

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Fishing Vessel

Kapal ikan (fishing vessel) merupakan kapal yang dirancang khusus untuk kegiatan penangkapan ikan, dengan karakteristik desain yang berbeda dari kapal niaga (cargo ship) pada umumnya. Perbedaan ini mencakup bentuk lambung, koefisien blok ( $C_b$ ), rasio dimensi utama, serta kelengkapan operasional seperti palka ikan, deck kerja, dan alat tangkap.

Secara umum, kapal ikan tradisional maupun modern di Indonesia banyak menggunakan bentuk lambung round-hull (bilga bulat) yang dilengkapi dengan bar keel atau deadwood memanjang di bagian buritan, berbeda dengan kapal cargo konvensional yang umumnya memiliki bentuk bilga lebih sederhana. Karakteristik geometri ini memengaruhi perilaku hidrodinamis kapal, termasuk redaman roll, sehingga metode estimasi redaman yang dikembangkan untuk kapal cargo tidak selalu dapat diterapkan secara langsung tanpa modifikasi pada kapal ikan (Ali, Katayama, & Ikeda, 2003).

Objek penelitian ini adalah kapal ikan dengan dimensi utama dan properti hidrostatis yang telah ditentukan (LPP, LWL, B, T, H,  $C_b$ ,  $C_p$ ,  $C_m$ , VCG, dan momen inersia), sebagaimana dijelaskan pada Bab 3.

#### 2.2 Gerak Kapal (Ship Motions)

Kapal yang terapung bebas di permukaan air memiliki enam derajat kebebasan gerak (six degrees of freedom), yaitu tiga gerak translasi (surge, sway, heave) dan tiga gerak rotasi (roll, pitch, yaw). Di antara keenam gerak tersebut, gerak roll merupakan gerak rotasi terhadap sumbu memanjang kapal (sumbu-x) yang paling sensitif terhadap karakteristik redaman (damping), karena momen pengembali (restoring moment) pada roll relatif kecil dibandingkan gerak rotasi lainnya sehingga kapal cenderung beresonansi pada frekuensi alaminya.

Secara umum, gerak roll kapal pada kondisi bebas gelombang (free roll decay) dapat didekati sebagai sistem osilasi satu derajat kebebasan (single degree of freedom, SDOF) yang dituliskan dalam bentuk persamaan diferensial:

$$I_{xx,total}\ddot{\theta} + B_1\dot{\theta} + B_2|\dot{\theta}|\dot{\theta} + C\theta = 0 \quad (1)$$

dengan  $I_{xx}$  adalah momen inersia massa kapal terhadap sumbu roll,  $A_{44}$  adalah added mass moment of inertia pada roll,  $B(\dot{\phi})$  adalah momen redaman roll yang secara umum merupakan fungsi tak-linear dari kecepatan sudut roll  $\dot{\phi}$ ,  $C$  adalah koefisien restoring roll (berkaitan dengan GM dan displasemen kapal), dan  $\phi$  adalah sudut roll. Bentuk persamaan ini menjadi dasar analisis pada roll decay test, baik yang dilakukan secara eksperimen di kolam uji maupun secara numerik menggunakan perangkat lunak seperti Ansys Aqwa.

## 2.3 Parameter Massa dan Radius Girasi Kapal

### 2.3.1 LCG, VCG, dan Displacement

Displacement ( $\Delta$ ) merupakan berat air yang dipindahkan oleh badan kapal yang tercelup, yang menurut prinsip Archimedes besarnya sama dengan berat total kapal beserta muatannya. Displacement dirumuskan sebagai:

$$\Delta = \rho \times \nabla \times g \quad (2)$$

dengan  $\rho$  adalah massa jenis air,  $\nabla$  adalah volume karene (volume badan kapal yang tercelup), dan  $g$  adalah percepatan gravitasi. Displacement menjadi parameter dasar dalam perhitungan hidrostatis maupun dinamika gerak kapal, termasuk dalam penentuan momen inersia massa kapal.

Longitudinal Center of Gravity (LCG) adalah titik berat kapal yang diukur pada arah memanjang (longitudinal) terhadap suatu titik referensi (umumnya midship atau after perpendicular). LCG menentukan kondisi trim kapal dan berpengaruh terhadap distribusi gaya apung di sepanjang lambung.

Vertical Center of Gravity (VCG), atau sering disebut KG, adalah titik berat kapal diukur pada arah vertikal dari baseline (lunas kapal). VCG merupakan parameter yang sangat menentukan stabilitas kapal, karena tinggi metasentra (GM) dihitung dari selisih antara tinggi metasentra transversal (KM) dan KG:

$$GM = KM - KG \quad (3)$$

GM memiliki peran sentral dalam dinamika roll kapal, karena GM merupakan komponen kekakuan (restoring) pada persamaan gerak roll dan secara langsung memengaruhi frekuensi natural roll kapal, sebagaimana akan dibahas lebih lanjut pada Subbab 2.3.2.

### 2.3.2 Radius Girasi ( $K_{xx}$ , $K_{yy}$ , $K_{zz}$ ) dan Momen Inersia Massa Roll

Radius girasi (radius of gyration,  $k$ ) adalah besaran yang merepresentasikan sebaran massa suatu benda terhadap suatu sumbu putar tertentu. Radius girasi menghubungkan massa total benda dengan momen inersia massanya melalui persamaan:

$$I = m \times k^2 \quad (4)$$

Pada kapal, terdapat tiga radius girasi utama yang berkaitan dengan tiga sumbu rotasi kapal, yaitu  $K_{xx}$  (radius girasi terhadap sumbu memanjang/longitudinal, berkaitan dengan gerak roll),  $K_{yy}$  (radius girasi terhadap sumbu melintang/transversal, berkaitan dengan gerak pitch), dan  $K_{zz}$  (radius girasi terhadap sumbu vertikal, berkaitan dengan gerak yaw).

Untuk gerak roll, momen inersia massa kapal terhadap sumbu  $x$  ( $I_{xx}$ ) dihitung sebagai:

$$I_{xx} = \Delta \times K_{xx}^2 \quad (5)$$

(atau menggunakan massa  $m$ ,  $I_{xx} = m \times K_{xx}^2$ )

Dalam analisis dinamika roll di air (bukan di udara/vakum), momen inersia yang bekerja bukan hanya momen inersia massa kapal itu sendiri, melainkan juga ditambah momen inersia tambahan akibat massa air yang ikut bergerak bersama kapal saat berosilasi, yang dikenal sebagai added mass moment of inertia ( $A_{44}$ ). Sehingga momen inersia total yang relevan dalam persamaan gerak roll adalah:

$$I_{xx,total} = I_{xx} + A_{44} \quad (6)$$

Radius girasi (khususnya  $K_{xx}$ ) merupakan parameter yang sangat menentukan periode natural roll kapal. Hubungan antara  $K_{xx}$ , GM, dan periode natural roll (T) dinyatakan dalam bentuk rasional sebagai:

$$T_n = \frac{2\pi \times K_{xx}}{\sqrt{g \times GM}} \quad (7)$$

Atau bentuk lengkap dengan tambahan Added Mass

$$T_n = \frac{2\pi \sqrt{I_{xx} + A_{44}}}{\sqrt{g \times \Delta \times GM}} \quad (8)$$

Dari persamaan tersebut terlihat bahwa periode roll berbanding lurus dengan radius girasi semakin besar  $K_{xx}$ , semakin panjang periode rollingnya. Beberapa kajian (misalnya dalam Proceedings of the 15th International Marine Design Conference, IMDC-2024) bahkan menyebutkan bahwa ketidakpastian dalam estimasi  $K_{xx}$  merupakan kontributor terbesar terhadap galat prediksi periode roll kapal dibandingkan parameter lain seperti GM atau added mass, sehingga penentuan nilai  $K_{xx}$  yang akurat menjadi krusial dalam studi dinamika roll.

### 2.3.3 Nilai Acuan/Rule of Thumb Radius Girasi dari Literatur

Karena perhitungan radius girasi secara langsung memerlukan data distribusi berat/massa kapal yang detail (yang tidak selalu tersedia pada tahap desain awal), berbagai peneliti telah mengusulkan formula empiris (rule of thumb) untuk mengestimasi  $K_{xx}$  berdasarkan dimensi utama kapal, khususnya lebar kapal (B). Beberapa pendekatan yang umum digunakan antara lain:

#### A. Metode Koefisien Rolling (Rolling Coefficient Method)

$K_{xx}$  diestimasi sebagai suatu fraksi dari lebar kapal:

$$K_{xx} = k \times B \quad (9)$$

dengan nilai  $k = 0,30 - 0,40$  yang umum digunakan sebagai pendekatan sederhana untuk kapal niaga (merchant ship) pada umumnya.

#### B. Metode Doyere

Doyere mengusulkan koefisien  $c = 0,34$  berdasarkan kajian pada kapal-kapal niaga, sedangkan untuk kapal militer (naval vessels) pada berbagai kondisi muatan, nilai  $c$  bervariasi antara 0,26 hingga 0,32.

$$T_{\varphi} = \frac{c\sqrt{B^2 + 4 VCG^2}}{\sqrt{GM_t}} \quad (10)$$

### C. Metode Beam (Beam Method)

Menggunakan koefisien  $c = 0,36$  terhadap lebar kapal.

$$k_{xx} = c\sqrt{B^2 + D^2} \quad (11)$$

### D. Formula Kato (1956)

Kato mengusulkan formula yang mempertimbangkan koefisien bentuk kapal ( $C_b$ ,  $C_u$ ) dan rasio depth-to-beam ( $H/B$ ), dengan faktor koefisien yang berbeda untuk tiap jenis kapal: 0,125 untuk kapal penumpang dan kapal kargo, 0,133 untuk kapal tanker, dan 0,172 untuk kapal militer/navy ships menunjukkan bahwa kapal dengan  $C_b$  dan  $H/B$  lebih besar cenderung memiliki radius girasi yang lebih besar pula.

$$k = \sqrt{0,125 \left[ C_b C_u + 1,10 C_u (1 - C_u) \left( \frac{H}{T} - 2,20 \right) + \left( \frac{H}{B} \right)^2 \right]} \quad (12)$$

### E. Formula Umum Periode Roll

Sebagai pendekatan alternatif yang tidak memerlukan  $K_{xx}$  secara eksplisit, periode roll dapat diestimasi langsung dari lebar kapal dan GM melalui:

$$T = \frac{C \times B}{\sqrt{GM}} \quad (13)$$

dengan  $C$  berkisar antara 0,73–0,85 untuk kapal niaga pada umumnya.

Tabel berikut merangkum beberapa nilai koefisien radius girasi dari literatur:

Tabel 2. 1 Nilai koefisien radius girasi dari literatur

| Metode/Sumber              | Koefisien                                                    | Catatan                          |
|----------------------------|--------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| Rolling Coefficient Method | $k = 0,40$                                                   | Kapal niaga umum                 |
| Doyere                     | $c = 0,34$ (kapal niaga);<br>$0,26$ – $0,32$ (kapal militer) | Bervariasi dengan kondisi muatan |
| Beam Method                | $c = 0,36$                                                   | -                                |
| Kato (1956)                | faktor $0,125$ – $0,172$                                     | Bergantung jenis kapal           |

Perlu dicatat bahwa formula-formula tersebut umumnya dikembangkan dan divalidasi untuk kapal niaga (cargo, tanker) dan kapal militer, sedangkan validasi khusus untuk kapal ikan (fishing vessel) berukuran kecil masih relatif terbatas dalam literatur. Oleh karena itu, penelitian ini menggunakan pendekatan mass properties dari solidworks dengan cara mengoverride center of gravity kapal lalu akan didapatkan nilai moment inersia selanjutnya akan dikonversi menjadi nilai  $K_{xx}$ , dengan rule of thumb di atas dijadikan sebagai pembanding kewajaran (sanity check) terhadap nilai yang digunakan.

## 2.4 Roll Damping

### 2.4.1 Definisi dan Komponen Roll Damping

Roll damping adalah momen yang melawan gerak roll kapal dan bertanggung jawab atas peluruhan (decay) amplitudo roll seiring waktu. Berdasarkan ITTC Recommended Procedures 7.5-02-07-04.5 "Numerical Estimation of Roll Damping" (2011), roll damping total kapal umumnya diuraikan menjadi beberapa komponen yang bersifat aditif:

- Friksi kulit (skin friction damping,  $B_F$ ) akibat gesekan viskos antara lambung dan fluida.
- Redaman pusaran (eddy damping,  $B_E$ ) akibat separasi aliran dan pembentukan vortex di sekitar bilga dan lambung.
- Redaman gelombang (wave damping,  $B_W$ ) akibat energi yang dipancarkan kapal ke fluida dalam bentuk gelombang radiasi saat berosilasi.
- Redaman angkat (lift damping,  $B_L$ ) timbul akibat gaya hidrodinamis mirip gaya angkat pada lambung saat kapal memiliki kecepatan maju.
- Redaman bilga keel (bilge keel damping,  $B_{BK}$ ) kontribusi tambahan dari bilga keel akibat separasi aliran dan pusaran di ujung-ujungnya.
- Redaman appendage lain dari lunas, kemudi, dan bagian menonjol lainnya.

Total koefisien redaman roll dinyatakan sebagai:

$$B_{total} = B_F + B_E + B_W + B_L + B_{BK} + \dots \quad (14)$$

Pada penelitian ini, redaman potensial (radiasi) dihitung otomatis oleh Ansys Aqwa melalui solusi difraksi-radiasi, sedangkan komponen viskos (eddy, bilga keel) diinput sebagai additional damping berdasarkan hasil ekstraksi dari roll decay test.

### 2.4.2 Sifat Linear dan Nonlinear Roll Damping

Berbeda dengan gerak heave atau pitch yang redamannya dapat didekati linear terhadap kecepatan, roll damping pada kapal bersifat tidak murni linear. Robinson dan Stoddart (1986) dalam "An Engineering Assessment of the Role of Non-linearities in Transportation Barge Roll Response" menunjukkan bahwa efek nonlinearitas terutama dari komponen eddy dan bilga keel memberikan kontribusi yang signifikan terhadap respons roll, khususnya pada amplitudo roll yang besar.

Secara matematis, momen redaman roll umum didekati dalam bentuk polinomial terhadap kecepatan sudut:

$$B(\dot{\phi}) = B_1\dot{\phi} + B_2\dot{\phi}|\dot{\phi}| + B_3\dot{\phi}^3 + \dots \quad (15)$$

dengan  $B_1$  adalah koefisien redaman linear,  $B_2$  adalah koefisien redaman kuadratik (nonlinear, berkaitan dengan separasi aliran/eddy), dan  $B_3$  adalah koefisien redaman kubik (jarang digunakan, biasanya untuk presisi tambahan).

Semakin besar kontribusi komponen kuadrat ( $B_2$ ), semakin cepat penurunan amplitudo pada osilasi awal (amplitudo besar), namun laju peluruhan akan melambat relatif terhadap komponen linear murni ketika amplitudo mengecil. Karakteristik inilah yang menjadi dasar mengapa variasi nilai non-linear roll damping akan menghasilkan bentuk kurva decay yang berbeda-beda, sehingga dapat dianalisis pengaruhnya melalui simulasi roll decay test.

## 2.5 Bilge Keel dan Metode Estimasi Redaman (Ikeda/ITTC)

Bilge keel merupakan pelat sirip yang dipasang memanjang pada sudut bilga (bilge) kapal, dan merupakan alat peredam roll pasif yang paling umum digunakan karena biaya pemasangan relatif rendah dan tidak memerlukan sistem mekanis aktif. Karena bilge keel merupakan variabel bebas utama pada penelitian ini, metode estimasi kontribusinya terhadap redaman roll perlu dijabarkan secara khusus.

### 2.5.1 Metode Ikeda dan Prosedur ITTC 7.5-02-07-04.5

Metode prediksi redaman bilga keel yang menjadi rujukan standar dunia perkapalan dikembangkan oleh Yoshiho Ikeda beserta Yoji Himeno dan Norio Tanaka pada akhir dekade 1970-an, dan kemudian dirangkum secara resmi oleh International Towing Tank Conference (ITTC) dalam prosedur 7.5-02-07-04.5 "Numerical Estimation of Roll Damping" (2011). Metode ini pada mulanya dikembangkan dan divalidasi menggunakan seri model kapal cargo konvensional dengan koefisien blok ( $C_b$ ) berkisar 0,56–0,85 dan bilangan Froude hingga 0,25, sedangkan komponen bilga keel secara khusus diturunkan dari kombinasi uji pelat datar berosilasi (2D oscillating flat plate) untuk memperoleh koefisien drag, dan uji roll decay bebas pada model ellipsoid berbilga keel untuk mengisolasi efek bilga keel dari bentuk lambung.

Berdasarkan prosedur ITTC, koefisien redaman bilga keel ( $B_{44BK}$ ) diuraikan menjadi empat komponen aditif:

$$B_{44BK} = B_{44BKN0} + B_{44BKH0} + B_{44BKL} + B_{44BKW} \quad (16)$$

Komponen  $B_{44BKN0}$  (normal force/drag component) merepresentasikan gaya dorong (drag) yang timbul akibat bilga keel bergerak menembus air, dan merupakan komponen dominan dalam redaman bilga keel:

$$C_D = \frac{22,5 \times b_{BK}}{\pi \times l \times \varphi_a \times f} + 2,4 \quad (17)$$

$$B'_{44BKN0} = \frac{8}{3} \rho l^3 b_{BK} \omega_E \varphi_a f C_D \quad (18)$$

dengan  $b_{BK}$  adalah lebar bilga keel,  $l$  adalah jarak dari sumbu roll ke ujung bilga keel,  $\varphi_a$  adalah amplitudo roll,  $f$  adalah faktor koreksi kecepatan aliran lokal,  $\rho$  adalah massa jenis air,  $\omega_E$  adalah frekuensi roll, dan  $C_D$  adalah koefisien drag bilga keel. Keberadaan  $\varphi_a$  (amplitudo) secara eksplisit dalam persamaan ini menjadi dasar teoritis mengapa kontribusi bilga keel terhadap redaman roll bersifat nonlinear terhadap amplitudo.

Komponen B\_44BKH0 (hull pressure component) memperhitungkan tekanan tambahan pada permukaan lambung di sekitar bilga keel akibat gerakannya, B\_44BKL (lift component) memperhitungkan gaya angkat pada bilga keel yang hanya relevan ketika kapal memiliki kecepatan maju, dan B\_44BKW (wave-making component) memperhitungkan gelombang radiasi tambahan yang dibangkitkan oleh bilga keel, dengan besarnya bergantung pada kedalaman bilga keel terhadap permukaan bebas ( $d_{BK}$ ). Karena penelitian ini membatasi kondisi kapal pada kecepatan nol ( $V = 0$ ), komponen B\_44BKL bernilai nol untuk seluruh kondisi simulasi.

#### 2.5.2 Metode Robinson dan Stoddart untuk Kondisi Tanpa Bilge Keel

Untuk kondisi lambung tanpa bilga keel, Ansys Aqwa menggunakan pendekatan berbeda yang dikembangkan oleh Robinson dan Stoddart (1986) dalam studi redaman roll kapal tongkang (transportation barge). Metode ini mengestimasi redaman akibat pelepasan pusaran (vortex shedding) dari sudut lambung yang tajam berdasarkan kecepatan aliran relatif di sudut bilga, bilangan Keulegan–Carpenter, frekuensi roll natural, dan radius bilga, menggunakan basis data yang dikalibrasi dari hasil eksperimen kapal tongkang.

#### 2.5.3 Aplikasi Metode Ikeda pada Kapal Ikan

Karena metode Ikeda dan pendekatan Robinson dan Stoddart pada dasarnya dikembangkan dan divalidasi menggunakan model kapal cargo konvensional dan kapal tongkang bukan kapal ikan penerapannya pada kapal ikan memerlukan kehati-hatian. Ali, Katayama, dan Ikeda (2003) dalam "Roll Damping Characteristics of Fishing Boats with and without Drift Motion" melakukan modifikasi terhadap metode Ikeda agar sesuai dengan karakteristik kapal ikan Indonesia yang umumnya memiliki bentuk lambung round-hull dengan bar keel/deadwood memanjang, dan memperoleh kesesuaian yang cukup baik terhadap hasil uji forced rolling di towing tank. Penelitian ini menggunakan formula bawaan (default) Ansys Aqwa tanpa modifikasi khusus untuk kapal ikan, sebagaimana dijelaskan pada batasan masalah.

### 2.6 Roll Decay Test

#### 2.6.1 Prinsip Pengujian

Roll decay test adalah metode standar untuk mengidentifikasi karakteristik redaman roll suatu kapal. Pengujian dilakukan dengan memberikan simpangan sudut roll awal ( $\phi_0$ ) pada kapal dalam kondisi air tenang, kemudian kapal dilepas secara bebas sehingga berosilasi dan meluruh akibat adanya redaman. Time history sudut roll  $\phi(t)$  yang direkam selama proses peluruhan inilah yang menjadi data utama untuk mengekstraksi koefisien redaman.

#### 2.6.2 Roll Decay Test Numerik dengan Ansys Aqwa

Ansys Aqwa menyediakan modul Hydrodynamic Response yang memungkinkan simulasi time-domain terhadap gerak kapal, termasuk roll decay test. Pada modul ini, pengguna dapat memasukkan kondisi awal simpangan roll serta parameter redaman tambahan (additional damping, termasuk komponen linear dan kuadratik) sebagai input eksplisit, di luar redaman potensial yang dihitung otomatis dari solusi difraksi-radiasi. Parameter input yang diperlukan

meliputi massa dan sebaran massa kapal (LCG, VCG) yang umumnya diperoleh dari perhitungan stabilitas (misalnya Maxsurf Stability), momen inersia massa ( $I_{xx}$ ) yang dapat diperoleh dari model 3D (misalnya SolidWorks), serta koefisien redaman tambahan (linear  $B_1$  dan kuadratik  $B_2$ ) sebagai variabel yang divariasikan dalam penelitian.

Dengan memvariasikan nilai  $B_1$  dan  $B_2$  pada simulasi, dapat diamati bagaimana bentuk kurva decay (laju peluruhan, jumlah osilasi hingga teredam, envelope amplitudo) berubah inilah yang menjawab rumusan masalah pertama penelitian.

Redaman potensial (radiasi) yang dihitung otomatis oleh Ansys Aqwa pada modul Hydrodynamic Response diselesaikan menggunakan panel method (boundary element method) berbasis teori potensial aliran (potential flow theory), yaitu dengan mendiskretisasi permukaan basah lambung kapal menjadi sejumlah panel dan menyelesaikan persamaan integral batas pada tiap panel untuk memperoleh koefisien hidrodinamis (added mass dan damping potensial). Redaman potensial ini pada gerak roll cenderung under-estimate dibandingkan redaman aktual kapal, karena teori potensial tidak menangkap efek viskos seperti eddy dan bilga keel sehingga diperlukan additional damping (linear  $B_1$  dan kuadratik  $B_2$ ) yang diinput secara eksplisit berdasarkan hasil ekstraksi dari roll decay test, sebagaimana dijelaskan pada 2.6.

## 2.7 Metode Ekstraksi Koefisien Redaman Roll

Untuk mengidentifikasi kembali nilai koefisien redaman dari data time history hasil roll decay test, diperlukan metode ekstraksi (curve fitting). Penelitian ini membandingkan tiga metode ekstraksi yang berbeda tingkat kompleksitas dan asumsinya.

### 2.7.1 Metode 1 Logarithmic Decrement

Metode ini merupakan pendekatan klasik yang sesuai untuk sistem dengan redaman linear murni. Berdasarkan dua puncak berurutan  $\phi_1$  dan  $\phi_2$  pada kurva decay, logarithmic decrement ( $\delta$ ) dihitung sebagai:

$$\Lambda = \ln \left( \frac{\theta_n}{\theta_{n+1}} \right) = \mu \times T_n \quad (19)$$

yang kemudian dikonversi menjadi damping ratio tak-berdimensi ( $\zeta$ ):

$$\zeta = \frac{\delta}{\sqrt{(2\pi)^2 + \delta^2}} \quad (20)$$

Metode ini menghasilkan satu nilai  $\zeta$  tunggal yang diasumsikan konstan terhadap amplitudo, sehingga tidak dapat menangkap sifat nonlinear redaman roll

$$\mu = \frac{\delta}{T_n} \quad B_1 = 2\mu \times I_{xx,total} \quad (21)$$

### 2.7.2 Metode 2 Extinction Curve

Metode ini dapat mengakomodasi komponen linear dan kuadratik sekaligus, mengikuti pendekatan Faltinsen dan Chakrabarti sebagaimana diterapkan oleh

Irkal, Nallayarasu, dan Bhattacharyya (2016). Untuk setiap pasangan puncak berurutan  $\varphi_k$  dan  $\varphi_{k+1}$  (bertanda sama), dihitung amplitudo rata-rata, log decrement, dan damping ratio per siklus:

$$\theta_m = \frac{\varphi_k + \varphi_{k+1}}{2} \quad (22)$$

setelah didapatkan amplitudo rata rata ( $\theta_m$ ) perpasangan puncak, selanjutnya dihitung rasio penurunan perpasangan puncak dengan rumus

$$Y = \frac{\varphi_k - \varphi_{k+1}}{\theta_m} \quad (23)$$

Setelah itu seluruh pasangan ( $\theta_m$ , Y) dari keempat sudut awal digabungkan (pooled), kemudian diregresikan secara linear

$$Y = a + b \theta_m \quad (24)$$

Intercept (a) dan slope (b) hasil regresi selanjutnya dikonversi menjadi koefisien redaman fisis melalui:

$$\mu = \frac{a}{T_n} \beta ; = \frac{3b}{8} \quad (25)$$

$$B_1 = 2\mu \times I_{xx,total} ; B_2 = \beta \times I_{xx,total} \quad (26)$$

Kualitas kesesuaian model dievaluasi melalui koefisien determinasi ( $R^2$ ). Dalam penerapannya, siklus pertama (dari titik pelepasan awal) dan pasangan puncak dengan amplitudo di bawah  $1^\circ$  dikeluarkan dari regresi, mengikuti praktik yang diterapkan oleh Irkal dkk. (2016).

### 2.7.3 Metode 3 Nonlinear Time-Domain Curve Fitting

Berbeda dengan dua metode sebelumnya yang bergantung pada deteksi puncak (peak detection), metode ini mencocokkan langsung seluruh kurva time history  $\varphi(t)$  hasil roll decay test dengan solusi numerik persamaan gerak roll nonlinear:

$$(I_{xx} + A_{44})\ddot{\varphi} + B_1\dot{\varphi} + B_2\varphi|\dot{\varphi}| + C\varphi = 0 \quad (27)$$

Turunan pertama ( $\dot{\varphi}$ ) dan kedua ( $\ddot{\varphi}$ ) dihitung langsung dari data time history menggunakan filter Savitzky-Golay. Persamaan gerak kemudian disusun ulang menjadi bentuk regresi linear terhadap B1 dan B2:

$$-I_{xx,total}\ddot{\varphi} - C\varphi = B_1\dot{\varphi} + B_2|\dot{\varphi}|\varphi \quad (28)$$

dengan  $C = I_{xx,total} \times \omega_n^2$ . Nilai B1 dan B2 diperoleh melalui regresi least-squares linear berganda terhadap seluruh titik data time history.

## 2.8 Penelitian Terdahulu

Irkal, Nallayarasu, dan Bhattacharyya (2016) dalam "CFD Approach to Roll Damping of Ship with Bilge Keel with Experimental Validation" melakukan studi eksperimen roll decay pada model kapal dengan enam konfigurasi bilga keel (termasuk tanpa bilga keel) pada tiga variasi draft, serta memvalidasi hasilnya dengan simulasi CFD (RANS, FLOW-3D). Studi ini menerapkan metode extinction curve untuk memisahkan komponen linear ( $B_1$ ) dan kuadratik ( $B_2$ ), dan menemukan bahwa pada

kondisi tanpa bilga keel, nilai koefisien determinasi ( $R^2$ ) fitting sangat rendah mengindikasikan redaman yang mendekati linear murni sedangkan pada kondisi berbilga keel,  $R^2$  meningkat signifikan seiring bertambahnya lebar bilga keel, mengonfirmasi peningkatan sifat nonlinear.

Ali, Katayama, dan Ikeda (2003) dalam "Roll Damping Characteristics of Fishing Boats with and without Drift Motion" memodifikasi metode prediksi Ikeda agar sesuai dengan karakteristik hidrodinamis kapal ikan Indonesia yang memiliki bentuk lambung round-hull dan bar keel/deadwood, dan memperoleh kesesuaian yang baik terhadap hasil uji eksperimen.

Penelitian-penelitian lain terkait pengaruh dimensi dan orientasi bilga keel terhadap redaman roll, di antaranya oleh Bangun, Wang, dan Utsunomiya (2010) yang meneliti pengaruh orientasi bilga keel pada barge menggunakan solver Navier–Stokes 2D, serta Thiagarajan dan Braddock yang meneliti pengaruh lebar bilga keel terhadap redaman pada model FPSO, turut menjadi rujukan pendukung bahwa redaman roll akibat bilga keel meningkat seiring bertambahnya lebar bilga keel dan bersifat nonlinear terhadap amplitudo konsisten dengan hipotesis awal penelitian ini.

Penelitian ini melengkapi studi-studi terdahulu dengan melakukan studi parametrik yang lebih luas kombinasi empat lebar bilga keel, empat variasi draft, dan empat sudut kemiringan awal (64 kondisi total) pada objek kapal ikan yang belum banyak diteliti secara spesifik dalam konteks studi parametrik redaman roll nonlinear, serta membandingkan tiga metode ekstraksi koefisien redaman sekaligus dalam satu kerangka penelitian yang sama.