



## Pengaruh Sudut Kemiringan dan Jarak antar Daun Kemudi Terhadap Kinerja *Maneuvering* KMP Bontoharu

Andi Haris Muhammad<sup>1\*)</sup>, Daeng Paroka<sup>2)</sup>, Sabaruddin Rahman<sup>2)</sup>, Mohammad Rizal Firmansyah<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Departemen Teknik Sistem Perkapalan

<sup>2)</sup>Departemen Teknik Kelautan

<sup>3)</sup>Departemen Teknik Perkapalan

Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin

Jl. Poros Malino Km.6, Bontomarannu, Gowa, Sulawesi Selatan 92171

disubmit pada : 14/08/19

direvisi pada : 16/10/19

diterima pada : 21/10/19

### Abstrak

Kapal ferry ro-ro sesuai fungsinya sebagai kapal penyeberangan penumpang dan kendaraan antar pulau memiliki karakteristik yang berbeda dibanding kapal niaga pada umumnya, khususnya penggunaan sistem kemudi ganda dengan rasio jarak antar daun kemudi yang relatif besar, hal ini sangat berdampak terhadap kemampuan olah gerak kapal. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kemampuan *maneuvering* kapal ferry melalui pengaturan sudut kemiringan dan jarak antar daun kemudi. Program MATLAB-Simulink digunakan dalam simulasi *turning circle* dan *zig-zag maneuvering*. Program simulasi telah dikembangkan dengan konsep *time domain simulation* berdasarkan persamaan model matematika pergerakan kapal pada 3-DOF (*Degres of Freedom*) yang meliputi persamaan komponen lambung, propeler dan daun kemudi beserta koefisien hidrodinamika didalamnya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa seiring dengan bertambahnya sudut kemiringan daun kemudi dapat meningkatkan kemampuan *turning circle* kapal, namun sebaliknya pada gerak *zig-zag maneuvering*. Selanjutnya dengan bertambahnya jarak antar daun kemudi dapat meningkatkan kemampuan baik *turning circle* dan *zig-zag maneuvering*, namun dengan momen daun kemudi yang relatif besar maka hal ini dapat membahayakan kapal.

Copyright © 2019, **KAPAL**, pISSN:1829-8370, eISSN : 2301-9069

Kata Kunci : Kapal ferry ro-ro, sudut daun kemudi, jarak daun kemudi, simulasi

### 1. PENDAHULUAN

Kelaiklautan kapal adalah hal yang mutlak dipenuhi sebagaimana ketentuan yang disyaratkan *International Safety Management (ISM) code* [1]. Ketentuan ini sejalan dengan Undang-Undang No 17 Tahun 2018 [2] tentang keselamatan pelayaran kapal yang beroperasi di perairan Indonesia. Kelaiklautan kapal adalah keadaan dimana kapal memenuhi persyaratan keselamatan, diantaranya adalah aspek *ship maneuverability* atau

kemampuan kapal untuk berbelok dan berputar saat berlayar, khususnya saat kapal beroperasi di perairan terbatas atau berada disekitar pelabuhan.

Secara prinsip *ship maneuverability* sangat dipengaruhi oleh desain bentuk lambung dibawah garis muat, sistem penggerak dan kendali yang dipergunakan. Sejumlah komponen tersebut secara langsung memberikan pengaruh yang signifikan terhadap gaya dan momen hidrodinamika saat kapal bermanuver.

Kapal ferry ro-ro sesuai fungsinya sebagai kapal penyeberangan penumpang dan kendaraan antar pulau memiliki karakteristik yang berbeda dibanding kapal niaga pada umumnya. Sejumlah

\*) Penulis Korespondensi :

Email : [andi\\_haris@ft.unhas.ac.id](mailto:andi_haris@ft.unhas.ac.id)

karakteristik kapal ferry ro-ro yang berpotensi dapat mempengaruhi tingkat kemampuan *maneuvering* kapal diantaranya adalah: i) Kapal memiliki sarat yang rendah ( $T$ ); ii) Kapal beroperasi pada perairan terbatas (pengaruh tingkat kedalaman perairan, angin dan gelombang); iii) Kapal memiliki bangunan atas dengan daerah luasan tangkap angin yang relatif besar serta; iv) Kapal dilengkapi dengan sistem penggerak ganda dan daun kemudi ganda (TRTP) dengan rasio jarak antar sistem relatif besar.

Hasil penelitian terdahulu menyebutkan sejumlah pengaruh yang berpotensi terhadap pengurangan tingkat kemampuan *maneuvering* kapal ferry ro-ro antara lain adalah kapal dengan sarat ( $T$ ) yang relatif rendah [3], faktor lingkungan pelayaran seperti halnya tingkat kedalaman perairan [4], kecepatan angin dan tinggi gelombang [5 dan 6] serta bangunan atas yang relatif besar [7]. Fenomena di atas secara signifikan dapat mengubah kecepatan dan arah gerak kapal sebagai akibat reaksi gaya dan momen yang ditimbulkan saat kapal bermanuver, kondisi ini dapat lebih diperburuk dengan meningkatnya kemiringan kapal, namun dengan kecepatan operasi kapal yang rendah serta perbandingan  $B/T$  yang relatif besar hal ini dapat mengurangi kemiringan kapal ferry ro-ro (atau  $\leq 10$  deg) sebagaimana penelitian Muhammad et al. [8].

Upaya yang telah dilakukan sejumlah peneliti dalam meningkatkan kemampuan *maneuvering* kapal sebagaimana ketentuan IMO [9] yaitu dengan melalui penggunaan daun kemudi ganda dan propeler ganda (TRTP) yang diyakini lebih akurat dibanding penggunaan daun kemudi tunggal dan propeler tunggal (SRSP) sebagai peralatan penggerak dan pengendali kapal [10 dan 11]. Secara spesifik penelitian penggunaan TRTP ini terkonsentrasi dalam menentukan jarak antar daun kemudi pada kapal berdasarkan fenomena aliran dibelakang kapal saat *maneuvering* [12, 13 dan 14].

Penelitian ini bertujuan untuk memprediksi dan menganalisis kemampuan *maneuvering* KMP Bontoharu melalui variasi sudut kemiringan dan jarak antar daun kemudi pada 3-DOF (*Degres of Freedom*) yang meliputi gerak *surge*, *sway* dan *yaw*. Selanjutnya melalui program MATLAB-Simulink dengan metode *time domain simulation* yang dikembangkan dalam memprediksi kemampuan *maneuvering* ini dapat bermanfaat dalam perancangan desain kapal sejenis, khususnya dalam penentuan peletakan daun kemudi ganda.

## 2. METODE

Kapal ferry ro-ro yang digunakan dalam penelitian ini adalah KMP Bontoharu. Kapal berkapasitas 1050 GT dengan panjang ( $L_{OA}$ ) 54,00 m, daya motor penggerak ( $P_B$ ) 2x1000 HP dengan kecepatan dinas ( $V_S$ ) 6,618 m/s adalah milik PT (Persero) ASDP Indonesia Ferry. Kapal dioperasikan pada lintasan penyeberangan Bira-Pamatata Provinsi Sulawesi Selatan. Kapal dioperasikan dengan jumlah 12 ABK tersebut adalah berkapasitas 400 penumpang yang seluruhnya ditempatkan pada geladak penumpang atau berada satu geladak dibawah geladak anjungan dan 22 kendaraan (terdiri 8 sedan dan 14 truk) yang ditempatkan pada geladak kendaraan atau geladak utama kapal. Data ukuran utama kapal, propeler dan daun kemudi sebagaimana ditampilkan pada Tabel 1 dan Tabel 2. Selanjutnya rencana garis air dan rencana umum kapal sebagaimana ditampilkan pada gambar 1 dan 2.

Tabel 1. Ukuran Utama Kapal

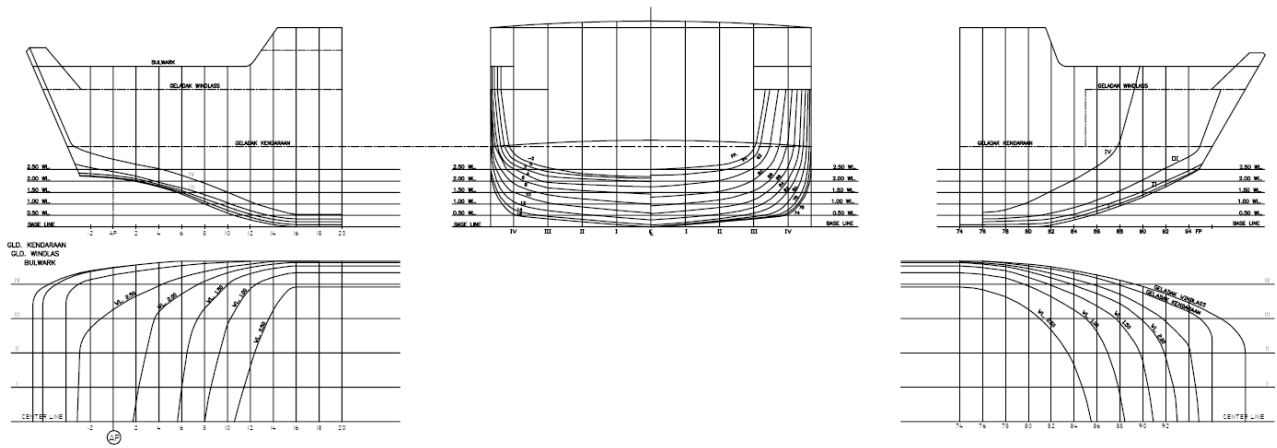
Parameter	Dimensi
Panjang keseluruhan kapal ( $L_{OA}$ ), m	54,00
Panjang antar garis tegak ( $L_{BP}$ ), m	47,45
Lebar ( $B$ ), m	14
Tinggi ( $H$ ), m	3,4
Sarat ( $T$ ), m	2,45
Kecepatan ( $V$ ), m/s	6,618
Displamen ( $\Delta$ ), ton	1148

Tabel 2. Parameter Propeler dan Daun Kemudi

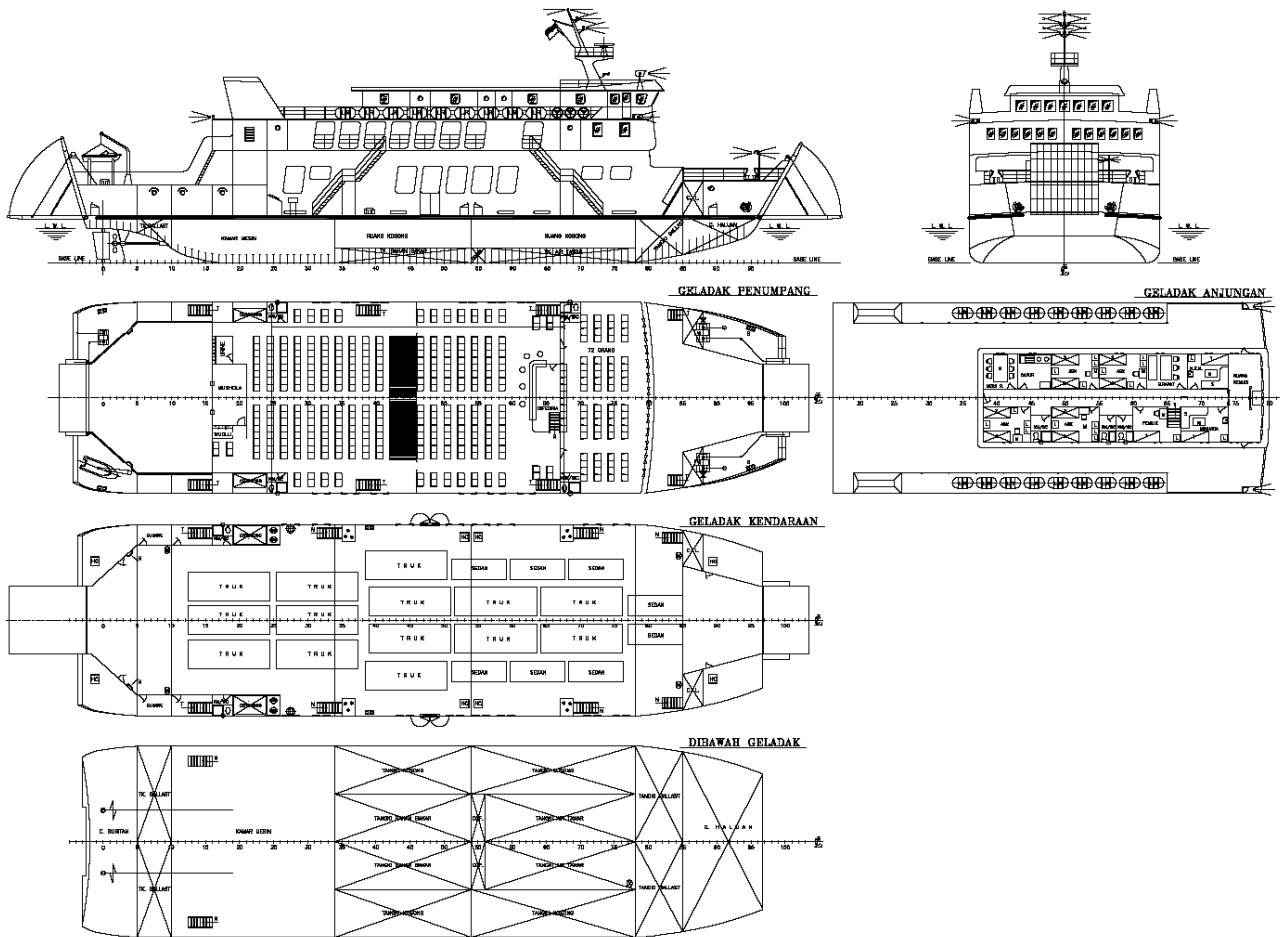
Parameter	Dimensi
Jumlah daun propeler ( $Z$ )	2 x 4
Diameter propeler ( $D_P$ ), m	1,422
Putaran propeler ( $n_P$ ), put/s	8,764
Tinggi daun kemudi ( $H$ ), m	1,550
Panjang daun kemudi ( $C_L$ ), m	0,900
Luas daun kemudi ( $A_R$ ), m <sup>2</sup>	2 x 1,395
Daya motor ( $P_B$ ), HP	2 x 1000
Putaran motor ( $n_E$ ), put/m	1850

Untuk mengetahui pengaruh sudut kemiringan daun kemudi ( $\delta$ ) dan jarak antar daun kemudi ( $y_R$ ) terhadap kemampuan *maneuvering* kapal pada kecepatan kapal ( $V_S$ ). Sejumlah skenario yang digunakan dalam simulasi ditampilkan pada Tabel 3.

Prediksi gerak *maneuvering* kapal disimulasi melalui program MATLAB-Simulink pada 3-DOF (*Degree of Freedom*) yaitu gerak *surge* ( $X$ ), *sway* ( $Y$ ) dan *yaw* ( $N$ ) sebagaimana kordinat sistem dan persamaan gerak *maneuvering* pada Gambar 3 dan Persamaan 1 [11].



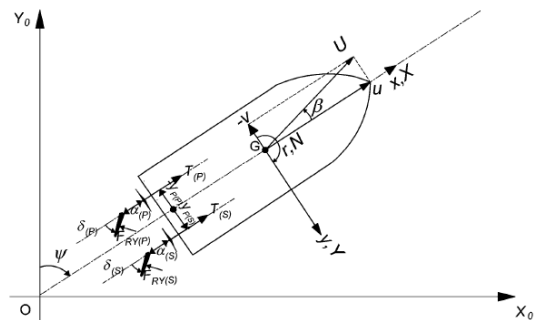
Gambar 1. Rencana garis KMP Bontoharu



Gambar 2. Rencana umum KMP Bontoharu

Tabel 3. Skenario Simulasi

No.	Jenis Simulasi	$\delta$ (deg.)	$y_P=y_R$ (m)	$V_s$ (m/s)
1	Turning circle (L)	35	0,9	6,618
2	Turning circle (R)	35	0,9	6,618
3	Turning circle (L)	20	2,3	6,618
4	Turning circle (R)	20	2,3	6,618
5	Turning circle (L)	35	2,3	6,618
6	Turning circle (R)	35	2,3	6,618
7	Zig-zag maneuvering	20/20	0,9	6,618
8	Zig-zag maneuvering	10/10	2,3	6,618
9	Zig-zag maneuvering	20/20	2,3	6,618



Gambar 3. Koordinat sistem [10]

$$\begin{aligned}
m(\dot{u} - rv) &= X_H + X_{P\{S\}} + X_{R\{S\}} \quad (1) \\
m(\dot{v} - ru) &= Y_H + Y_{P\{S\}} + Y_{R\{S\}} \\
I_{ZZ}\ddot{\psi} &= N_H + N_{P\{S\}} + N_{R\{S\}}
\end{aligned}$$

Dimana:  $u$ ,  $v$  dan  $r$  adalah komponen kecepatan terhadap titik berat kapal (m/s).  $U$  adalah resultan dari kecepatan kapal (m/s);  $m$  adalah displasmen kapal (ton);  $I_{ZZ}$  adalah momen inersia.  $X$ ,  $Y$  dan  $N$  adalah gaya dan momen hidrodinamika kapal, tanda  $S$  dan  $P$  dalam kurung menunjukkan masing-masing peletakan daun kemudi / propeler kanan dan kiri. Gaya dan momen hidrodinamika tersebut dapat didefinisikan secara terpisah kedalam berbagai fisik komponen gaya dan momen lambung ( $X_H$ ,  $Y_H$ , dan  $X_H$ ), propeler ( $X_P$ ,  $Y_P$ , dan  $X_P$ ) dan kemudi ( $X_R$ ,  $Y_R$ , dan  $X_R$ ).

Gaya dan momen yang ditimbulkan lambung ( $X_H$ ,  $Y_H$ , dan  $X_H$ ) dapat dipresentasikan sebagaimana Persamaan 2 [15]

$$\begin{aligned}
X_H &= \frac{1}{2} \rho L d U^2 (X'_0 + X'_{\beta\beta} \beta^2 \\
&\quad + (X'_{\beta r} - m'_y) \beta r' + X'_{rr} r'^2 + X'_{\beta\beta\beta\beta} \beta^4) \\
Y_H &= \frac{1}{2} \rho L d U^2 (Y'_\beta \beta + (Y'_r - m'_x) r' \\
&\quad + Y'_{\beta\beta\beta} \beta^3 + Y'_{\beta\beta r} \beta^2 r' + Y'_{\beta r r} \beta r'^2 + Y'_{rrr} r'^3) \\
N_H &= \frac{1}{2} \rho L^2 d U^2 (N'_\beta \beta + N'_r r' + N'_{\beta\beta\beta} \beta^3 \\
&\quad + N'_{\beta\beta r} \beta^2 r' + N'_{\beta r r} \beta r'^2 + N'_{rrr} r'^3)
\end{aligned} \quad (2)$$

Dimana:  $\beta = \tan^{-1}(v/u)$  adalah persamaan sudut belok kapal (*deg.*) dan  $r' = r(L/U)$  adalah persamaan perubahan sudut putar kapal per detik (*turning rate*, tanpa dimensi).

Gaya dan momen yang ditimbulkan propeler ( $X_P$ ,  $Y_P$ , dan  $N_P$ ) dan kemudi ( $X_R$ ,  $Y_R$ , dan  $N_R$ ) ganda dengan jarak antar propeler ( $y_P$ ) dan kemudi ( $y_R$ ) terhadap garis tengah membujur kapal dapat diprediksi sebagaimana persamaan 3 dan 4 [11 dan 17].

$$\begin{aligned}
X_{P\{S\}} &= \rho \left( (1 - t_{P\{S\}}) n_{P\{S\}}^2 D_{P\{S\}}^4 K_{T\{S\}} \left( J_{P\{S\}} \right) \right) \quad (3) \\
Y_P &= 0 \\
N_{P\{S\}} &= y_{P\{S\}} X_{P\{S\}}
\end{aligned}$$

dimana:

$$\begin{aligned}
K_{T\{S\}}(J_{P\{S\}}) &= C_1 + C_2 J_{P\{S\}} + C_3 J_{P\{S\}}^2 \\
J_{P\{S\}} &= (u - y_P r (1 - w_{P\{S\}})) / (n_{P\{S\}} D_{P\{S\}})
\end{aligned}$$

Dimana;  $t_P$  adalah koefisien pengurangan gaya dorong,  $n$  adalah putaran propeler (put/s),  $D_P$  adalah diameter propeler (m),  $K_T$  adalah koefisien gaya dorong,  $w_P$  adalah koefisien fraksi arus ikut propeler efektif,  $J_P$  adalah angka maju dan  $C_1$ ,  $C_2$  dan  $C_3$  adalah konstanta angka maju propeler.

Selanjutnya gaya dan momen pada daun kemudi ( $X_R$ ,  $Y_R$ , dan  $X_R$ ) dapat dirumuskan seesuai Persamaan 4.

$$\begin{aligned}
X_{R\{S\}} &= -(1 - t_{R\{S\}}) F_{RY\{S\}} \sin \delta_{\{S\}} \\
Y_{R\{S\}} &= -(1 + a_H) F_{RY\{S\}} \cos \delta_{\{S\}} \\
N_R &= -(x_R + a_H x_H) F_{RY\{S\}} \cos \delta_{\{S\}} \\
&\quad + y_{P\{S\}} (1 - t_{R\{S\}}) F_{RY\{S\}} \sin \delta_{\{S\}}
\end{aligned} \quad (4)$$

dimana:  $\delta$  adalah sudut daun kemudi (*deg.*);  $x_R$  adalah posisi jarak daun kemudi (m),  $t_R$ ,  $a_H$  dan  $x_H$  adalah koefisien gaya interaksi lambung, propeler dan daun kemudi. Reaksi gaya normal daun kemudi pada poros daun kemudi ( $F_{RY}$ ) dapat diekspresikan sebagaimana Persamaan 5:

$$F_{RY\{S\}} = \frac{1}{2} \rho A_R U_{R\{S\}}^2 f_\alpha \sin \alpha_{R\{S\}} \quad (5)$$

Dimana:  $A_R$  adalah luas permukaan daun kemudi ( $m^2$ ),  $f_\alpha$  adalah koefisien lift daun kemudi secara gradien sebagai fungsi dari aspek rasio daun kemudi ( $f_\alpha = 6.13 A / (2.25)$ ). Resultan kecepatan aliran ( $U_R$ ) dan sudut serang aliran efektif ( $\alpha_R$ ) terhadap permukaan daun kemudi dapat diekspresikan sebagaimana Persamaan 6.

$$\begin{aligned}
U_{R\{S\}} &= \sqrt{u_{R\{S\}}^2 + v_{R\{S\}}^2} \\
\alpha_{R\{S\}} &= \delta_{\{S\}} - \delta_{R\{S\}} \left( \beta_{R\{S\}} \right)
\end{aligned} \quad (6)$$

Kecepatan aliran terhadap daun kemudi pada arah surge ( $u_R$ ) dapat diekspresikan sebagaimana Persamaan 7.

$$\begin{aligned}
u_{R\{S\}} &= \varepsilon_{\{S\}} u_{P\{S\}} \\
&\quad \times \sqrt{\eta_{P\{S\}} \left\{ 1 + \kappa \left( \sqrt{1 + \frac{8K_{T\{S\}}}{\pi J_{P\{S\}}^2} - 1} \right) \right\}^2 + (1 - \eta_{P\{S\}})}
\end{aligned} \quad (7)$$

dimana:

$$\varepsilon_{\{P\}}^{\{S\}} = \frac{1 - w_{R\{P\}}^{\{S\}}}{1 - w_{P\{P\}}^{\{S\}}}; \kappa = \frac{kx}{\varepsilon_{\{P\}}^{\{S\}}}; \eta_{P\{P\}}^{\{S\}} = \frac{D_{P\{P\}}^{\{S\}}}{H_{R\{P\}}^{\{S\}}};$$

$$u_{P\{P\}}^{\{S\}} = \left(1 - w_{P\{P\}}^{\{S\}}\right) \left(u - y_{P\{P\}}^{\{S\}} r\right)$$

Selanjutnya kecepatan aliran terhadap daun kemudi pada arah sway ( $v_R$ ) dapat diekspresikan masing-masing sebagaimana Persamaan 8.

$$v_{R\{P\}}^{\{S\}} = u_{R\{P\}}^{\{S\}} \tan\left(\delta_{R\{P\}}^{\{S\}}\right) \quad (8)$$

dimana:

$$\delta_{R\{P\}}^{\{S\}} = \gamma_{R\{P\}}^{\{S\}} \beta_{R\{P\}}^{\{S\}} + \tan^{-1}\left(\frac{y_{R\{P\}}^{\{S\}}}{x_{R\{P\}}^{\{S\}}}\right)$$

$$\beta_{R\{P\}}^{\{S\}} = \beta - L_{R\{P\}}^{\{S\}} r'$$

Dimana:  $\delta_R$  adalah sudut kemiringan daun kemudi efektif (deg),  $\beta_R$  adalah sudut belok kapal efektif (deg.),  $\gamma_R$  dan  $L_R$  adalah masing-masing koefisien *flow-straightening* terhadap arah sumbu y (*sway*) dan z (*yaw rate*),  $\eta_P$  adalah efisiensi propeler efektif dan  $D_P/H$  adalah rasio diameter propeler terhadap tinggi daun kemudi.

Koefisien turunan hidrodinamika lambung (non-linear) dan koefisien interaksi lambung-propeler dan kemudi yang digunakan dalam penelitian ini sebagaimana terdapat pada Tabel 4 diprediksi berdasarkan model persamaan regresi yang dikembangkan oleh Yoshimura dan Masumoto [16]. Model regresi ini adalah salah satu model yang digunakan Sukas et al. [18] dalam pengembangan Program SINMAN (*MANeuvering SIMulation*) untuk memprediksi *turning circle* dan *zig-zag maneuvering* pada kapal dengan sistem kemudi dan propeler SRSP dan TRTP serta validasinya melalui pengujian model atau *free running test*. Prediksi koefisien tahanan kapal ( $X'o$ ) dengan Metode Holtrop [19], massa tambahan kapal ( $m_x$  dan  $m_y$ ) pada sumbu x dan y sebagaimana yang diprediksi Yoshimura [15].

Tabel 4. Koefisien turunan hidrodinamika kapal

Koefisien	Nilai	Koefisien	Nilai
$X'o$	-0.0250	$Y'\beta$	0.4464
$X'\beta\beta$	-0.4135	$Y'r-m'x$	0.1015
$X'\beta r-m'y$	0.3216	$Y'\beta\beta\beta$	1.1070
$X'rr$	-0.0093	$Y'\beta\beta r$	-0.7500
$X'\beta\beta\beta\beta$	-0.2563	$Y'\beta r r$	0.3848

		$Y'rrr$	-0.0510
$N'\beta$	0.1033	$l-tr$	0.6100
$N'r$	-0.0451	$ah$	0.7309
$N'\beta\beta\beta$	0.1852	$\varepsilon$	0,7470
$N'\beta\beta r$	-0.4453	$K$	0,5500
$N'\beta r r$	-0.0187	$l'R$	-0.9000
$N'rrr$	-0,1068	$\gamma r$	0,5583

Selanjutnya untuk memperoleh karakteristik gerak *turning circle* dan *zig-zag maneuvering* pengaruh sudut kemiringan ( $\delta$ ) dan jarak antar daun kemudi ( $y_R$ ) melalui simulasi numerik dengan menggunakan konsep *time domain simulation* [4 dan 8]. Metode simulasi numerik adalah salah satu metode yang dirokomendasi IMO [8] dalam memprediksi *maneuvering* kapal disamping melalui pengujian model (*free running test*). Alur yang dilalui kapal melalui simulasi numerik diperoleh dari dua kali integrasi persamaan gerak kapal (*surge*, *sway* dan *yaw*) sebagai mana proses integrasi pada gerak surge pada Persamaan 9.

$$X_H + X_{P\{P\}}^{\{S\}} + X_{R\{P\}}^{\{S\}} = m(\dot{u} - rv) \quad (9)$$

$$\dot{u} = \left(\frac{X_H + X_{P\{P\}}^{\{S\}} + X_{R\{P\}}^{\{S\}}}{m}\right) + rv$$

$$u = \int \dot{u} dt$$

$$x = \int u dt$$

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

KMP Bontoharu dengan panjang kapal ( $L_{BP}=47,45$  m) dilengkapi konfigurasi sistem propulsi dan daun kemudi ganda dengan jarak antar daun kemudi ( $y_R=2,3$  m) serta sudut kemiringan daun kemudi maksimum ( $\delta=\pm 35^\circ$ ). Pengaruh sudut kemiringan dan jarak antar daun kemudi dipertimbangkan dalam analisis ini.

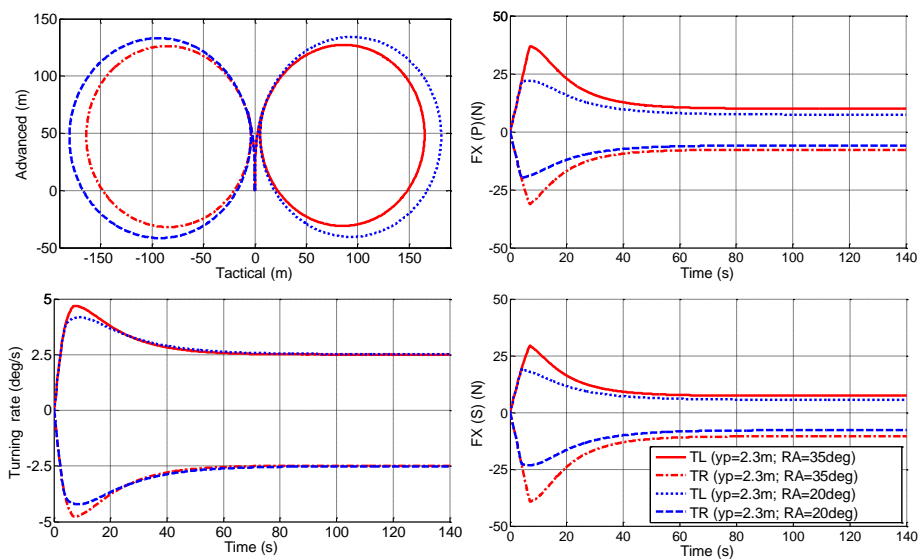
Gambar 4 menampilkan perbandingan kemampuan *turning circle* kiri (*TL*) dan kanan (*TR*) KMP Bontoharu dengan perbedaan sudut kemiringan daun kemudi ( $\delta=\pm 20^\circ$  dan  $\pm 35^\circ$ ) pada jarak antar daun kemudi ( $y_R=2,3$  m). Hasil simulasi numerik menunjukkan bahwa penggunaan sudut kemiringan daun kemudi  $\pm 20^\circ$  (atau sudut kemiringan yang umum digunakan dalam pengoperasian kapal) memiliki diameter tactical ( $D_T$ ) kanan dan kiri masing-masing sebesar 180,20 m (3,80L) dan 181,20 m (3,82L) serta advance diameter ( $A_D$ ) kanan dan kiri sebesar 133,10 m (2,81L) dan 134,10 m (2,83L). Selanjutnya untuk sudut kemiringan daun kemudi  $\pm 35^\circ$  (atau sudut

kemiringan maksimum sebagaimana yang disarankan IMO), pada sudut ini kemampuan maneuver KMP Bontoharu lebih baik dibandingkan pada sudut kemiringan daun kemudi  $\pm 35^\circ$  dengan pengurangan diameter taktikal ( $D_T$ ) masing-masing sebesar 9,1% (2,80L) dan 8,9% (3,48L) serta advance diameter ( $A_D$ ) kanan dan kiri sebesar 5,2% (2,66L) dan 5,1% (2,68L). Meningkatnya kemampuan ini sangat dipengaruhi reaksi gaya normal daun kemudi ( $F_X$ ), namun dengan nilai *tactical* dan *advance diameter* yang relatif kecil hal ini sangat berpotensi membahayakan kapal dengan meningkatkan sudut kemiringan (*heeling*) kapal saat *maneuver* [8].

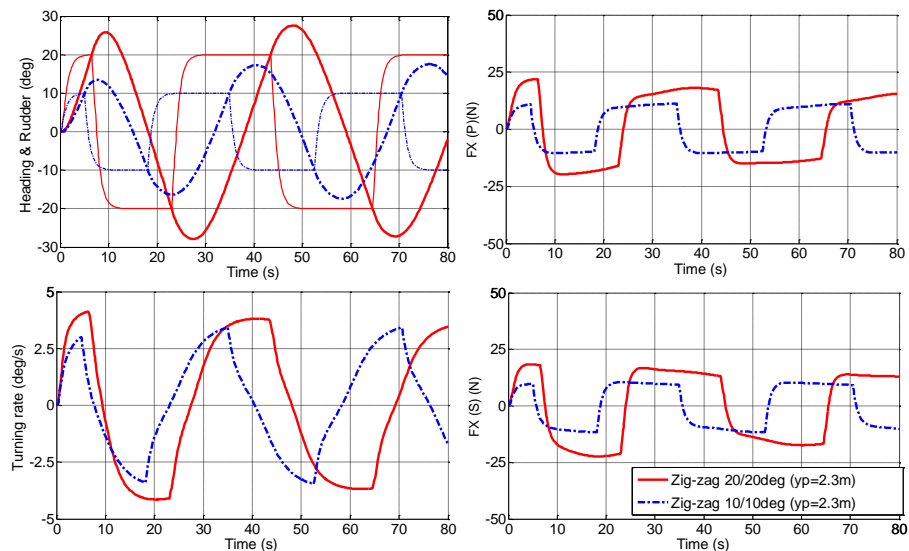
Pada Gambar 4 menampilkan pula perbedaan nilai *tactical* ( $D_T$ ) dan *advance diameter* ( $A_D$ ) antara turning kanan dan kiri yaitu masing-masing sekitar 1%. Turning kanan memiliki karakter lebih kecil dibanding turning kiri pada masing-masing

kemiringan daun kemudi, perbedaan karakter ini sangat dipengaruhi reaksi gaya normal pada masing-masing daun kemudi (kiri dan kanan) saat kapal manuver.

Gambar 5 menampilkan gerak *zig-zag maneuver*  $10^\circ/10^\circ$  dan  $20^\circ/20^\circ$ , dengan melalui penambahan sudut kemiringan kemudi (yaitu dari  $10^\circ/10^\circ$  menjadi  $20^\circ/20^\circ$ ), hal ini berdampak terhadap penurunan kemampuan *heading* kapal saat *zig-zag maneuver* yang ditandai dengan bertambahnya nilai sudut simpang ( $1^{st}$  overshoot dan  $2^{nd}$  overshoot) dan waktu (*time*) yang diperlukan masing-masing 40,56% ( $1^{st}$  overshoot) dan 21,07% ( $2^{nd}$  overshoot) serta 24,73% (*Time*) sebagaimana ditampilkan pada Tabel 5. Secara umum hasil simulasi *turning circle* ( $\delta = \pm 35^\circ$ ) dan *zig-zag maneuver* ( $\delta = 10^\circ/10^\circ$  dan  $20^\circ/20^\circ$ ) memenuhi sesuai dengan ketentuan IMO [9].



Gambar 4. Perbandingan turning circle antara 20 dan 35 deg.

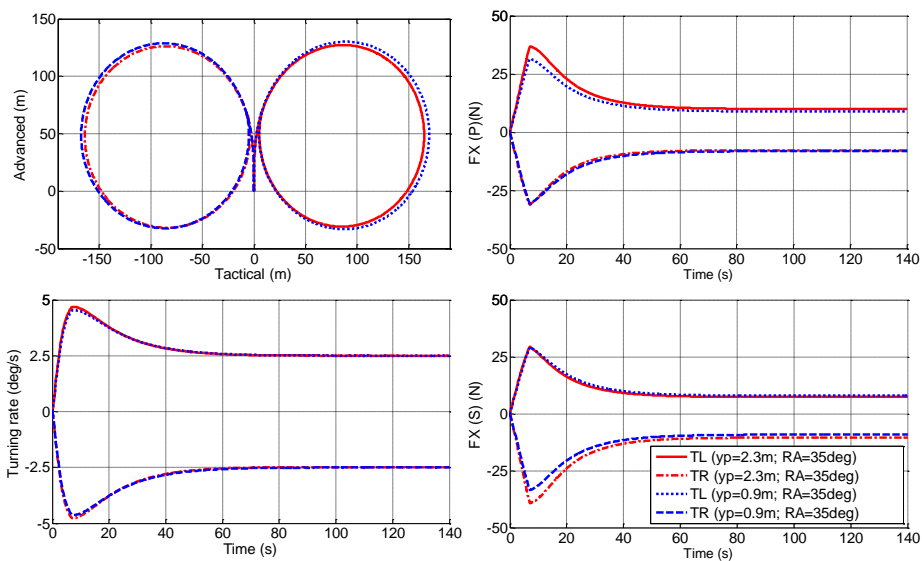


Gambar 5. Perbandingan Zig-zag manuver antara 10/10 dan 20/20 deg.

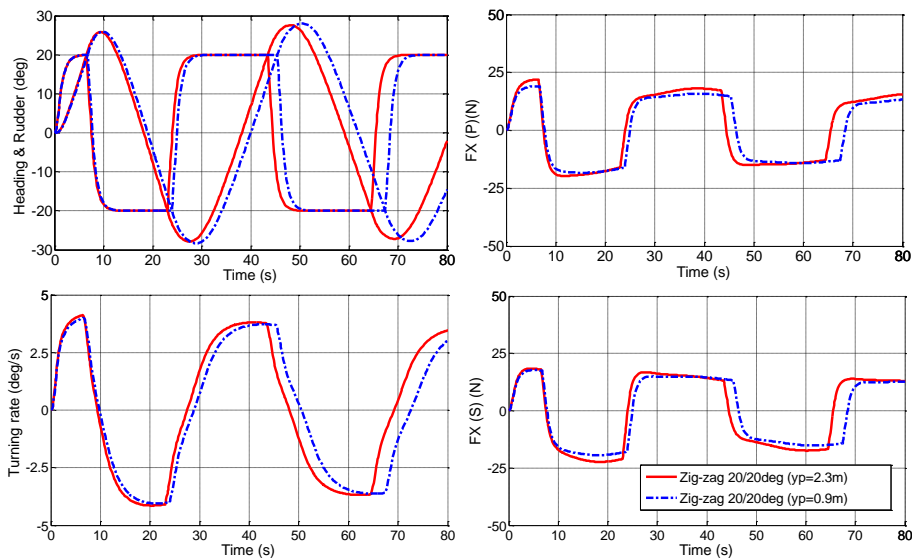
Gambar 6 menampilkan kemampuan *turning circle* kiri dan kanan KMP Bontoharu dengan perbedaan jarak antar daun kemudi terhadap garis tengah membujur kapal ( $y_R=2,3$  m dan  $0,9$  m) pada sudut kemiringan daun kemudi  $\pm 35^\circ$ . Penggunaan jarak antar daun kemudi terhadap garis tengah membujur kapal ( $y_R=0,9$  m) atau jarak antar daun kemudi sebagaimana yang direkomendasikan Gim [12]. Hasil simulasi menunjukkan bahwa dengan jarak antar daun kemudi kapal memiliki *tactical diameter* ( $D_T$ ) kanan dan kiri masing-masing sebesar  $167,50$  m ( $3,53L$ ) dan  $169,90$  m ( $3,58L$ ) serta *advance diameter* ( $A_D$ ) kanan dan kiri sebesar  $128,70$  m ( $2,81L$ ) dan  $130,10$  m ( $2,83L$ ) Hasil *turning circle* ini lebih besar masing-masing  $2,15\%$  dan  $2,88\%$  untuk *tactical diameter* dan  $1,98\%$  dan  $2,15\%$  untuk *advance diameter* dibanding dengan kemampuan *turning circle* kapal dengan jarak antar

daun kemudi ( $y_R=2,3$ m). Berkurangnya kemampuan ini seiring dengan pengurangan jarak antar daun kemudi yang menyebabkan berkurangnya momen yang dihasilkan daun kemudi saat kapal bermanuver

Selanjutnya untuk gerak *zig-zag maneuver*  $20^\circ/20^\circ$  sebagaimana Gambar 7, dengan melalui pengurangan jarak antar daun kemudi, hal ini mengurangi pula kemampuan *heading* kapal saat *zig-zag maneuver* yang ditandai dengan meningkatnya nilai sudut simpang sebesar  $3,04\%$  ( $1^{st}$  overshoot) dan  $2,84\%$  ( $2^{nd}$  overshoot)% sebagaimana ditampilkan pada Tabel 5. Secara umum hasil simulasi numerik (*turning circle* dan *zig-zag maneuvering*) memiliki kesamaan karakteristik dengan hasil simulasi numerik dan *free running* sebagaimana penelitian Khanfir et al. [11].



Gambar 6. Perbandingan turning circle 35 deg. antara  $y_p=2,3$  m dan  $0,9$  m.



Gambar 7. Perbandingan Zig-zag maneuver 20/20 deg. antara  $y_p=2,3$  m dan  $0,9$  m

Tabel 5. Hasil Simulasi *Turning circle* dan *Zig-zag Maneuvering*

No.	Jenis Simulasi	$\delta$ (deg.)	$y_{P-YR}$ (m)	$y_{P-YR}$ (m)	$V_s$ (m/s)	$DT$ (m)	$AD$ (m)	$U$ (m/s)	$I^s$ (deg)	Time (s)	$2^{nd}$ (deg.)	Time (s)
1	<i>Turning circle (L)</i>	35	0,9	0,9	6,618	169,90	130,10	3,61	-	-	-	-
2	<i>Turning circle (R)</i>	35	0,9	0,9	6,618	167,50	128,70	3,55	-	-	-	-
3	<i>Turning circle (L)</i>	20	2,3	2,3	6,618	181,20	134,10	3,89	-	-	-	-
4	<i>Turning circle (R)</i>	20	2,3	2,3	6,618	180,20	133,10	3,89	-	-	-	-
5	<i>Turning circle (L)</i>	35	2,3	2,3	6,618	165,00	127,30	3,50	-	-	-	-
6	<i>Turning circle (R)</i>	35	2,3	2,3	6,618	163,90	126,20	3,47	-	-	-	-
7	<i>Zig-zag maneuvering</i>	20/20	0,9	0,9	6,618	-	-	-	5,92	6,70	8,32	23,94
8	<i>Zig-zag maneuvering</i>	10/10	2,3	2,3	6,618	-	-	-	3,41	4,90	6,22	18,11
9	<i>Zig-zag maneuvering</i>	20/20	2,3	2,3	6,618	-	-	-	5,74	6,51	7,88	19,48

#### 4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi numerik pengaruh sudut kemiringan dan jarak antar daun kemudi KMP Bontoharu disimpulkan bahwa dengan meningkatnya sudut kemiringan daun kemudi, hal ini sangat signifikan terhadap peningkatan kemampuan gerak *turning circle* kapal, namun sebaliknya pada gerak *zig-zag maneuvering*. Selanjutnya dengan bertambahnya jarak antar daun kemudi, hal ini dapat meningkatkan baik kemampuan *turning circle* maupun *zig-zag maneuvering*, namun pertambahan jarak antar daun kemudi yang relatif besar dapat membahayakan keselamatan kapal.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis pertama mewakili seluruh peneliti mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian (LP2M) Universitas Hasanuddin yang telah mendanai kegiatan penelitian ini, melalui pendanaan hibah Penelitian Dasar Unhas Sesuai SK Rektor Unhas No. 2006/UN4.1/KEP/2019 Tahun Anggaran 2019. Terima kasih pula kepada PT (Persero) ASDP Indonesia Ferry yang telah mendukung data kapal sebagai objek dalam penelitian ini. Selanjutnya terimakasih pada mahasiswa yang tergabung dalam kelompok penelitian bersama pada LBE Propulsi Kapal Program Studi Teknik Sistem Perkapalan Universitas Hasanuddin yang telah membantu selama proses simulasi dan pemrograman komputer.

#### DAFTAR PUSTAKA

[1] [IMO] International Maritim Oranization. ISM Code, International Safety Management Code with Guidelines for its Implementation. London (UK): IMO.2014.

- [2] [Kemenhub RI] Kementerian Perhubungan Republik Indonesia. Undang-Undang Nomor 17 Tahun 2008 tentang pelayaran. Jakarta (ID): Kemenhub RI.2008.
- [3] D. Paroka, A.H. Muhammad and S. Asri, "Maneuverability of Ships with Small Draught in Steady Wind." *Makara J. Technol.* Vol. 20, No 1, pp24-30. 2016
- [4] A. Maimun, A. Priyanto, A.H Muhammad, C.C. Scully, Z.L. Awal, "Maneuvering Prediction of Pusher Barge in Deep and Shallow Water". *Ocean Engineering*, Vol. 38(11-12), pp. 1277-1356, 2011.
- [5] D. Paroka, A.H. Muhammad, S. Asri, "Steady State Equilibrium of Ship Maneu-ving under Combined Action of Wind and Wave." *Jurnal Teknologi (Science and Engineering)*, Vol. 76, pp. 67-75. 2015
- [6] D. Paroka, A.H. Muhammad and S. Asri, "Prediction of Ship Turning Maneuvers in Constant Wind and Regular Wave." *International Journal of Technology*. Vol 8 (3), pp 387-397. 2017
- [7] T. Fujiwara and M. Ueno, "Cruising Performance of a Large Passenger Ship in Heavy Sea." In. *Proceedings of the Sixteenth International Offshore and Polar Engineering Conference San Francisco, California, USA.* 2006
- [8] A.H. Muhammad, M. Hasbullah, M.A. Djabbar, Handayani, "Comparison Between Conventional and Azimuthing Podded Propulsion on Maneuvering of A Ferry Utilizing Matlab Simulink Program," *International Journal of Technology*. Vol, 6, Issue 3, pp. 452-461, 2015.



- [9] [IMO] International Maritime Organization, Standards for Ship Maneuverability. Report of the Maritime Safety Committee on its Seventy-Sixth Session-Annex 6 (Resolution MSC. 137(76)). London (UK): IMO. 2002.
- [10] S. Khanfir, V. Nagarajan, K. Hasegawa, S.K. Lee, “Estimation of mathematical model and its coefficients of ship manoeuvrability for a twin propeller twin-rudder ship.” In *International Conference on Marine Simulation and Ship Maneuverability*. Panama City, Panama. vol. 8. pp. 159–166. 2009.
- [11] S. Khanfir, K. Hasegawa, V. Nagarajan, K. Shouji, S.K. Lee. “Manoeuvring Characteristics Of Twin-Rudder Systems: Rudder-Hull Interaction Effect On The Manoeuvrability Of Twin-Rudder Ships”. *J Mar Sci Technol*. Vol 16. pp472–490. 2011
- [12] O.S. Gim, “Assessment Of Flow Characteristics Around Twin Rudder With Various Gaps Using PIV Analysis In Uniform Flow.” *Ocean Eng*. vol 66, pp1–11. 2013
- [13] J. Liu and R. Hekkenberg. “Hydrodynamic Characteristics Of Twin-Rudders At Small Attack Angles” in *The 12 th International Marine Design Conference (IMDC, Tokyo, 2015*.
- [14] L. Chen, X. Zhu, and L. Zhou, “Hydrodynamic Characteristics Of Twin Rudders” in *The 9th International Conference on Computational Methods*. 2013
- [15] Y. Yoshimura, “Investigation into the Yaw-checking Ability in Ship Maneuverability Standard.” In *Proceeding Prediction of Ship Maneuvering Performance*, Tokyo, Japan, 2001
- [16] Y. Yoshimura and Y. Masumoto, “Hydrodynamic Database And Manoeuvring Prediction Method With Medium High-Speed Merchant Ships And Fishing Vessels.” In *Proceeding International Conference on Marine Simulation and Ship Maneuverability 2012*, Singapura.
- [17] A.K. Dash, V. Nagarajan and O.P. Sha, “Uncertainty Assessment For Ship Maneuvering Mathematical Model.” *International Shipbuilding Progress*. Vol. 62 pp 57–111, 2015.
- [18] Theoretical background and application of MANSIM for ship maneuvering simulations,” *Ocean Engineering*, In press, available online 19 September 2019
- [19] J. Holtrop, “A Statistical Re-analysis of Resistance and Propulsion Data,” *Journal of International Shipbuilding Progress*, Volume 31, pp. 272-276, 1984