

# SISTEM PENGENDALI *MANEUVER* PADA KAPAL PERANG DENGAN METODE *SLIDING MODE CONTROL*

Oktia Dwi Irna Aini dan Dr. Dra. Mardlijah, MT  
 Jurusan Matematika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam  
 Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya  
 Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia  
*e-mail*: mardlijah@matematika.its.ac.id

**Abstrak**— Maneuvering kapal perang adalah kemampuan kapal perang untuk mempertahankan posisinya dibawah kendali operator kapal. Kapal perang membutuhkan maneuverability yang baik, ketika beroperasi, karena maneuverability mempengaruhi stabilitas kapal perang di lautan. Selain itu, pengendalian maneuverability penting dalam navigasi kapal perang untuk menghindari kerugian fisik atau materi. Aktivitas gelombang laut mempengaruhi pergerakan maneuver kapal dan stabilitas kapal. Pada penelitian ini digunakan metode SMC, karena SMC bersifat robust terhadap gangguan, khususnya gangguan berupa gelombang. Sehingga dalam melakukan *maneuver*, kapal akan tetap menuju sudut haluan yang diinginkan baik tanpa gelombang, maupun dengan adanya gelombang.

**Kata Kunci**— Pengolahan citra digital, *Gaussian Mixture Model (GMM)*, *Speed Detection*.

## I. PENDAHULUAN

**M**aneuvering kapal adalah kemampuan kapal perang untuk mempertahankan posisinya dibawah kendali operator kapal. Kapal perang adalah salah satu jenis kapal berkebutuhan khusus yang membutuhkan kemampuan *maneuver* yang baik ketika beroperasi, karena *maneuverability* mempengaruhi stabilitas kapal perang di lautan. Selain itu, pengendalian *maneuverability* penting dalam navigasi kapal perang untuk menghindari kerugian fisik atau materi. Salah satu faktor untuk mendapatkan kemampuan *maneuver* yang baik adalah melalui sistem kontrol gerak kapal yang baik. Untuk mendapatkan sistem kontrol yang baik salah satu aspek yang harus diperhatikan adalah pemodelan matematika *maneuvering* kapal dan sistem pengendali *maneuver* kapal.

Pada dinamika kapal terdapat *degrees of freedom* (DOF) atau enam macam gerakan yang dialami kapal pada saat berada di lautan, antara lain *yaw*, *heave*, *surge*, *sway*, *roll*, dan *pitch*. Gerakan *yaw* merupakan gerakan yang dibutuhkan pada saat kapal melakukan *maneuver*. Sistem pengendali dari *maneuver* kapal tersebut harus mempunyai kemampuan untuk menstabilkan dinamika kapal ketika kapal melakukan *maneuver*. Aktivitas gelombang laut dapat mempengaruhi pergerakan *maneuver* kapal dan mempengaruhi stabilitas kapal. Untuk mengatasi hal ini maka diperlukan sistem pengendali *maneuver* yang *robust* pada kapal perang.

Suatu sistem pengendalian dikatakan *robust* jika memiliki sensitifitas yang rendah atau sistem tidak mudah

mengalami suatu perubahan atau osilasi jika diberi gangguan. Sistem akan tetap dibuat mempertahankan performansinya. Gangguan yang terjadi bisa berupa gangguan gelombang laut dengan berbagai macam ketinggian dan berbagai macam sudut datang gelombang pada kapal. Selain itu, dikatakan *robust* jika mempunyai kestabilan pada range dari variasi parameter atau sistem *robust* akan bisa mempertahankan kestabilan bila dilakukan pemberian *input* sudut haluan pada sistem sehingga sistem masih dalam range kestabilan. Pengendali akan tetap menjaga kestabilan dan memperkecil indeks performansi sehingga kapal tetap akan melakukan *maneuver* sebesar sudut haluan yang diinginkan.

SMC (*Sliding Mode Control*) merupakan salah satu metode pengendali yang bersifat sangat robust, sehingga mampu bekerja dengan baik pada sistem *linier* maupun *nonlinier* yang mempunyai ketidakpastian gangguan gelombang. Beberapa contoh aplikasi metode SMC adalah untuk pengendalian pintu air [1] dan digunakan pada desain gerakan pada AUV (*Autonomous Underwater Vehicle*) [2].

Pada Tugas Akhir ini, akan diterapkan metode *Sliding Mode Control* (SMC) untuk pengendalian *maneuver* pada kapal perang, karena metode ini dapat digunakan untuk menyelesaikan sistem dinamik *linier* maupun *nonlinier* yang mempunyai ketidakpastian gangguan, serta merupakan salah satu metode pengendali yang bersifat *robust*. Simulasi dilakukan dengan mengimplementasikan model Nomoto orde 2.

## II. DASAR TEORI

### 2.1 Model Dinamika Kapal

Bentuk umum persamaan kendali *maneuvering* kapal dinyatakan dalam bentuk [4]:

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{D}\mathbf{v} = \boldsymbol{\tau}_L$$

dengan  $\mathbf{v} = [u, v, r]^T$  merupakan vektor kecepatan.  $\mathbf{M}$  dan  $\mathbf{D}$  merupakan matrik inersia dan redaman yang diperoleh dari linierisasi persamaan gaya dan momen pada arah *surge*, *sway* dan *yaw*.

*Rudder* merupakan aktuator yang digunakan dan terpasang dalam mengendalikan *maneuver* kapal. *Rudder* mempunyai kemampuan dalam menjaga arah sesuai dengan perintah dari sinyal kendali [4]. Kontrol objektif dari sinyal kendali haluan kapal adalah:

$$\psi \rightarrow \psi_d \quad (1)$$

dimana  $\psi$  merupakan sudut haluan kapal yang sesungguhnya, sedangkan  $\psi_d$  merupakan sudut haluan kapal yang diinginkan dan  $\dot{\psi} = r$ , dimana  $r$  adalah kecepatan yaw. *Maneuver* kapal dipengaruhi oleh sudut haluan kapal, kecepatan haluan dan *rudder*.

Pada Tugas Akhir ini diterapkan model Nomoto orde dua. Model ini hanya mempertimbangkan satu derajat kebebasan sistem dinamik kapal, yaitu  $r$  (kecepatan yaw), dan satu *control input*, yaitu  $\delta$  (sudut kemudi).

Model dinamika dari haluan kapal didapatkan dari pendekatan fungsi transfer dari Nomoto orde dua [4]:

$$\frac{r(s)}{\delta_R} = \frac{K_R(1+T_3s)}{(1+T_1s)(1+T_2s)} \quad (2)$$

dengan  $r$  adalah kecepatan yaw,  $\delta$  adalah sudut kemudi kapal. Parameter – parameter dari fungsi transfer (2) diperoleh dari :

$$T_1 T_2 = \frac{\det(M)}{\det(N)}$$

$$T_1 + T_2 = \frac{n_{11}m_{22} + n_{22}m_{11} - n_{12}m_{21} - n_{21}m_{12}}{\det(N)}$$

$$K_R = \frac{n_{21}b_1 - n_{11}b_2}{\det(N)}$$

$$K_R T_3 = \frac{m_{21}b_1 - m_{11}b_2}{\det(N)}$$

Dimana elemen  $m_{ij}$ ,  $n_{ij}$  dan  $b_i$  ( $i = 1,2$  dan  $j = 1,2$ ) didapatkan dari matriks berikut:

$$M = \begin{bmatrix} m - Y_{\dot{v}} & mx_G - Y_{\dot{r}} \\ mx_G - N_{\dot{v}} & I_z - N_{\dot{r}} \end{bmatrix}; N(u_0) = \begin{bmatrix} -Y_v & mu_0 - Y_r \\ N_v & mx_G u_0 - N_r \end{bmatrix}; b = \begin{bmatrix} Y_{\delta} \\ N_{\delta} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Parameter dalam penentuan gain kendali yang diturunkan Nomoto berdasarkan linierisasi dari model Davidson dan Schiff (1946), dimana bentuk persamaan gain kendali Nomoto adalah [4] :

$$K = \frac{n_{21}b_2 - n_{11}b_1}{\det(N)}$$

dengan

$$\det(N) = Y_v(N_r - mx_G u) - N_v(Y_r - mu)$$

$$\det(M) = (m - Y_{\dot{v}})(I_z - N_{\dot{r}}) - (mx_G - N_{\dot{v}})(mx_G - Y_{\dot{r}})$$

$$\text{dimana } n_{11} = -Y_v, n_{21} = -N_v$$

$$b_1 = \frac{(I_z - N_{\dot{r}})Y_{\delta} - (mx_G - Y_{\dot{r}})N_{\delta}}{\det M}$$

$$b_2 = \frac{(m - Y_{\dot{v}})N_{\delta} - (mx_G - N_{\dot{v}})Y_{\delta}}{\det M}$$

$m$  = massa kapal,  $Y_{\dot{v}}$  = turunan gaya arah sway terhadap  $\dot{v}$ ,  $Y_{\dot{r}}$  = turunan gaya yaw terhadap  $\dot{r}$ ,  $N_{\dot{r}}$  = turunan momen yaw terhadap  $\dot{r}$ ,  $Y_v$  = turunan gaya arah sway terhadap  $v$ ,  $Y_r$  = turunan gaya arah yaw terhadap  $r$ ,  $N_v$  = turunan momen sway terhadap  $v$ ,  $N_r$  = turunan momen yaw terhadap  $r$ ,  $x_G$  = pusat massa.

Pada pendekatan teoris *lender body strip* turunan koefisien hidrodinamika dapat dinyatakan sebagai fungsi dari rasio panjang terhadap lebar dari kapal, dengan dikalikan sebuah konstanta tertentu. Koefisien hidrodinamika merupakan bentuk nondimensi yang diturunkan dengan sistem *Prime I* [4]. Untuk memperoleh besaran gaya dikalikan dengan  $\frac{1}{2} \rho U^2 L^2$  dan momen dikalikan dengan  $\frac{1}{2} \rho U^2 L^3$ . Dimana  $\rho$  = rapat massa air laut ( $1,025 \text{ kg/m}^3$ ),  $L$  = panjang kapal,  $U$  = kecepatan servis kapal,  $B$  = lebar kapal,  $T$  = kedalaman kapal,  $C_B$  = koefisien blok. Sehingga diperoleh:

$$\frac{-Y'_{\dot{v}}}{\pi(T/L)^2} = 1 + 0,16 \frac{C_B B}{T} - 5,1 \left(\frac{B}{L}\right)^2 \quad (4)$$

$$\frac{-Y'_r}{\pi(T/L)^2} = 0,67 \left(\frac{B}{L}\right) - 0,0033 \left(\frac{B}{T}\right)^2 \quad (5)$$

$$\frac{-N'_{\dot{v}}}{\pi(T/L)^2} = 1,1 \left(\frac{B}{L}\right) - 0,041 \left(\frac{B}{T}\right) \quad (6)$$

$$\frac{-N'_{\dot{r}}}{\pi(T/L)^2} = \frac{1}{12} + 0,017 \frac{C_B B}{T} - 0,33 \left(\frac{B}{L}\right) \quad (7)$$

$$\frac{-Y'_v}{\pi(T/L)^2} = 1 + 0,4 \frac{C_B B}{T} \quad (8)$$

$$\frac{-Y'_r}{\pi(T/L)^2} = -\frac{1}{2} + 2,2 \left(\frac{B}{L}\right) - 0,08 \left(\frac{B}{T}\right) \quad (9)$$

$$\frac{-N'_v}{\pi(T/L)^2} = \frac{1}{2} + 2,4 \left(\frac{B}{L}\right) \quad (10)$$

$$\frac{-N'_r}{\pi(T/L)^2} = \frac{1}{4} + 0,039 \frac{B}{T} - 0,56 \left(\frac{B}{L}\right) \quad (11)$$

Sedangkan untuk gaya dinyatakan pada Persamaan (12) dan momen pada Persamaan (13) yang diakibatkan *rudder*, persamaannya adalah sebagai berikut.

$$Y_{\delta} = \rho \frac{\pi A_{\delta}}{4 L T} \quad (12)$$

$$N_{\delta} = -\frac{1}{2} Y_{\delta} \quad (13)$$

## 2.2 Model Gangguan Gelombang pada Kapal

Fungsi transfer orde 2 digunakan untuk model gelombang yaitu sebagai berikut [4]:

$$h(s) = \frac{K_{\omega} s}{s^2 + 2\zeta \omega_0 s + \omega_0^2} \quad (14)$$

dimana  $\omega_0$  adalah frekuensi gelombang yang dikatakan frekuensi modal,  $\zeta$  adalah coefficient redaman dan  $K_{\omega}$  adalah konstanta gelombang. Gain konstanta didefinisikan sebagai  $K_{\omega} = 2\zeta \omega_0 \sigma_m$  dimana  $\sigma_m$  adalah intensitas gelombang.

Ketika kapal bergerak kedepan dengan kecepatan servis kapal ( $U$ ), maka frekuensi dari gelombang menjadi :

$$\omega_e = (U, \omega_0, \beta) = \omega_0 - \frac{\omega_0^2}{g} U \cos \beta \quad (15)$$

Dimana :

$\omega_e$  = frequency encounter (rad/s)

$\omega_0$  = frekuensi gelombang (rad/s)

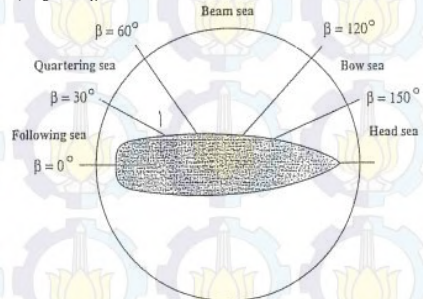
$g$  = percepatan gravitasi ( $\text{m/s}^2$ )

$U$  = kecepatan kapal (m/s)

$\beta$  = sudut antara heading dengan arah gelombang (rad)

Sehingga fungsi transfer dari gangguan gelombang yang sudah ditentukan arah gelombang menjadi :

$$h(s) = \frac{K_{W} s}{s^2 + 2\zeta \omega_e s + \omega_e^2} \quad (16)$$



Gambar 1. Nilai sudut datang gelombang [4]

## 2.3 Sliding Mode Control

### 2.3.1 Fungsi Switching

Pandang suatu sistem dinamis[2]:

$$\dot{x}^{(n)}(t) = f(x, t) + b(x, t)u + d(t)$$

dimana  $u$  kontrol input,  $x$  merupakan vektor keadaan,  $f(x, t)$  dan  $b(x, t)$  merupakan fungsi terbatas,  $d(t)$  merupakan gangguan eksternal.

Jika  $x_d$  merupakan  $x$  yang diinginkan, maka *tracking error*-nya dapat dinyatakan oleh:

$$e(t) = x(t) - x_d(t)$$

Fungsi *Switching* yaitu permukaan  $S(t)$  didalam ruang keadaan  $R^n$ , memenuhi persamaan [2]:

$$S(x, t) = \left( \frac{d}{dt} + \lambda \right)^{n-1} e(t)$$

Dengan  $\lambda$  berupa konstanta positif. Dimana fungsi *switching* ini digunakan untuk menentukan besarnya nilai  $u$  agar memenuhi kondisi *sliding*. Jika nilai  $S(x, t) = 0$ , maka fungsi *switching* diatas dapat disebut sebagai permukaan *sliding* (*sliding surface*).

### 2.3.2 Kondisi Sliding

Perancangan *control law* pada SMC dilakukan sedemikian hingga  $e(t)$  bergerak menuju permukaan *sliding* dan meluncur pada permukaan tersebut untuk semua  $t \geq 0$ . Agar dinamika sistem yang dikendalikan tetap stabil, maka *control law* dapat diperoleh dengan membentuk suatu fungsi Lyapunov, yaitu [1]

$$V = \frac{1}{2} S^2 \quad (17)$$

dengan  $V(0) = 0$  dan  $V > 0$  untuk  $S = 0$ . Kondisi yang memenuhi syarat kestabilan sistem merupakan turunan pertama dari Persamaan (17), sehingga diperoleh [2]:

$$\dot{V} = S\dot{S} \leq -\eta|S| \quad (18)$$

Pertidaksamaan (18) disebut kondisi *sliding*. Kondisi tersebut dapat ditulis dalam beberapa bentuk yaitu:

$$S\dot{S} < 0 \text{ atau } \dot{S} \text{sgn}(S) \leq -\eta \quad (19)$$

Dengan suatu  $\eta$  pada Pertidaksamaan (19) adalah konstanta positif. Fungsi *sgn* (signum) didefinisikan sebagai:

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} -1, & \text{untuk } x < 0 \\ 0, & \text{untuk } x = 0 \\ 1, & \text{untuk } x > 0 \end{cases}$$

## III. PERANCANGAN SISTEM

### 3.1 Pemodelan Maneuver Kapal Perang

Spesifikasi kapal yaitu panjang (L), lebar (B), kedalaman (T), koefisienblok (Cb), kecepatan servis (U), *center of gravity* (dalam sumbu X kapal / Xg), dan massa (M) [5].

**Tabel 1.** Spesifikasi kapal perang (KRI Dipenegoro)

Simbol	Besar	Satuan	Keterangan
Lpp	90.71	meter	Panjang
B	13.02	meter	Lebar
T	3.75	meter	Kedalaman
Cb	0.41	-	Koefisien Blok
U	14.4	m/s	Kecepatan Servis
X <sub>G</sub>	2.25	meter	Pusat Gravitasi
M	1818	ton	Massa
	8,75	meter	Tinggi kapal
A	3.14	m <sup>2</sup>	Luas Rudder

Dengan menggunakan Persamaan (3) sampai dengan Persamaan (12) dan data yang terdapat pada Tabel 1, maka didapatkan koefisien hidrodinamika kapal perang sebagai berikut.

- $Y_v = -0,006025$
- $Y_r = -0,000303$
- $N_v = -0,000083$
- $N_r = -0,000323$
- $Y_p = -0,008422$
- $Y_r = 0,00288$
- $N_v = -0,00321$
- $N_r = -0,00163$
- $Y_\delta = 7.34$
- $N_\delta = -3.6738$
- $I_z = 0.000889$
- $I_r = 0.000889$

Data perhitungan koefisien tersebut terdapat pada lampiran. koefisien hidrodinamika tersebut dimasukkan kedalam elemen matriks pada persamaan 2.8 sehingga

didapatkan variabel-variabel yang ada pada persamaan model Nomoto sebagai berikut :

$$\begin{aligned} M &= \begin{bmatrix} 0.006029 & 0.000303 \\ 0.0000835 & 0.002212 \end{bmatrix} \\ N &= \begin{bmatrix} 0.008422 & -0.00288 \\ 0.00321 & 0.001637 \end{bmatrix} \\ M &= \begin{bmatrix} 0.002637 & 0.01201 \\ 0.0000365 & 0.0481 \end{bmatrix} \\ N &= \begin{bmatrix} 0.000584 & -0.01816 \\ 0.000223 & 0.01031 \end{bmatrix} \\ T_1 T_2 &= 12.5385 \\ T_1 + T_2 &= 5.28665 \\ K_R &= 375.7262 \\ K_R T_3 &= 987.4 \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil perhitungan diatas maka dapat diketahui bahwa fungsi transfer dari kapal perang adalah

$$\frac{r(s)}{\delta_R(s)} = \frac{987.4s + 375.7262}{12.5385s^2 + 5.2865s + 1} \quad (20)$$

### 3.2 Desain Pengendali Maneuver Kapal Perang dengan Metode SMC

Dari fungsi transfer pada Persamaan (20), selanjutnya diubah dalam bentuk *state space* dengan menggunakan *software* Matlab, sehingga persamaan (20) menjadi:

$$\dot{[x]} = \begin{bmatrix} -0,4216 & -0,0798 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} [x] + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} u$$

dimana

$$[x] = \begin{bmatrix} r \\ \psi \end{bmatrix}; u = \delta$$

sehingga menjadi:

$$\begin{bmatrix} \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,4216 & -0,0798 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \delta \quad (21)$$

dari Persamaan (21) didapatkan:

$$\dot{r} = -0,4216r - 0,0798\psi + 0,0798\delta \quad (4.3)$$

$$\dot{\psi} = r \quad (22)$$

Misalkan  $\psi_d$  merupakan sudut haluan kapal yang diinginkan, maka *tracking error*-nya dapat dinyatakan oleh:

$$e = \psi - \psi_d \quad (23)$$

$$\dot{e} = \dot{\psi} - \dot{\psi}_d \quad (24)$$

Karena  $\psi_d$  konstanta, maka  $\dot{\psi}_d = 0$ , sehingga Persamaan (24) menjadi:

$$\dot{e} = \dot{\psi} \quad (25)$$

Fungsi *switching* didefinisikan oleh:

$$\begin{aligned} S &= \left( \frac{d}{dt} + \lambda \right)^{2-1} e \\ &= \left( \frac{d}{dt} + \lambda \right) e \\ &= \dot{e} + e\lambda \end{aligned} \quad (26)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (23) dan persamaan (25) ke persamaan (26) diperoleh:

$$S = \dot{\psi} + \lambda(\psi - \psi_d) \quad (27)$$

Sehingga turunan pertama dari  $S$  adalah:

$$\dot{S} = \dot{\psi} + \lambda\dot{\psi} - \lambda\dot{\psi}_d \quad (28)$$

karena  $\dot{\psi}_d = 0$  dan  $\dot{\psi} = r$ , maka  $\dot{\psi} = \dot{r}$ , sehingga diperoleh:

$$\dot{S} = -0,4216 r - 0,0798 \psi + 0,0798 \delta + \lambda r \quad (29)$$

Selanjutnya ditentukan nilai estimasi  $\delta$  yang diperoleh dari persamaan (4.11) dengan nilai  $\dot{S} = 0$ , sehingga diperoleh:

$$\dot{S} = -0,4216 r - 0,0798 \psi + 0,0798 \delta + \lambda r = 0 \quad (30)$$

$$\delta = 0,518 r + \psi - 1,255\lambda r \quad (31)$$

$$\delta = 0,518 r + \psi - 1,255\lambda r \quad (32)$$

Dengan mensubstitusikan Persamaan (32) ke persamaan *control law*,

$$\delta = \hat{\delta} - K \operatorname{sgn}(S)$$

diperoleh:

$$\delta = 0,518r + \psi - 1,255\lambda r - K \operatorname{sgn}(S) \quad (33)$$

Dengan mensubstitusikan Persamaan (33) ke persamaan (30) didapatkan:

$$\begin{aligned} \dot{S} &= -0,4219r - 0,0797\psi + 0,4219r + 0,0797\psi - \lambda r \\ &\quad - K \operatorname{sgn}(S) + \lambda r \\ &= -K \operatorname{sgn}(S) \end{aligned} \quad (34)$$

Selanjutnya akan ditentukan nilai  $K$  agar memenuhi kondisi *sliding* dengan cara mensubstitusikan Persamaan (34) ke persamaan:

$$S\dot{S} \leq -\eta|S|$$

Sehingga didapatkan:

$$S(-K \operatorname{sgn}(S)) \leq -\eta|S|$$

$$\frac{S}{|S|}(-K \operatorname{sgn}(S)) \leq -\eta$$

$$\begin{aligned} \operatorname{sgn}(S)(-K \operatorname{sgn}(S)) &\leq -\eta \\ -K &\leq -\eta \\ K &\geq \eta \end{aligned} \quad (35)$$

Dari Persamaan (35) dapat diperoleh nilai  $K$  sebagai berikut:

$$K = \min(\eta) \quad (36)$$

Dengan mensubstitusikan Persamaan (36) ke Persamaan (33) diperoleh:

$$\delta = 0,518r + \psi - 1,255\lambda r - \min(\eta) \operatorname{sgn}(S) \quad (37)$$

Untuk meminimalkan *chattering*, maka digunakan suatu *boundary layer* dengan cara mengganti fungsi  $\operatorname{sgn}(S)$  menjadi  $\operatorname{sat}(S/\phi)$ . Sehingga diperoleh desain kendali *maneuver* kapal perang sebagai berikut:

$$\delta = 0,518r + \psi - 1,255\lambda r - \min(\eta) \operatorname{sat}(S/\phi) \quad (38)$$

### 3.3 Pemodelan Gangguan Gelombang Laut

Gelombang merupakan termasuk dalam kategori: *sea state 6* dalam kategori *very rough* (setinggi 4 meter) dan *sea state 5* dalam kategori *Rough* (setinggi 3meter).

Pemodelan gangguan gelombang dinyatakan dalam bentuk fungsi transfer [4]:

$$h(s) = \frac{K_w s}{s^2 + 2\zeta\omega_e s + \omega_e^2}$$

Dengan  $\omega_0 = 0,4 \sqrt{\frac{g}{H_s}}$ ,  $\zeta = 0,1$ , dan  $K_w = 2\zeta\omega_0\tau_\omega$ . Nilai  $g = 9,8 \text{ m/s}$ ,  $\tau_\omega = 3,16$ . Sehingga dengan memasukkan nilai parameter-parameter tersebut, berikut masing-masing pemodelan gangguan berupa gelombang pada *sea state 5* dan *sea state 6* pada sudut datang gelombang 180, 120 dan 60 :

**Tabel 2.** Model matematika gangguan gelombang *sea state 6* pada beberapa sudut datang

Sudut datang	Pemodelan gangguan
180	$h(s) = \frac{0,3956 s}{s^2 + 0,2404 s + 1,44504}$
120	$h(s) = \frac{0,3956 s}{s^2 + 0,0676 s + 0,1143}$
60	$h(s) = \frac{0,3956 s}{s^2 + 0,1671 s + 0,8356}$

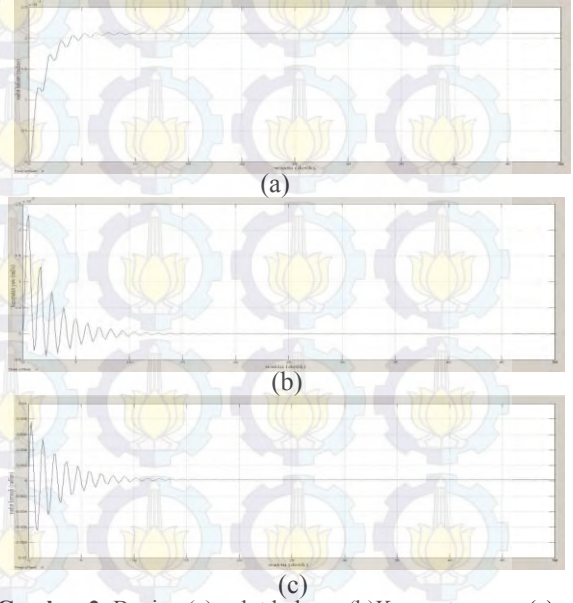
**Tabel 3.** Model matematika gangguan gelombang *sea state 5* pada beberapa sudut datang

Sudut datang	Pemodelan gangguan
180	$h(s) = \frac{0,4569 s}{s^2 + 0,2982 s + 2,2229}$
120	$h(s) = \frac{0,4569 s}{s^2 + 0,2214 s + 1,2253}$
60	$h(s) = \frac{0,4569 s}{s^2 + 0,1671 s + 0,8356}$

## IV. SIMULASI

Tujuan dari penelitian Tugas Akhir ini adalah mengendalikan kapal dalam melakukan *maneuver* sehingga kapal tetap berada pada sudut haluan yang diinginkan baik tanpa gangguan, maupun dengan gangguan. Pada simulasi ini diberikan inialisasi awal  $x(0) = [0,0]$ , dan  $\delta(0) = 0$ ,  $\psi_d = 0,002$  radian. Nilai  $\psi_d$  positif, berarti kapal berbelok atau bermanuver ke arah kanan.

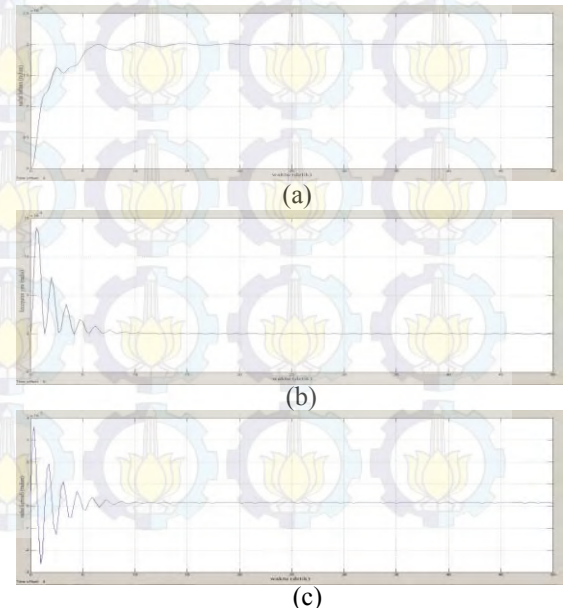
### 4.1 Simulasi Maneuver Kapal Perang Tanpa Gangguan



**Gambar 2.** Bagian (a)sudut haluan (b)Kecepatan yaw (c)sudut kemudi

Hasil uji *maneuver* tanpa gangguan, menunjukkan bahwa kecepatan yaw mengalami osilasi dan barangsangsur bergerak mendekati 0 mulai pada detik ke 16,67, yang berarti kapal tidak lagi melakukan gerakan yaw lagi. Sudut haluan mengalami osilasi kemudian barangsangsur bergerak mendekati sudut haluan yang diinginkan pada detik ke 10,22. Sudut kemudi kapal mengalami osilasi, kemudian barangsangsur stabil mendekati sudut 0,0001483 radian pada detik ke 13,1.

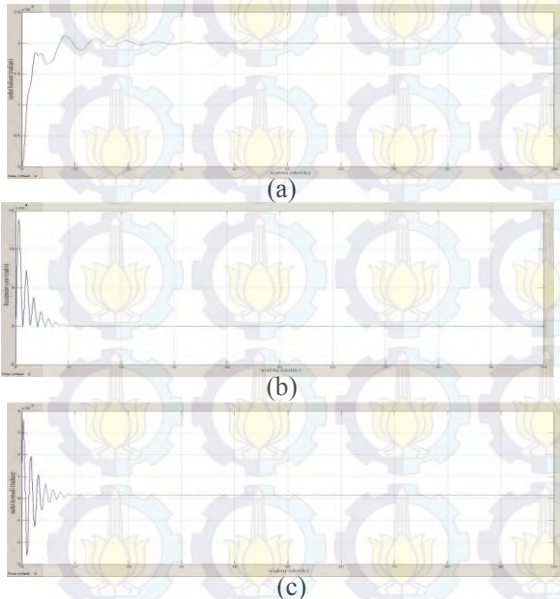
### 4.2 Simulasi Maneuver kapal perang dengan gangguan gelombang *sea state 5* dan sudut datang gelombang 180°



**Gambar 3.** Bagian (a)sudut haluan (b)Kecepatan yaw (c)sudut kemudi

Hasil uji *maneuver* dengan gangguan, menunjukkan bahwa kecepatan *yaw* mengalami osilasi dan barangsur-angsur bergerak mendekati 0 mulai pada detik ke 18,5, yang berarti kapal tidak lagi melakukan gerakan *yaw* lagi. Sudut haluan mengalami osilasi kemudian barangsur-angsur bergerak mendekati sudut haluan yang diinginkan pada detik ke 20,6. Sudut kemudi kapal mengalami osilasi, kemudian barangsur-angsur stabil mendekati sudut 0,000138 radian pada detik ke 13,3.

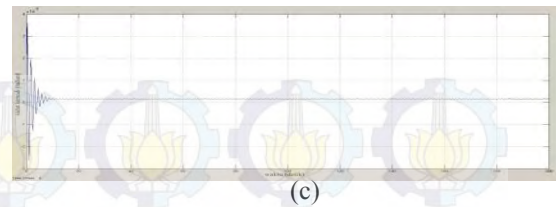
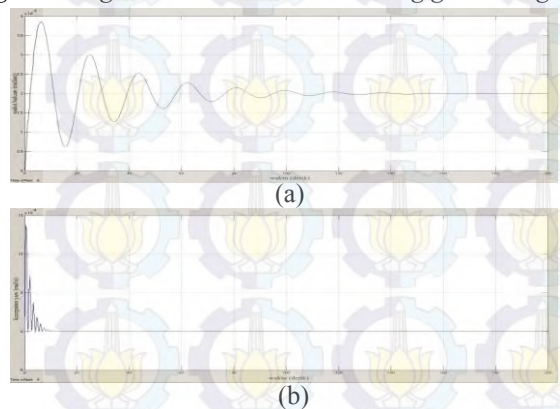
#### 4.3 Simulasi Maneuver kapal perang dengan gangguan gelombang sea state 5 dan sudut datang gelombang $120^\circ$



**Gambar 4.** Bagian (a)sudut haluan (b)Kecepatan *yaw* (c)sudut kemudi

Hasil uji *maneuver* dengan gangguan, menunjukkan bahwa kecepatan *yaw* mengalami osilasi dan barangsur-angsur bergerak mendekati 0 mulai pada detik ke 19,1, yang berarti kapal tidak lagi melakukan gerakan *yaw* lagi. Sudut haluan mengalami osilasi kemudian barangsur-angsur bergerak mendekati sudut haluan yang diinginkan pada detik ke 35,52. Sudut kemudi kapal mengalami osilasi, kemudian barangsur-angsur stabil mendekati sudut 0,0001869 radian pada detik ke 16,13.

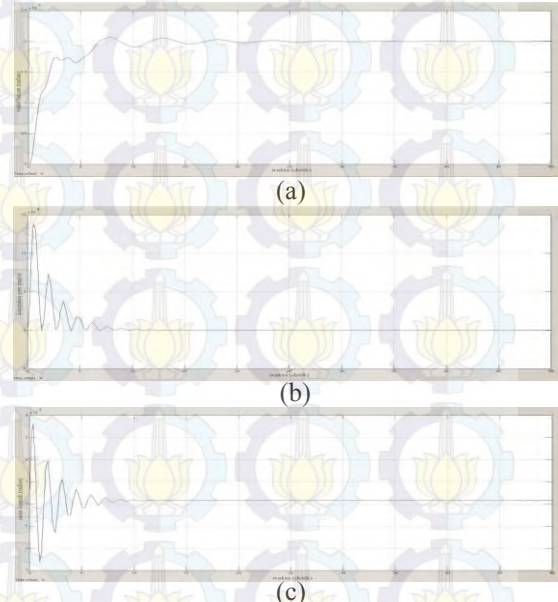
#### 4.4 Simulasi Maneuver kapal perang dengan gangguan gelombang sea state 5 dan sudut datang gelombang $60^\circ$



**Gambar 5.** Bagian (a)sudut haluan (b)Kecepatan *yaw* (c)sudut kemudi

Hasil uji *maneuver* dengan gangguan, menunjukkan bahwa kecepatan *yaw* mengalami osilasi dan barangsur-angsur bergerak mendekati 0 mulai pada detik ke 43,8, yang berarti kapal tidak lagi melakukan gerakan *yaw* lagi. Sudut haluan mengalami osilasi kemudian barangsur-angsur bergerak mendekati sudut haluan yang diinginkan pada detik ke 125,8. Sudut kemudi kapal mengalami osilasi, kemudian barangsur-angsur stabil mendekati sudut 0,0001436 radian pada detik ke 26,8

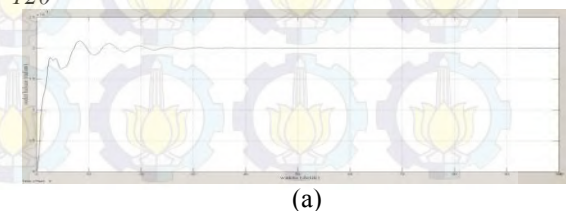
#### 4.5 Simulasi Maneuver kapal perang dengan gangguan gelombang sea state 6 dan sudut datang gelombang $180^\circ$



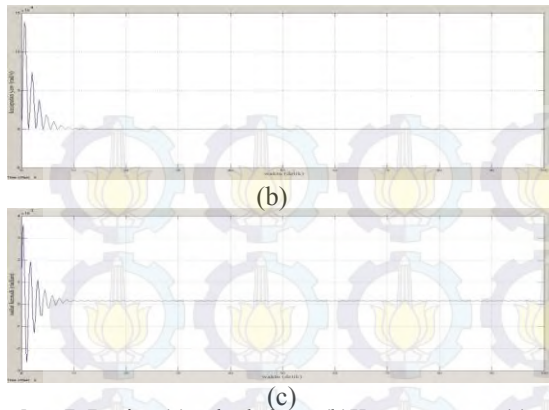
**Gambar 6.** Bagian (a)sudut haluan (b)Kecepatan *yaw* (c)sudut kemudi

Hasil uji *maneuver* dengan gangguan, menunjukkan bahwa kecepatan *yaw* mengalami osilasi dan barangsur-angsur bergerak mendekati 0 mulai pada detik ke 19,98, yang berarti kapal tidak lagi melakukan gerakan *yaw* lagi. Sudut haluan mengalami osilasi kemudian barangsur-angsur bergerak mendekati sudut haluan yang diinginkan pada detik ke 28,13. Sudut kemudi kapal mengalami osilasi, kemudian barangsur-angsur stabil mendekati sudut 0,000138 radian pada detik ke 14,4.

#### 4.6 Simulasi Maneuver kapal perang dengan gangguan gelombang sea state 6 dan sudut datang gelombang $120^\circ$



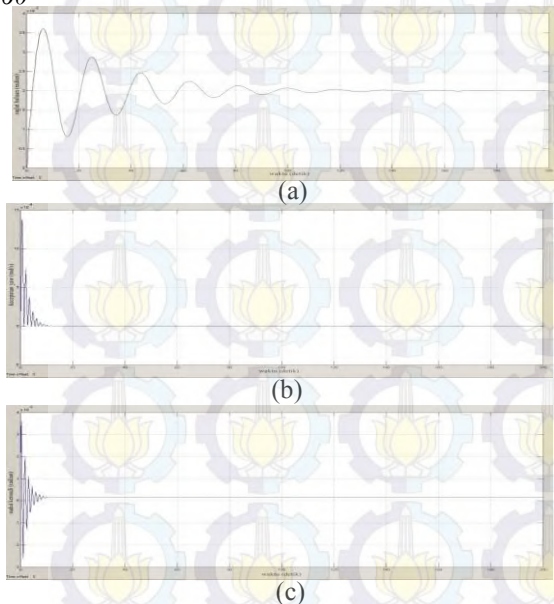
(a)



**Gambar 7.** Bagian (a) sudut haluan (b) Kecepatan *yaw* (c) sudut kemudi

Hasil uji *maneuver* dengan gangguan, menunjukkan bahwa kecepatan *yaw* mengalami osilasi dan barangs-angsur bergerak mendekati 0 mulai pada detik ke 20,33, yang berarti kapal tidak lagi melakukan gerakan *yaw* lagi. Sudut haluan mengalami osilasi kemudian barangs-angsur bergerak mendekati sudut haluan yang diinginkan pada detik ke 43,6. Sudut kemudi kapal mengalami osilasi, kemudian barangs-angsur stabil mendekati sudut 0,0001865 radian pada detik ke 18,59.

#### 4.7 Simulasi Maneuver kapal perang dengan gangguan gelombang sea state 6 dan sudut datang gelombang 60°



**Gambar 8.** Bagian (a) sudut haluan (b) Kecepatan *yaw* (c) sudut kemudi

Hasil uji *maneuver* dengan gangguan, menunjukkan bahwa kecepatan *yaw* mengalami osilasi dan barangs-angsur bergerak mendekati 0 mulai pada detik ke 83,2, yang berarti kapal tidak lagi melakukan gerakan *yaw* lagi. Sudut haluan mengalami osilasi kemudian barangs-angsur bergerak mendekati sudut haluan yang diinginkan pada detik ke 144,5. Sudut kemudi kapal mengalami osilasi, kemudian barangs-angsur stabil mendekati sudut 0,0001436 radian pada detik ke 27,38.

**Tabel 2.** Variasi sudut haluan dan waktu (detik) yang dibutuhkan untuk mencapai sudut haluan (tanpa gangguan)

Sudut haluan (derajat)	Sudut haluan (radian)	Tanpa gangguan
5	0,08	15,06
10	0,17	19,6
15	0,26	21,85
20	0,34	22,78
25	0,43	23,52
30	0,52	23,37
35	0,61	24,38

**Tabel 3.** Variasi sudut haluan dan waktu (detik) yang dibutuhkan untuk mencapai sudut haluan (dengan gangguan)

Sudut haluan (derajat)	Sudut haluan (radian)	Sea state 5			Sea state 6		
		180	120	60	180	120	60
5	0,08	31,8	41,5	134,6	37,52	50,65	178,3
10	0,17	32,15	42,5	149,5	38,6	56,95	178,9
15	0,26	35,4	43,1	160,4	39,18	58,78	179,9
20	0,34	36,2	44,93	165,1	39,52	61,25	182,3
25	0,43	37,95	45,15	170,7	41,58	76,23	185,8
30	0,52	39,23	45,6	172,5	42,65	78,14	188,6
35	0,61	40,97	46,48	188,7	44,52	79,18	190,2

## V. KESIMPULAN

- Hasil simulasi dengan SMC, kecepatan *yaw* tanpa gangguan lebih cepat dibanding dengan adanya gangguan, kapal juga lebih cepat menstabilkan sudut kemudi dan sudut haluan dibandingkan dengan adanya gangguan.
- Hasil simulasi dengan SMC dengan gangguan gelombang, menunjukkan bahwa semakin kecil sudut datang gelombang, maka semakin lama waktu yang dibutuhkan kapal dalam menstabilkan sudut haluan kapal sampai dengan mendekati sudut yang diinginkan.

## DAFTAR PUSTAKA

- Muzzaki, M. (2015). "Desain Pengendalian Pintu Air dengan *Sliding Mode Control* (SMC)". Tugas Akhir-Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.
- Oktafianto, K. dkk. (2015). "Design of Autonomous Underwater Vehicle Motion Using *Sliding Mode Control Method*". ICAMIMIA 2015. Surabaya, Indonesia
- Dontiawan, Aisyah dan Masroeri. (2013). "Perancangan Sistem Kendali Stabilitas Rolling Pada Kapal Perang Kawal Rudal Kelas Sigma-KRI Diponegoro dengan Menggunakan Logika *Fuzzy*". Tugas Akhir-Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.
- Fossen, Thor. I. (1994). "Guidance and Control of Ocean Vehicle". John Wiley & Son. USA: John Wiley & Sons, Inc
- Majid, T. (2015). "Analisis Performansi *Auto Maneuver* pada Beberapa Tipe Kapal di Perairan Lepas". Tugas Akhir-Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Tzeng, C. And Chen, J. (1999). "Fundamental Properties of Linear Ship Steering Dynamic Models". Journal of Marine Science and Technology, Vol. 7 No.2 pp 79-88.
- Ogata, K. (1992). "Modern Control Engineering". Second Ed. Prentice Hall, London
- Lia, S.T.(2013). "Kendali Kemudi Kapal dengan Nonlinear Backstepping". Tugas Akhir-Institut Teknologi Sepuluh Nopember
- Syaifulin, W.H. (2013). "Penerapan Model Predictive Control (MPC) pada Kendali Haluan Kapal". Tugas Akhir-Institut Teknologi Sepuluh Nopember
- Widagdo, Agandi, H. (2011). "Kontrol Posisi Motor DC dengan *Sliding Mode Control*". Tugas Akhir-Politeknik Elektronika Negeri Surabaya.
- Subiono. (2013). "Sistem Linear". Jurusan Matematika Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Surabaya, Indonesia.