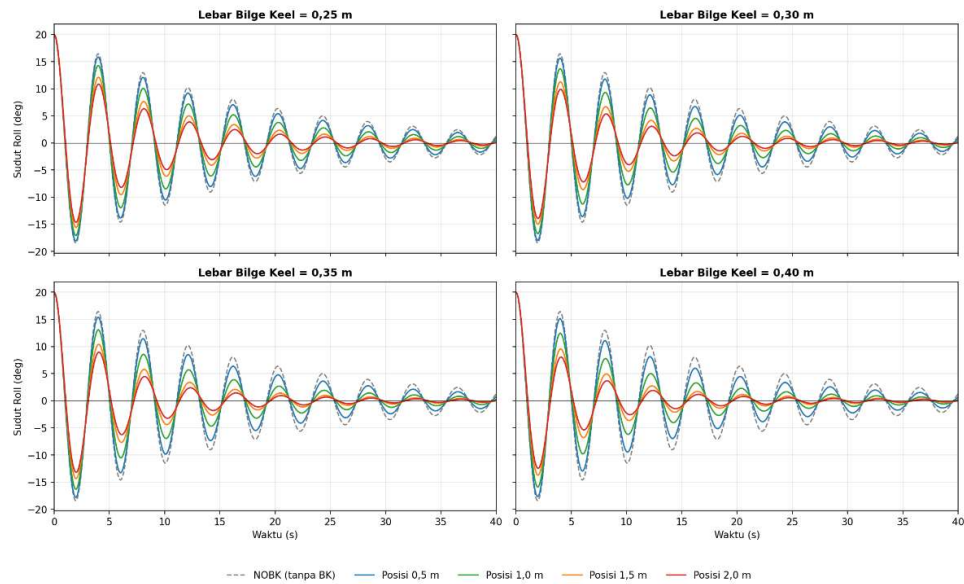
Gambar 4. 8 Overlay Roll Decay - Sudut Awal 15°, Variasi Lebar Bilge Keel per Posisi Pemasangan



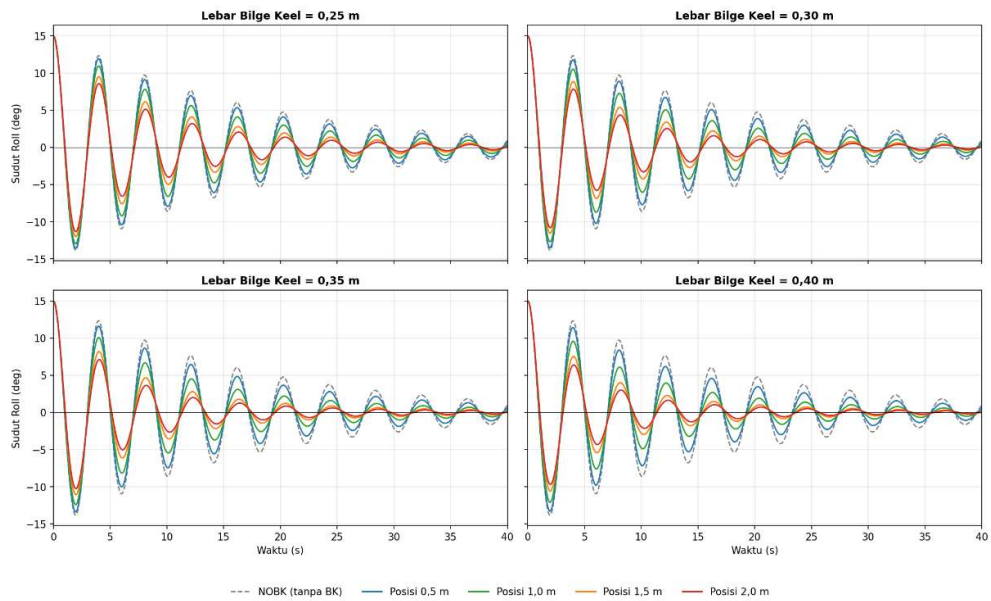
Gambar 4. 9 Overlay Roll Decay - Sudut Awal 10°, Variasi Lebar Bilge Keel per Posisi Pemasangan



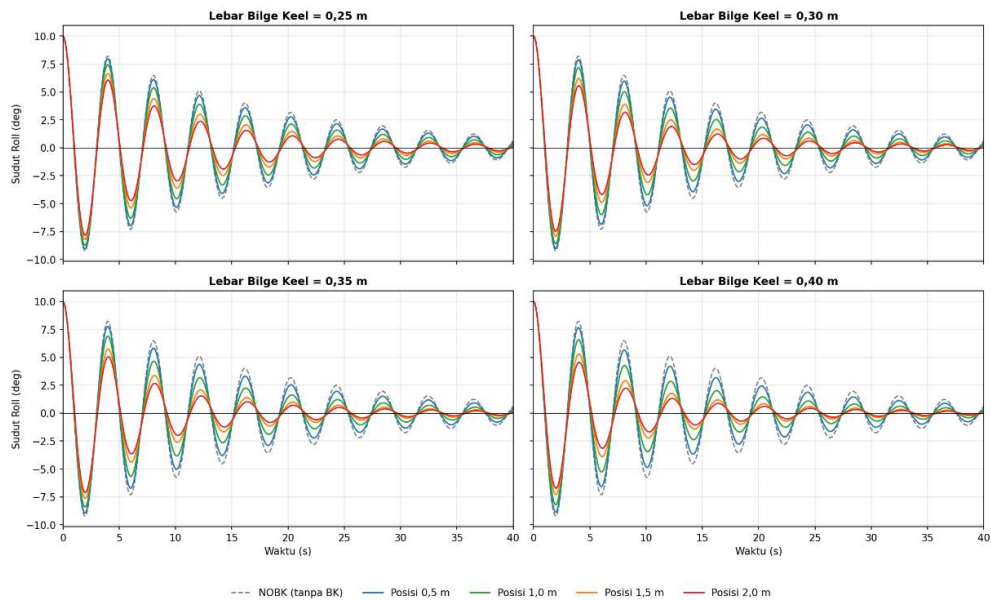
Gambar 4. 10 Overlay Roll Decay - Sudut Awal 5°, Variasi Lebar Bilge Keel per Posisi Pemasangan



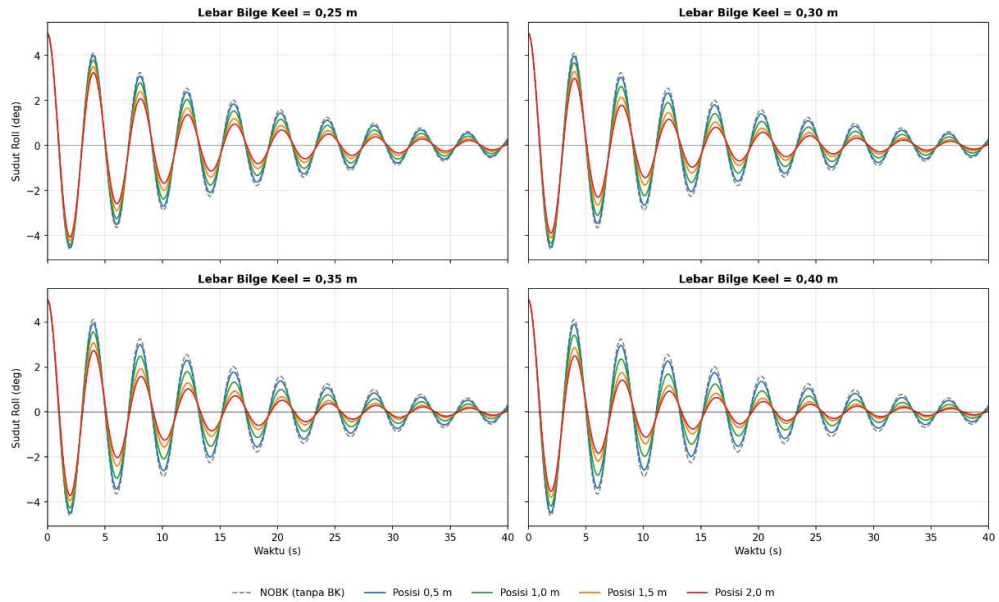
Gambar 4. 11 Overlay Roll Decay - Sudut Awal 20°, Variasi Posisi Bilge Keel per Lebar Bilge Keel



Gambar 4. 12 Overlay Roll Decay - Sudut Awal 15°, Variasi Posisi Bilge Keel per Lebar Bilge Keel



Gambar 4. 13 Overlay Roll Decay - Sudut Awal 10°, Variasi Posisi Bilge Keel per Lebar Bilge Keel



Gambar 4. 14 Overlay Roll Decay - Sudut Awal 5°, Variasi Posisi Bilge Keel per Lebar Bilge Keel

4.4 Ekstraksi Koefisien Redaman Roll

4.4.1 Ekstraksi menggunakan Logarithmic Decrement

Metode Logarithmic Decrement (Metode 1) mengasumsikan redaman murni linear, menghasilkan koefisien redaman linear (B1) untuk seluruh 17 kombinasi (16 kombinasi lebar $\times$ posisi bilge keel, ditambah kondisi NOBK), disajikan pada Tabel 4.7.

Tabel 4. 8 Hasil ekstraksi Metode 1 (Logarithmic Decrement)

BK (m)	Posisi (m)	Tn (s)	B1 (N·m/(rad/s))	ζ (%)
0,00 (NOBK)	-	4,058	107.553	3,77
0,25	0,5	4,061	116.597	4,08
0,25	1,0	4,063	134.109	4,70
0,25	1,5	4,071	153.382	5,39
0,25	2,0	4,079	167.754	5,90
0,30	0,5	4,061	119.016	4,17
0,30	1,0	4,066	140.180	4,92
0,30	1,5	4,076	161.457	5,68
0,30	2,0	4,084	175.171	6,17
0,35	0,5	4,063	121.279	4,25
0,35	1,0	4,068	120.534	5,11
0,35	1,5	4,079	167.787	5,90
0,35	2,0	4,087	180.219	6,35
0,40	0,5	4,063	123.487	4,33
0,40	1,0	4,071	150.057	5,27
0,40	1,5	4,084	172.177	6,07
0,40	2,0	4,095	183.098	6,47

Karena Metode 1 mengasumsikan redaman murni linear, metode ini tidak menghasilkan koefisien B2.

4.4.2 Ekstraksi menggunakan Extinction Curve (Bertin/Energy-Averaging)

Metode Extinction Curve (Metode 2) memisahkan komponen linear (B1) dan kuadratik (B2) melalui regresi terhadap titik-titik amplitudo rata-rata dan rasio penurunan dari keempat variasi sudut awal yang digabungkan (pooling).

Tabel 4. 9 Hasil ekstraksi Metode 2 (Extinction Curve)

BK (m)	Posisi (m)	Tn (s)	B1 (N·m/(rad/s))	B2 (N·m/(rad/s) ²)	ζ (%)
0,00 (NOBK)	-	4,058	108.534	-18.692	3,80
0,25	0,5	4,061	114.135	16.035	4,00
0,25	1,0	4,063	124.018	117.000	4,35
0,25	1,5	4,071	133.273	323.882	4,68
0,25	2,0	4,079	142.819	494.139	5,03
0,30	0,5	4,061	114.833	34.707	4,02
0,30	1,0	4,066	126.152	182.340	4,43
0,30	1,5	4,076	136.479	466.260	4,80
0,30	2,0	4,084	120.502	692.744	5,13
0,35	0,5	4,063	115.120	57.285	4,04
0,35	1,0	4,068	127.317	263.859	4,47
0,35	1,5	4,079	138.349	633.538	4,87
0,35	2,0	4,087	146.574	916.950	5,17
0,40	0,5	4,063	115.243	83.286	4,04
0,40	1,0	4,071	127.667	359.616	4,48
0,40	1,5	4,084	138.935	818.466	4,90
0,40	2,0	4,095	146.435	1.154.286	5,17

Sebagai metode acuan utama (Subbab 4.4.4), hasil Metode 2 menunjukkan bahwa B2 pada kondisi NOBK bernilai negatif kecil (-18.692), yang secara statistik tidak berbeda signifikan dari nol (lihat pembahasan R² pada Subbab 4.4.4), sedangkan B2 pada kombinasi berbilge keel meningkat signifikan seiring bertambahnya lebar dan posisi bilge keel.

4.4.3 Ekstraksi menggunakan Nonlinear Time-Domain Curve Fitting

Metode Time-Domain Curve Fitting (Metode 3) memanfaatkan seluruh data time history untuk meregresikan langsung persamaan gerak roll, menghasilkan B1 dan B2 yang dirata-ratakan dari keempat sudut awal.

Tabel 4. 10 Hasil ekstraksi Metode 3 (Nonlinear Time-Domain Curve Fitting)

BK (m)	Posisi (m)	Tn (s)	B1 (N·m/(rad/s))	B2 (N·m/(rad/s) ²)	ζ (%)
0,00 (NOBK)	-	4,058	89.716	77.794	3,14
0,25	0,5	4,061	95.931	119.983	3,36
0,25	1,0	4,063	108.010	213.774	3,79
0,25	1,5	4,071	124.112	387.405	4,36
0,25	2,0	4,079	120.237	499.165	5,11
0,30	0,5	4,061	97.577	139.838	3,42
0,30	1,0	4,066	114.495	269.455	4,02
0,30	1,5	4,076	139.405	483.585	4,90
0,30	2,0	4,084	166.288	619.939	5,86
0,35	0,5	4,063	99.029	161.282	3,47
0,35	1,0	4,068	121.137	339.793	4,25
0,35	1,5	4,079	155.424	603.450	5,47
0,35	2,0	4,087	187.405	773.152	6,61
0,40	0,5	4,063	100.463	183.848	3,52
0,40	1,0	4,071	127.721	423.582	4,49
0,40	1,5	4,084	170.513	748.460	6,01
0,40	2,0	4,095	206.746	958.608	7,30

Berbeda dengan Metode 2, hasil Metode 3 pada kondisi NOBK menunjukkan B2 yang tidak mendekati nol (77.794), mengindikasikan Metode 3 mendeteksi komponen redaman kuadratik kecil yang tidak sepenuhnya nol bahkan pada kondisi tanpa bilge keel, kemungkinan berasal dari komponen viscous alami lambung kapal yang terdeteksi berbeda oleh pendekatan berbasis time history dibandingkan pendekatan berbasis puncak amplitudo.

4.4.4 Validasi Hasil Ekstraksi terhadap Nilai Input/Referensi

Sebelum diterapkan pada 68 skenario, ketiga metode divalidasi menggunakan data sintesis yang dibangkitkan dari nilai B1 dan B2 yang telah diketahui ($B1 = 60.000 \text{ N·m/(rad/s)}$; $B2 = 300.000 \text{ N·m/(rad/s)}^2$):

Tabel 4. 11 Validasi ketiga metode terhadap data sintesis

Metode	Galat B1	Galat B2
Metode 1 <i>Logarithmic Decrement</i>	48,2%	Tidak berlaku (murni linear)
Metode 2 <i>Extinction Curve</i>	0,8%	3,1%
Metode 3 <i>Time-Domain Curve Fitting</i>	17,0%	15,4%

Metode 2 menunjukkan galat estimasi terkecil untuk kedua koefisien, sehingga ditetapkan sebagai metode acuan utama dalam interpretasi hasil penelitian ini. Metode 1 menunjukkan bias signifikan (48,2%) karena mengabaikan komponen kuadratik yang nyata pada sistem dengan bilge keel. Metode 3, meskipun memanfaatkan seluruh data time history, menunjukkan galat lebih besar dibandingkan Metode 2 karena sensitivitas terhadap turunan numerik.

Sebagai pemeriksaan tambahan pada data riil, regresi extinction curve kondisi NOBK menghasilkan koefisien determinasi (R^2) yang sangat rendah (0,032 setelah pengeluaran titik data awal yang bersifat outlier), mengonfirmasi bahwa redaman pada kondisi tanpa bilge keel memang tidak memiliki ketergantungan amplitudo yang berarti ($B2 \approx 0$), berbeda dengan kombinasi berbilge keel yang menunjukkan R^2 jauh lebih tinggi (misalnya 0,775 pada BK 0,40 m di posisi 2,0 m).

Rekapitulasi Gabungan Ketiga Metode

Sebagai rangkuman menyeluruh, Tabel 4.5 menyajikan B1, B2, dan Tn dari ketiga metode secara berdampingan untuk memudahkan perbandingan silang.

Tabel 4. 12 Rekapitulasi lengkap Tn, B1, B2 (tiga metode), dan ζ (Metode 2) untuk seluruh 17 kombinasi

BK (m)	Posisi (m)	Tn (s)	B1-M1	B1-M2	B2-M2	B1-M3	B2-M3	ζ -M2 (%)
0,00 (NOBK)	-	4,058	107.553	108.534	-18.692	89.716	77.794	3,80
0,25	0,5	4,061	116.597	114.135	16.035	95.931	119.983	4,00
0,25	1,0	4,063	134.109	124.018	117.000	108.010	213.774	4,35
0,25	1,5	4,071	153.382	133.273	323.882	124.112	387.405	4,68
0,25	2,0	4,079	167.754	142.819	494.139	120.237	499.165	5,03
0,30	0,5	4,061	119.016	114.833	34.707	97.577	139.838	4,02
0,30	1,0	4,066	140.180	126.152	182.340	114.495	269.455	4,43
0,30	1,5	4,076	161.457	136.479	466.260	139.405	483.585	4,80
0,30	2,0	4,084	175.171	120.502	692.744	166.288	619.939	5,13
0,35	0,5	4,063	121.279	115.120	57.285	99.029	161.282	4,04
0,35	1,0	4,068	120.534	127.317	263.859	121.137	339.793	4,47
0,35	1,5	4,079	167.787	138.349	633.538	155.424	603.450	4,87
0,35	2,0	4,087	180.219	146.574	916.950	187.405	773.152	5,17
0,40	0,5	4,063	123.487	115.243	83.286	100.463	183.848	4,04
0,40	1,0	4,071	150.057	127.667	359.616	127.721	423.582	4,48
0,40	1,5	4,084	172.177	138.935	818.466	170.513	748.460	4,90
0,40	2,0	4,095	183.098	146.435	1.154.286	206.746	958.608	5,17

Tabel 4.5 mempertegas pola yang telah dibahas pada Subbab 4.4.1–4.4.3: peningkatan yang konsisten dan monoton pada seluruh parameter (Tn, B1, B2, ζ) seiring bertambahnya lebar bilge keel maupun posisi pemasangan, dengan kondisi NOBK secara konsisten menempati nilai terendah pada seluruh kolom kecuali pada kolom B1-M3 dan B2-M3, di mana NOBK tetap menghasilkan nilai terendah namun dengan margin yang lebih kecil dibandingkan hasil Metode 2, sejalan dengan temuan pada Subbab 4.4.3 bahwa Metode 3 mendeteksi komponen kuadratik kecil yang tidak sepenuhnya nol bahkan pada kondisi tanpa bilge keel.

4.5 Pembahasan

4.5.1 Pengaruh Variasi Lebar Bilge Keel dan penempatan bilge keel terhadap Periode Natural Roll (T_n) serta Sifat Linear dan Nonlinear Redaman

Pengaruh terhadap T_n . Penambahan lebar bilge keel dan posisi pemasangan yang lebih tinggi (mendekati garis air) secara konsisten meningkatkan periode natural roll, meskipun peningkatannya relatif kecil (dari 4,058 detik pada NOBK hingga 4,095 detik pada BK 0,40 m di posisi 2,0 m, atau kurang dari 1%). Peningkatan ini mengindikasikan penambahan momen inersia tambahan (*added mass*) akibat luasan bilge keel yang tercelup dan bergerak bersama air di sekitarnya.

Pengaruh terhadap redaman linear (B1) dan kuadratik (B2). Berdasarkan Tabel 4.2 (Metode 2 sebagai acuan), B1 meningkat secara moderat dari 108.534 N·m/(rad/s) (NOBK) menjadi 146.435 N·m/(rad/s) (BK 0,40 m, posisi 2,0 m) peningkatan sekitar 35%. Sebaliknya, B2 meningkat secara drastis dari mendekati nol (-18.692, secara statistik tidak berbeda signifikan dari nol berdasarkan uji R^2 pada Subbab 4.4.4) menjadi 1.154.286 N·m/(rad/s)² pada kombinasi yang sama. Pola ini menunjukkan bahwa mekanisme utama penambahan redaman oleh bilge keel adalah melalui komponen kuadratik (redaman viscous/*eddy-making*), konsisten dengan teori Ikeda yang menempatkan komponen bilge keel sebagai salah satu dari dua komponen (bersama komponen eddy) yang bersifat kuadratik terhadap kecepatan sudut roll.

Efek penempatan vertikal bilge keel (lengan momen terhadap sumbu roll). Temuan penting penelitian ini adalah bahwa efektivitas bilge keel sangat bergantung pada posisi vertikal pemasangannya. Pada posisi rendah (0,5 m dari baseline, dekat sumbu roll), seluruh variasi lebar bilge keel hanya menghasilkan ζ antara 4,00%–4,04%, hanya sedikit di atas kondisi NOBK (3,80%). Sebaliknya, pada posisi tinggi (2,0 m, mendekati garis air 2,4 m), ζ meningkat signifikan menjadi 5,03%–5,17%. Hal ini konsisten dengan prinsip mekanika bahwa kecepatan lokal aliran air di sekitar bilge keel sebanding dengan jarak (lengan momen, r) terhadap sumbu roll ($v = r \times \omega$), dan karena redaman viscous sebanding dengan kuadrat kecepatan, efektivitas bilge keel meningkat tajam seiring bertambahnya lengan momen tersebut.

Tidak ada gejala titik jenuh. Pada seluruh posisi yang diuji, peningkatan lebar bilge keel dari 0,25 m hingga 0,40 m secara konsisten meningkatkan B2 tanpa menunjukkan gejala *diminishing return* bahkan peningkatan B2 dari BK 0,35 m ke BK 0,40 m cenderung lebih besar dibandingkan peningkatan dari BK 0,25 m ke BK 0,30 m, mengindikasikan hubungan yang progresif dalam rentang yang diuji.

4.5.2 Perbandingan Konsistensi dan Akurasi Koefisien Redaman B_1/ζ_L dan B_2/ζ_Q antara Metode Logarithmic Decrement, Extinction Curve, dan Nonlinear Time-Domain Curve Fitting

Konsistensi tren antar metode. Ketiga metode menunjukkan tren kenaikan B_1 yang konsisten seiring bertambahnya lebar dan posisi bilge keel (Tabel 4.5), mengonfirmasi keandalan tren kualitatif hasil penelitian ini terlepas dari metode ekstraksi yang digunakan.

Perbedaan nilai absolut dan akurasi. Metode 1 secara konsisten menghasilkan B_1 yang lebih tinggi dibandingkan Metode 2 pada seluruh kombinasi berbilge keel sejalan dengan temuan validasi sintetis (Subbab 4.4.4) bahwa Metode 1 cenderung melebih-estimasi (overestimate) B_1 ketika komponen kuadratik signifikan, karena sebagian kontribusi kuadratik "tertangkap" sebagai redaman linear semu dalam pendekatan Metode 1 yang tidak memisahkan kedua komponen. Sebagai metode dengan galat validasi terkecil, Metode 2 (Extinction Curve) direkomendasikan sebagai acuan utama untuk interpretasi B_1 dan B_2 pada penelitian ini.

Pola menarik pada Metode 3. Pada kombinasi lebar dan posisi bilge keel tertentu (khususnya BK 0,40 m di posisi 1,5–2,0 m), B_1 dan B_2 hasil Metode 3 justru melampaui hasil Metode 2 berbeda dari pola umum di kombinasi lain di mana Metode 2 menghasilkan nilai lebih tinggi. Hal ini mengindikasikan sensitivitas berbeda antara pendekatan berbasis puncak amplitudo (Metode 1 dan 2) dengan pendekatan berbasis seluruh time history (Metode 3) terhadap distribusi energi redaman pada kondisi redaman sangat nonlinear.

Konvergensi dan divergensi menurut amplitudo. Ketiga metode menunjukkan kesepakatan yang baik pada kondisi mendekati linear (NOBK: $\zeta = 3,80\%$ [M2] vs $3,14\%$ [M3], relatif berdekatan), namun divergensi antar metode melebar pada kombinasi dengan komponen kuadratik besar dan pada perhitungan redaman ekuivalen di sudut amplitudo besar mengindikasikan bahwa ketidakpastian estimasi redaman meningkat seiring meningkatnya derajat nonlinearitas sistem, terlepas dari metode ekstraksi yang digunakan.