

Simulasi *Tracking Route* Kapal Menggunakan Metode Kendali *Proportional Integral Derrivatif*

Rahimuddin^{1,*}, Malika Amil Madani¹, Awalia¹

¹Departemen Teknik Sistem Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, Makassar, Indonesia

*Email: rahimnav@gmail.com

Abstrak

Pelayaran yang efisien sangat dibutuhkan dalam navigasi kapal, tidak hanya menghemat waktu tapi juga menghemat bahan bakar. Ketika kapal sedang berlayar, kapal selalu menyimpang dari lintasan yang ditentukan akibat gaya gelombang, angin, dan gaya-gaya eksternal lainnya. Untuk berlayar efisien kapal perlu dikendalikan dengan baik. Salah satu pengendali yang telah banyak dipakai adalah kendali PID. Kendali PID (*Proportional Integral Derivatif*) diterapkan pada sistem autopilot untuk mengendalikan kecepatan dan arah gerak kapal. Simulasi numerik dikembangkan untuk menguji kendali kapal mengikuti lintasan yang ditetapkan. Desain kendali PID menentukan koefisien kendali K_p , K_i , K_d menggunakan metode Nicholas-Ziegler untuk optimasi nilai koefisien kendali. Hasil simulasi menunjukkan kapal mampu berlayar mengikuti lintasan dan memperkecil simpangan lintasan yang ditetapkan. Koefisien kendali *heading* kapal adalah $K_p = 20.4$, $K_i = 0$, dan $K_d = 25.5$ dengan simpangan rata-rata *heading* 0.000537 derajat, dan kendali kecepatan kapal $K_p = 13$, $K_i = 0$, dan $K_d = 0.5$ dengan simpangan rata-rata sebesar 0.179 knot. Simpangan *heading* yang cukup besar terjadi ketika kapal berlayar pada lintasan yang ekstrim dimana kapal harus melakukan manuver tajam pada beberapa *waypoints*.

Keywords: Manuver Kapal; Kendali PID; Tracking Route; OpenCPN; Scilab

1. Pendahuluan

Rute pelayaran adalah arah atau jarak yang harus ditempuh oleh angkutan perairan dari suatu pelabuhan ke pelabuhan lain dengan mempertimbangkan aspek kenavigasian, kepelabuhanan, perkapalan dan aspek keamanan dan keselamatannya. *Track keeping* kapal yang efisien sangat penting dalam navigasi kapal karena tidak hanya menghemat waktu tetapi juga menghemat bahan bakar yang merupakan parameter yang sangat penting untuk diperhatikan di kapal [1]. Tetapi untuk mencapai pelacakan/ penjagaan jalur kapal yang efisien dan juga untuk menghasilkan arah sudut yang akurat, seseorang harus memiliki pengontrol baik yang memperhitungkan gangguan laut, hidrodinamika kapal dan parameter kebisingan internal/eksternal menjadi pertimbangan [2].

Penggunaan *Automatic Identification System* (AIS) diatur dalam peraturan *International Maritime Organization* (IMO) untuk memenuhi keselamatan

dan keamanan pelayaran, mencegah tabrakan kapal (*collision avoidance*), digunakan dalam pengaturan *traffic* pelayaran, alat bantu navigasi, dan investigasi kecelakaan. Aturan ini menyebutkan bahwa seluruh kapal dengan bobot diatas 300 GT pada pelayaran internasional dan diatas 500 GT pada pelayaran non internasional dan seluruh kapal penumpang (*passenger ship*) diwajibkan menggunakan peralatan AIS sesuai dengan regulasi AIS yang diatur oleh IMO. Sistem AIS menyediakan informasi kapal antara lain data identifikasi kapal (Nama kapal, nomor IMO, nomor MMSI dan *call sign*), posisi kapal (*longitude*, *latitude*), kecepatan, arah pergerakan kapal, dan pelabuhan tujuan kapal. Data AIS ini dapat digunakan untuk pelacakan keberadaan kapal selama data AIS yang dikirim kapal dapat diterima oleh stasiun penerima AIS [3], [4].

Untuk melakukan *tracking* rute pelayaran kapal yang baik dan aman diperlukan sistem kendali navigasi kapal [5]. Sistem kendali ini didesain dapat

mengatur arah dan kecepatan pergerakan kapal. Pengaturan navigasi kapal dilakukan dengan mengatur sudut kemudi dan putaran *propeller* kapal. Salah satu pengendali yang sering digunakan untuk sistem kendali navigasi kapal adalah pengendali PID. Kendali PID terdiri dari tiga bagian yaitu Proportional, *Integral*, dan Derivatif. PID merupakan salah satu *controller* dan *stabilizer* yang sering digunakan di industri karena sifatnya yang sederhana dan mudah untuk diimplementasikan [6].

2. Metodologi

2.1. Model Kapal

Persamaan model gerak kapal ditunjukkan pada Persamaan 1-6;

$$X = X_{uu}u^2 + (1-t)T + X_{vr}vr + X_{vv}v^2 + X_{rr}r^2 + X_{\varphi\varphi}\varphi^2 + cRX F_n \sin(\delta) + (m + m_x)vr \quad (1)$$

$$Y = Y_vv + Y_r r + Y_p p + Y_\varphi \varphi + Y_{vvv}v^3 + Y_{rrr}r^3 + Y_{vvr}v^2r + Y_{vrr}vr^2 + Y_{vv\varphi}v^2\varphi + Y_{v\varphi\varphi}v\varphi^2 + Y_{rr\varphi}r^2\varphi + Y_{r\varphi\varphi}r\varphi^2 + (1+aH)FN\cos(\delta) - (m + m_x)ur \quad (2)$$

$$K = K_vv + K_r r + K_p p + K_\varphi \varphi + K_{vvv}v^3 + K_{rrr}r^3 + K_{vvr}v^2r + K_{vrr}vr^2 + K_{vv\varphi}v^2\varphi + K_{v\varphi\varphi}v\varphi^2 + K_{rr\varphi}r^2\varphi + K_{r\varphi\varphi}r\varphi^2 - (1+aH)zR FN\cos(\delta) + m_xlxur - WGM\varphi \quad (3)$$

$$N = N_vv + N_r r + N_p p + N_\varphi \varphi + N_{vvv}v^3 + N_{rrr}r^3 + N_{vvr}v^2r + N_{vrr}vr^2 + N_{vv\varphi}v^2\varphi + N_{v\varphi\varphi}v\varphi^2 + N_{rr\varphi}r^2\varphi + N_{r\varphi\varphi}r\varphi^2 + (xR + aH xH)FN\cos(\delta) \quad (4)$$

$$\dot{x} = [u \ v \ r \ x \ y \ \varphi \ \delta \ n]$$

$$\det M = m_{22}m_{33}m_{44} - m_{32}^2m_{44} - m_{42}^2m_{33} \quad (5)$$

$$\dot{x}(1) = X(U^2/L)/m_{11}$$

$$\dot{x}(2) = -\left(\frac{-m_{33}m_{44}Y + m_{32}m_{44}K + m_{42}m_{33}N}{\det M}\right)U^2$$

$$\dot{x}(3) = -\left(\frac{-m_{33}m_{42}Y + \frac{L}{m_{32}}\frac{\det M}{m_{44}K + m_{22}m_{33}N - N m_{32}}}{\det M}\right)\left(\frac{U^2}{L^2}\right)$$

$$\dot{x}(4) = (\cos(\gamma)u - \sin(\gamma)\cos(\varphi)v)u$$

$$\dot{x}(5) = (\sin(\gamma)u + \cos(\gamma)\cos(\varphi)v)u$$

$$\dot{x}(6) = \cos(\varphi)rU/L$$

$$\dot{x}(7) = -\left(\frac{-m_{32}m_{44}Y + m_{32}m_{44}K - Km_{42}^2 + m_{32}m_{42}N}{\det M}\right)\left(\frac{U^2}{L^2}\right)$$

$$\dot{x}(8) = pu/L$$

$$\dot{x}(9) = \text{delta_dot}$$

$$\dot{x}(10) = n_dot \quad (6)$$

dimana masing-masing u , v adalah kecepatan translasi pada sumbu-x,-y, r kecepatan rotasi pada sumbu-x. x dan y adalah perpindahan translasi. φ dan δ adalah sudut heading dan kemudi kapal.

2.2. Kendali Arah dan Kecepatan Kapal menggunakan PID

Kendali Proporsional Integral Derivative digunakan untuk mengendalikan arah gerakan dan

kecepatan kapal. Rute pelayaran ditetapkan dengan memberikan titik lintasan yang kapal mesti lewati dan kecepatan kapal yang ditentukan pada setiap titik lintasan. Tujuan kapal diarahkan pada lintasan pertama. Ketika kapal mendekati lintasan pertama dan berada dalam jarak tertentu maka tujuan berikutnya berpindah ke titik lintasan tujuan selanjutnya. Arah dari titik lintasan pertama ke titik lintasan kedua adalah sudut *course* dan menjadi setpoint untuk kendali arah kapal. Pada masing-masing titik lintasan juga ditetapkan kecepatan kapal dan menjadi *setpoint* untuk kendali kecepatan kapal. Kendali sudut *heading* dan kecepatan kapal dilakukan dengan mengatur sudut kemudi dan putaran *propeller*. Kendali dengan metode PID dituliskan sebagai Persamaan 7;

$$\delta(t) \text{ atau } nP(t) = Kp e(t) + Ki \int e(t) dt + Kd \frac{de(t)}{dt} \quad (7)$$

Simpangan sudut arah atau kecepatan adalah $e(t)$ yang merupakan selisih dari sudut *course* dan *heading* kapal dan simpangan kecepatan merupakan selisih setpoint kecepatan dan kecepatan kapal yang dicapai. Hasil perkalian dari masing-masing simpangan dengan koefisien pengendali memberikan perintah sudut kemudi δ dan putaran *propeller* nP seharusnya dilakukan pada kapal [7].

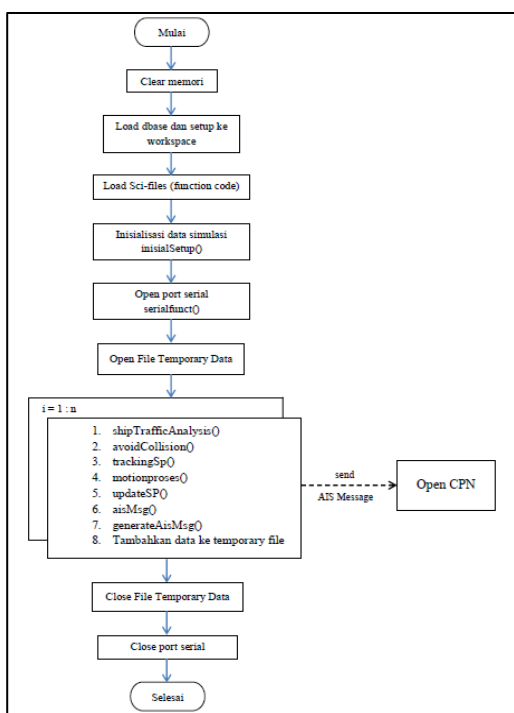
Koefisien kendali didapatkan dengan melakukan *tuning* pada masing-masing koefisien menggunakan metode kedua Nichloas-Siegler. Metode ini digunakan sebagai langkah awal menentukan koefisien awal pengendali. Perbaikan koefisien dilakukan dengan memperhatikan respon kapal meliputi besar simpangan dan dinamika respon kapal terhadap perintah sudut kemudi dan kecepatan kapal. Perubahan nilai Kp berpengaruh pada kecepatan respon, nilai Ki berpengaruh pada kesalahan keadaan tunak dan nilai Kd berpengaruh pada redaman respon. Pengaturan nilai-nilai koefisien tersebut secara *trial and error* seteah menggunakan nilai-nilai dari pendekatan Nicholas-ziegler dapat dihasilkan koefisien pengendali yang optimal.

2.3. Program Simulasi

Program simulasi dikembangkan pada aplikasi SciLab dan diintegrasikan dengan OpenCPN untuk menampilkan pergerakan kapal. Algoritma pada SciLab menghitung status gerakan kapal, kendali arah, dan kecepatan kapal. Status kapal dikonversi ke format data AIS dan dikirim ke openCPN melalui komunikasi data serial untuk ditampilkan pada peta laut, konsep program simulasi ditunjukkan pada gambar. Data kapal yang digunakan adalah model kapal kontainer SR 108 pada studi yang dilakukan Fossen dan telah digunakan dalam aplikasi Matlab. Tabel 1. menunjukkan data kapal kontainer yang disimulasikan:

Tabel 1. Ukuran utama kapal kontainer

Parameter	Nilai	
Length between perpendiculars (L_{bp})	175	m
Breadth (B)	25.4	m
Draft (T)	8.5	m
Displacement Volume	21222	m^3
Height from keel to transverse metacenter (KM)	10.36	m
Height from keel to center of buoyancy (KB)	4.615	m
Block coefficient (C_b)	0.559	
Rudder area (A_R)	33.037	m^2
Aspect Ratio	1.821	
Propeller diameter	6.533	m
Max rudder rate	5	deg/s
Max shaft velocity	160	rpm



Gambar 1. Alur program simulasi kapal

3. Simulasi Kapal

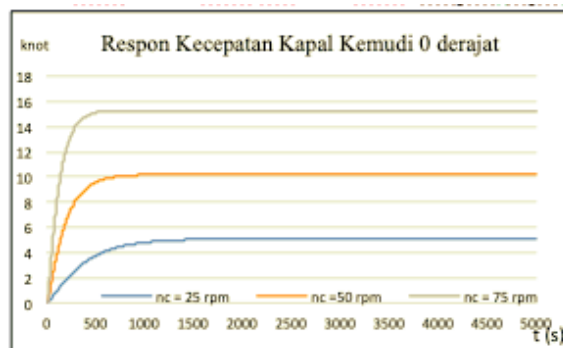
3.1. Simulasi Kecepatan Kapal

Simulasi kapal pada sudut kemudi 0° dengan variasi putaran propeller dilakukan untuk mengamati respon kecepatan kapal. Simulasi dilakukan dengan asumsi tidak ada tahanan gelombang yang terjadi. Variasi putaran propeller pada 25 rpm, 50 rpm dan 75 rpm menunjukkan masing-masing kapal mencapai kecepatan 5 knot, 10 knot dan 15 knot. Waktu untuk mencapai kecepatan konstan masing-masing pada 1500 detik, 1000 detik dan 500 detik. Respon kapal ditunjukkan pada Gambar 2.

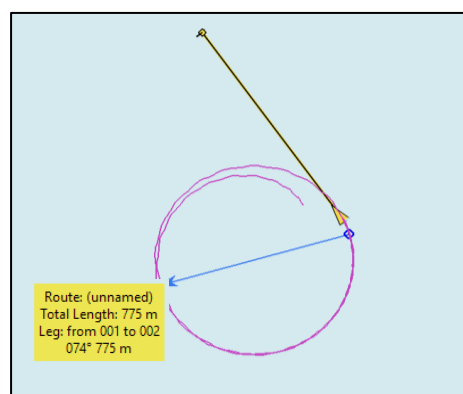
3.2. Simulasi Kapal Berputar

Simulasi kapal pada sudut kemudi 35 derajat menunjukkan kapal berputar 360 derajat membentuk lingkaran dengan diameter mencapai 775 meter. Propeller diputar pada putaran 25 rpm. Pada putaran

propeller yang lebih tinggi dengan sudut kemudi maksimum, model matematika yang dikembangkan cenderung menuju singular yang menyebabkan kalkulasi mengalami kesalahan.



Gambar 2. Respon kecepatan kapal



Gambar 3. Simulasi tracking zig-zag

3.3. Koefisien PID menggunakan Metode Nicholas-Ziegler

Penentuan koefisien pengendali K_p , K_i , dan K_d dilakukan menggunakan metode kedua Nicholas Ziegler didapatkan koefisien pengendali awal sudut heading kapal ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Koefisien awal pengendali sudut heading kapal

Tipe Pengendali	K_p	K_i	K_d
PID	20.4	4.08	25.5

Sementara pada pengendalian kecepatan kapal didapatkan koefisien awal pengendali ditunjukkan pada Tabel 3.

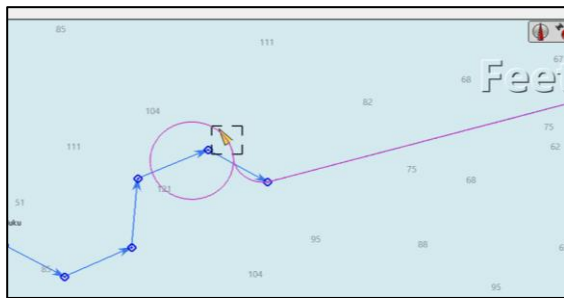
Tabel 3. Koefisien awal pengendali kecepatan kapal

Tipe Pengendali	K_p	K_i	K_d
PID	15	6	9.37

3.4. Tuning Koefisien PID Pengendali Sudut Heading

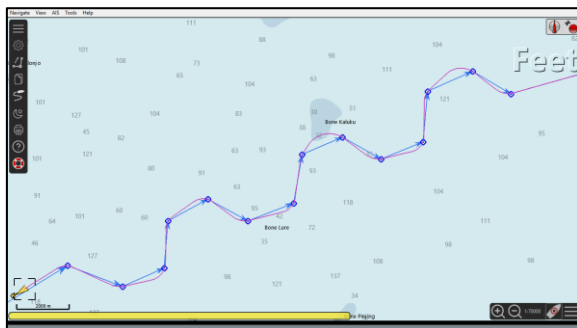
Setelah mendapatkan nilai *gain* PID menggunakan metode Nicholas Ziegler, maka selanjutnya parameter ini disimulasikan pada trayek zig-zag untuk melihat respon *gain* pada trayek. Simulasi variasi nilai K_p , K_i , K_d dilakukan terhadap kendali *heading* dan *speed* kapal pada lintasan yang sama, pengujian ini disimulasikan dan ditampilkan pada peta digital pada OpenCPN.

Simulasi *tracking zig-zag* kontrol *heading* menggunakan koefisien awal dari metode Nicholas Ziegler menunjukkan kapal menuju target titik pertama pada target titik kedua kapal tidak dapat mengikuti lintasan dan terus berputar pada target kedua seperti pada Gambar 3. Perubahan koefisien pengendali secara *trial and error* pada kisaran koefisien pengendali awal perlu dilakukan dengan memperhatikan aspek perubahan respon terhadap perubahan masing-masing koefisien.



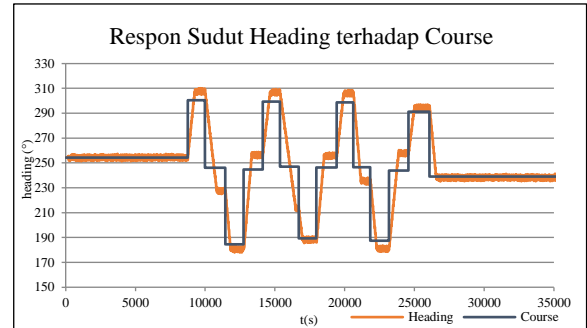
Gambar 4. Perbandingan lintasan untuk metode Ziegler

Dari hasil simulasi perubahan koefisien, nilai K_i memiliki pengaruh yang besar. Perubahan koefisien menjadi $K_p = 20.4$, $K_i = 0$, dan $K_d = 25.5$ menghasilkan respon yang baik seperti ditunjukkan pada Gambar 5 dimana *heading* mampu menuju *course* dengan stabil dan simpangan yang kecil

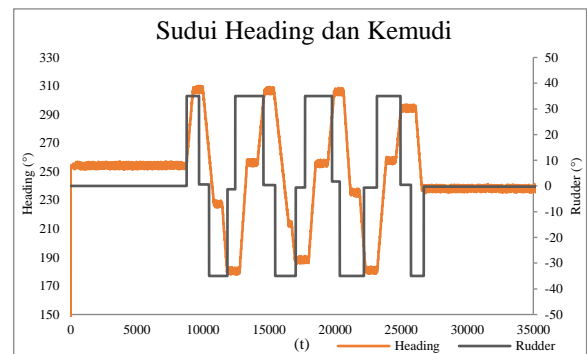


Gambar 5. Respon kapal mengikuti lintasan dengan koefisien pengendali $K_p=20,4$ $K_i=0$; $K_d=25.5$

Simulasi sudut *heading* dan sudut *course* yang menjadi setpoint atau acuan ditunjukkan pada Gambar 6. Hubungan sudut *heading* dan sudut kemudi ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 6. Grafik perbandingan *course* dan *heading*



Gambar 7. Grafik perbandingan *heading* dan sudut *rudder*

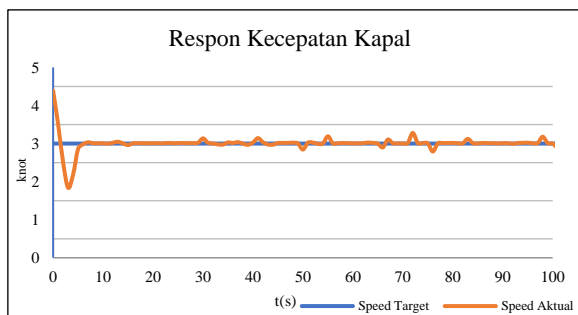
Hasil simulasi yang menunjukkan kesalahan rata-rata menggunakan nilai awal koefisien dan setelah dilakukan tuning didapatkan hasil seperti pada Tabel 4.

Tabel 4. Perbandingan nilai *error heading*

Percobaan	Koefisien PID			Nilai rata-rata error
	K_p	K_i	K_d	
Koef. Awal	20.4	4.08	25.5	40.6211
Koef. Akhir	20.4	0	25.5	0.000537

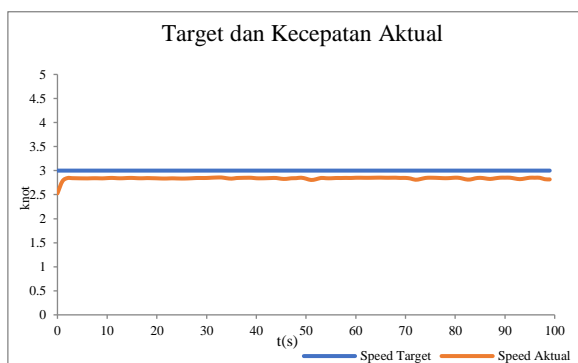
3.5. Tuning Koefisien PID Pengendali Kecepatan

Simulasi kendali kecepatan menggunakan koefisien pengendali awal dari metode nicholas ziegler didapatkan respon kecepatan kapal sangat dinamis pada kisaran setpoint seperti terlihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Respon kecepatan kapal menggunakan koefisien kendali untuk metode Ziegler

Perubahan nilai koefisien pengendali dilakukan berulang kali sehingga didapatkan respon kendali kecepatan yang lebih stabil meskipun masih terdapat simpangan kecepatan. Simpangan kecepatan ini terjadi karena lintasan yang digunakan berbentuk zig-zag. Koefisien pengendali yang ditunjukkan pada Gambar 9, didapatkan adalah $K_p=13$, $K_i=0$, dan $K_d=0.5$.



Gambar 9. Respon kendali kecepatan menggunakan koefisien pengendali yang sudah *dituning*

Dari hasil simulasi dengan menjumlahkan seluruh simpangan kecepatan ditunjukkan pada Table 5.

Tabel 5. Perbandingan selisih respon kecepatan kapal

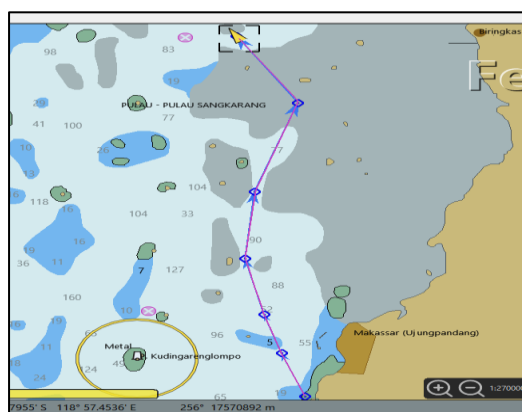
Percobaan	Parameter PID			Selisih <i>speed</i> (knot)
	K_p	K_i	K_d	
1	15	6	9.37	3.007
2	13	0	0.5	0.179

3.6. Simulasi Tracking dengan Trayek Bervariasi

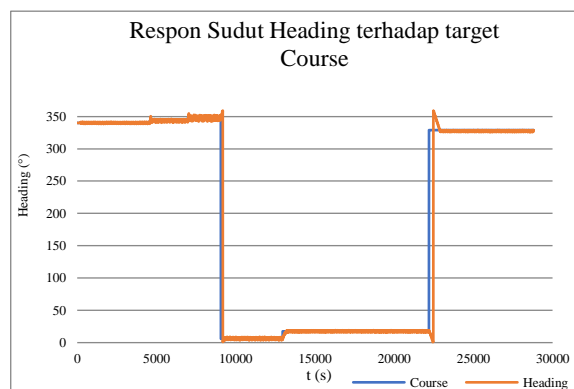
Simulasi kapal pada dua skenario lintasan, lintasan pertama dengan belokan ekstrim kurang dari 45 derajat dan panjang lintasan 44.6 km, jumlah waypoints sebanyak 6 titik lintasan dengan jarak ke setiap titiknya berbeda-beda. Kecepatan pada setiap setpoint pun diberikan berbeda-beda. Hasil simulasi digambarkan pada peta digital aplikasi OpenCPN seperti terlihat pada Gambar 10. Kendali sudut heading kapal dan kecepatan kapal menunjukkan respon kapal yang dapat mengikuti lintasan, sudut

course dan setpoint kecepatan kapal, terlihat masing-masing pada Gambar 11 dan 12.

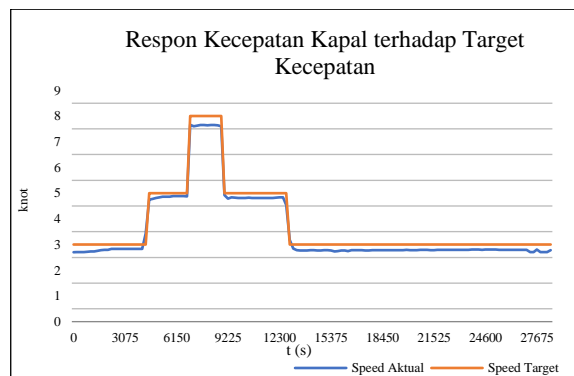
Simulasi kapal dengan lintasan skenario kedua dengan sudut manuver melebihi 45 derajat, sebanyak 9 titik lintasan sepanjang 25,3km dengan tiga variasi kecepatan. Hasil simulasi digambarkan pada peta digital aplikasi OpenCPN seperti terlihat pada Gambar 13. Kendali sudut heading kapal dan kecepatan kapal menunjukkan respon kapal yang dapat mengikuti lintasan, sudut course dan setpoint kecepatan kapal, terlihat masing-masing pada Gambar 14 dan 15.



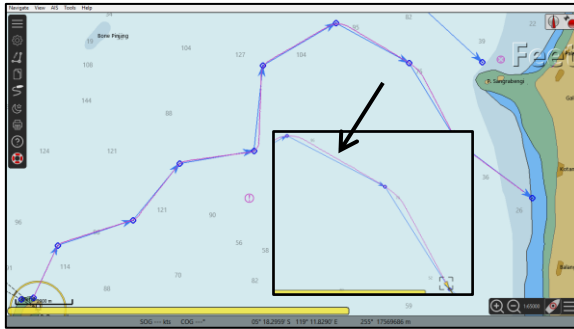
Gambar 10. Simulasi kapal mengikuti lintasan pada skenario pertama.



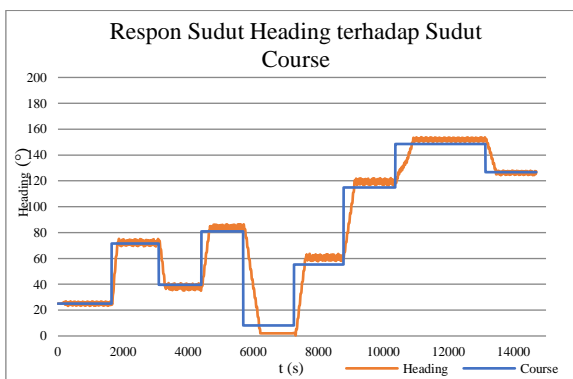
Gambar 11. Respon sudut heading kapal terhadap target



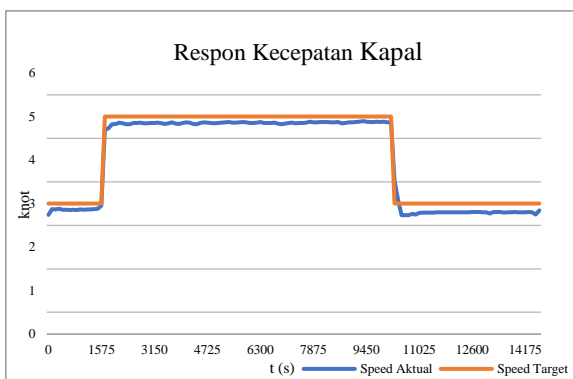
Gambar 12. Grafik perbandingan target dan kecepatan aktual



Gambar 13. Perbandingan lintasan target dan aktual



Gambar 14. Perbandingan sudut course dan heading



Gambar 15. Perbandingan kecepatan target dan kecepatan aktual

4. Kesimpulan dan Saran

4.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi yang disajikan disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Simulasi kendali tracking lintasan kapal menggunakan metode PID mendapatkan nilai koefisien PID untuk kendali sudut heading kapal adalah $[K_p; K_i; K_d] = [20.4; 0; 25.5]$. Koefisien PID kendali kecepatan adalah $[K_p; K_i; K_d] = [13; 0; 0.5]$.
2. Simulasi kendali tracking menggunakan kendali PID memiliki respon heading dan speed yang cukup baik. Dibuktikan dengan respon heading

dan speed yang selalu berusaha mengejar setpoint.

4.2. Saran

1. Pengembangan model matematika yang non-singular pada setiap keadaan sudut kemudi dan kecepatan kapal
2. Penelitian ini belum mengintegrasikan kemampuan menghindari tubrukan
3. Penelitian ini hanya mensimulasikan skenario tracking pada 1 kapal, berikutnya bisa dikembangkan dengan memvariasikan lebih banyak kapal pada lintasan yang berbeda, sekaligus menganalisa resiko tubrukan antar kapal berdasarkan aturan COLREGs.

Acknowledgment

Penelitian ini mendapat dukungan dari kepala laboratorium listrik dan kendali kapal pada Departemen Teknik Sistem Perkapalan, Universitas Hasanuddin

Referensi

- [1] C. D. Wickens, A. Williams, B. A. Clegg, and C. A. P. Smith, "Nautical Collision Avoidance: The Cognitive Challenges of Balancing Safety, Efficiency, and Procedures," *Hum. Factors*, vol. 62, no. 8, pp. 1304–1321, 2020.
- [2] P. Komadina, I. Rudan, and V. Frančić, "A proposal for structuring monitoring and control systems of navigation in the traffic lane next to the port of Zadar," *Pomorstvo*, vol. 19, no. 2, pp. 195–205, 2005.
- [3] Rahimuddin and E. Al., "Simulation of Computation Time of Ship Traffic Analysis using Data Clustering for a Vessel Traffic System," *Pros. Politek. Ilmu Pelayaran Makassar*, vol. 1, no. 4, pp. 41–50, 2021.
- [4] S. Suman and A. Maimun, "Ship Collision Risk Assessment Using AIS Data," *Int. J. Innov. Res. Dev.*, vol. 1, no. 10, pp. 509–524, 2012.
- [5] A. Fernandes, "Vehicle Tracking System using GSM and GPS Technologies," *IOSR J. Comput. Eng.*, pp. 5–8, 2015.
- [6] D. A. Kumar and S. A. H. Prasad, "Efficient ship track keeping using predictive PID controller," *Int. J. Innov. Technol. Explor. Eng.*, vol. 8, no. 8, pp. 2385–2388, 2019.
- [7] A. Jain, H. Prasad, S. Dahal, and R. Sudi, "PD Controller Based Unmanned Ship Navigation," *Int. J. Res. - GRANTHAALAYAH*, pp. 147–154, 2017.