

## SIMULASI NUMERIK KENDALI KAPAL CEPAT TAK BERAWAK DUA PROPELLER TANPA RUDDER

**Muhammad Arifudin Lukmana<sup>1✉</sup>, Fahrudin<sup>2</sup>, Qisthi Al Hazmi Hidayatur  
Rohman<sup>3</sup>, Noverdo Saputra<sup>4</sup>**

<sup>1,2</sup>Teknik Mesin, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jakarta, Jakarta Selatan, 12450.

<sup>3</sup>Teknik Elektro, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jakarta, Jakarta Selatan, 12450.

<sup>4</sup>Teknik Perkapalan, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jakarta, Jakarta Selatan, 12450.

✉ e-mail : [arifudin@upnvj.ac.id](mailto:arifudin@upnvj.ac.id)

### Abstract

*This paper discusses the simulation of automation control and hull manufacturing on a fast boat. This high-speed boat that will be carried out for fish mapping. This study uses a numerical simulation to predict its motion. The experiment was carried out 3 times in forward motion, and 3 times in turn motion. The ship's time and movement in ideal conditions will be recorded for each experiment. With the PID value for forward overshoot with values such as: 8.94%, 30.86%, and 40.60%, while turning overshoot is obtained, among others: 25.77%, 49.82%, and 61.15% Then the advanced settling time obtained includes: 0.91 seconds, 3.84 seconds, and 5.31 seconds. The settling time for turns is: 1,022 seconds, 0.85 seconds, and 0.84 seconds These values are obtained from the simulation graph of the three-dof formulas for surge, sway, yaw.*

**Keywords :** Fast ship, automation, simulation, motion.

### Abstrak

*Artikel ini membahas mengenai simulasi dari kendali otomatis dan pembuatan lambung kapal cepat. Kapal berkecepatan tinggi ini akan digunakan untuk pemetaan ikan. Simulasi menggunakan komputasi numerik untuk mengetahui pergerakannya. Eksperimen dilakukan sebanyak tiga kali untuk gerakan lurus dan tiga kali untuk gerakan belok. Masing-masing eksperimen akan dicatat waktu dan pergerakannya pada kondisi ideal. Nilai PID untuk overshoot saat gerakan maju adalah: 8.94%, 30.86%, and 40.60%, sedangkan saat gerakan belok terdapat overshoot: 25.77%, 49.82%, and 61.15%. Sedangkan settling time saat gerakan maju: 0.91 detik, 3.84 detik, and 5.31 detik. Settling time saat gerakan belok adalah: 1,022 detik, 0.85 detik, dan 0.84 detik. Nilai-nilai ini didapatkan dari grafik simulasi dari tiga persamaan derajat kebebasan: surge, sway dan yaw.*

**Kata kunci :** kapal cepat, otomatis, simulasi, gerak.

### Pendahuluan

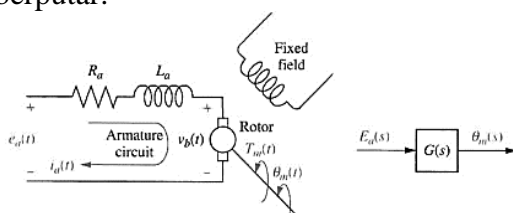
Selama beberapa tahun belakangan ini robot yang sedang populer untuk perairan adalah robot kapal tanpa awak atau Unmanned Surface Vehicle (USV), yaitu robot yang bergerak di atas permukaan air. USV ini memungkinkan untuk diprogram dengan dengan kecerdasan buatan. Namun sebelum menerapkan teknologi kecerdasan buatan, prediksi gerakan fisik atau pemodelan dari sebuah platform sudah harus diketahui. Pemodelan berisi kinematika, kinetika, penyederhanaan model dan identifikasi model [1]. Bergantung dari misi yang akan dijalankan, spesifikasi setiap USV

akan berbeda. Namun tentunya kelebihan dari sebuah USV adalah kecerdasannya [2]. Misi yang akan dijalankan adalah pemetaan ikan.

Sebuah USV untuk misi pemetaan ikan akan membutuhkan beberapa perintah dasar untuk bermanuver. Pada artikel ini akan dibahas pilihan manuver dasar sebagai final control element dari system. Mengingat USV ini tidak memiliki rudder, perintah dasar ini adalah maju dan belok berdasarkan kombinasi antara dua propeller [3]. Batasan yang berlaku adalah keadaan lingkungan ideal: air tenang dan tidak terdapat angin.

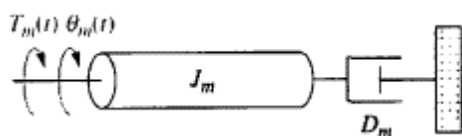
**Brushless Motor**

Brushless DC Motor termasuk kedalam jenis motor sinkron. Artinya medan magnet yang dihasilkan oleh stator dan medan magnet yang dihasilkan oleh rotor berputar pada frekuensi yang sama. Motor BLDC tidak mengalami slip seperti yang terjadi pada motor induksi biasa. Motor jenis ini mempunyai magnet permanen pada bagian rotor dan elektromagnet pada bagian stator. Setelah itu, dengan menggunakan sebuah rangkaian sederhana (*simple computer system*), maka kita dapat merubah arus di elektromagnet ketika bagian rotornya berputar.



Gambar 1. Skema dan Blok diagram sebuah motor listrik

Sekarang untuk menemukan  $T_m(s)$  dalam hal  $\theta_m(s)$  jika ingin memisahkan input dan variabel keluaran dan dapatkan fungsi transfer,  $\theta_m(s)/E_a(s)$



Gambar 2. Pemodelan mekanis pada Motor

Persamaan fungsi transfer yang diinginkan,  $\theta_m(s)/E_a(s)$ , ditentukan dengan persamaan berikut :

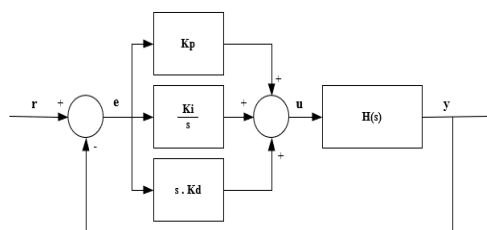
$$\frac{\theta_m(s)}{E_a(s)} = \frac{K_t / (R_a J_m)}{s \left[ s + \frac{1}{J_m} \left( D_m + \frac{K_t K_b}{R_a} \right) \right]} \quad \dots(1)$$

Meskipun bentuk Persamaan. Persamaan diatas dapat dibuat menjadi lebih relatif sederhana [4], yaitu :

$$\frac{\theta_m(s)}{E_a(s)} = \frac{K}{s(s+\alpha)} \quad \dots(2)$$

### Kendali P, I dan D

Pengendalian kombinasi kontrol P, I dan D maka, masing-masing kelebihanya dapat digabungkan untuk mendapatkan kontrol ideal [5].



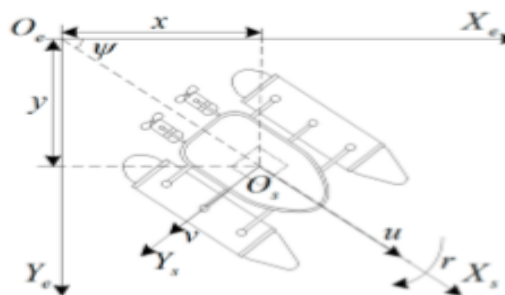
Gambar 3. Kontrol PID

### Pemodelan Dinamik Tiga Derajat Kebebasan

Persamaan gerak kapal USV menggunakan sumbu tubuh sebagai sistem referensi. Sumbu X positif berada di sepanjang sumbu longitudinal ke arah depan; sumbu Z positif berada di sepanjang sumbu vertikal ke arah bawah, yaitu, sepanjang bidang simetri ke arah bawah, dan tegak lurus terhadap sumbu X; dan sumbu Y positif adalah sepanjang sumbu lateral ke kanan, yaitu, tegak lurus terhadap bidang simetri, dan tegak lurus terhadap sumbu X dan Z. [6]

### Kinematika

Model tiga-DOF untuk menggambarkan gerakan planar USV dalam surge, sway dan yaw, dapat ditunjukkan pada gambar [7].



Gambar 4. Diagram skematik tiga DOF dari USV

Untuk menentukan persamaan gerak, dua sistem koordinat referensi dipertimbangkan: kerangka inersia atau tetap ke bumi  $O_e X_e Y_e$  yang dapat dianggap bertepatan dengan koordinat tetap USV dalam beberapa kondisi awal dan kerangka tubuh tetap yaitu  $O_s X_s Y_s$  pada Gambar 4. Karena gerakan bumi hampir tidak mempengaruhi USV

(berbeda dari kendaraan udara), rangka bumi-tetap  $O_e X_e Y_e$  dapat dianggap inersia. Tubuh sumbu  $O_s X_s$  dan  $O_s Y_s$  bertepatan dengan sumbu utama inersia dan biasanya didefinisikan sebagai berikut:  $O_s X_s$  adalah sumbu longitudinal (diarahkan dari belakang ke depan);  $O_s Y_s$  adalah sumbu transversal (diarahkan ke kanan).

Model kinematik *USV* khas dalam gerakan planar dan tanpa adanya gangguan dapat dinyatakan sebagai:

$$\dot{\eta} = J(\eta)v \quad \dots(3)$$

di mana  $\eta = [x \ y \ \psi]^T$  adalah posisi (x, y) dan yaw ( $\psi$ ) dari *USV* dalam bingkai tetap di bumi,  $\dot{\eta} = [\dot{x} \ \dot{y} \ \dot{\psi}]^T$  menggambarkan kecepatan linier kendaraan utara ( $\dot{x}$ ), Timur ( $\dot{y}$ ), dan sudut sumbu Z ( $\dot{\psi}$ ) dalam kerangka tetap bumi,  $v = [u \ v \ r]^T$  adalah *surge velocity* (u), *sway velocity* (v) dan *yaw rate* (r) dan matriks transformasi J ( $\eta$ ), terkait dengan yaw ( $\psi$ ), diberikan oleh

$$J(\eta) = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots(4)$$

**Kinetik**

Berdasarkan asumsi-asumsi ini, model kinetik dapat disederhanakan

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v = \tau \quad \dots(4)$$

$$M = \begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & 0 & 0 \\ 0 & m - Y_{\dot{v}} & 0 \\ 0 & 0 & I_z - N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \dots(5)$$

$$C(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -(m - Y_{\dot{v}})v \\ 0 & 0 & (m - X_{\dot{u}})u \\ (m - Y_{\dot{v}})v & -(m - X_{\dot{u}})u & 0 \end{bmatrix} \dots(6)$$

$$D(v) = D = - \begin{bmatrix} X_u & 0 & 0 \\ 0 & Y_v & 0 \\ 0 & 0 & N_r \end{bmatrix}$$

...(7)

Oleh karena itu, model tiga *DOF* dari *USV* dengan pendorong ganda tanpa kemudi dapat diekspresikan oleh

$$\dot{\eta} = J(\eta)v$$

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v = \tau \quad \dots(8)$$

Untuk menyederhanakan desain pengontrol, kami membuat asumsi berikut dari model kinetik:

$$\dot{x} = u \cos \psi - v \sin \psi$$

$$\dot{y} = u \sin \psi + v \cos \psi \quad \dots(9)$$

$$\dot{\psi} = r$$

$$(m - X_{\dot{u}})\dot{u} - (m - Y_{\dot{v}})vr + X_u u = X_{P1} + X_{P2}$$

$$(m - Y_{\dot{v}})\dot{v} + (m - X_{\dot{u}})ur + Y_v v = 0$$

$$(I_z - N_{\dot{r}})\dot{r} - ((m - X_{\dot{u}}) - (m - Y_{\dot{v}}))uv + N_r r = (X_{P1} - X_{P2}) \cdot d_p \quad \dots(10)$$

**Persamaan Dinamika Gerak Kapal**

*Propeller* yang digunakan adalah dua buah tanpa adanya *rudder*. Bentuk aktual dua *propeller* ini dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. *Propeller* kapal aktual

*Propeller thrust* dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$X_p = cVn + d|n|n \quad \dots(11)$$

Dari rumus *propeller thrust* berikut terdapat parameter-parameter yang sudah ditentukan, sehingga kita mencari nilai dari variabel c dan d [7].

$$c = \frac{\ddot{c}(m-X_{ii})}{2} = \frac{-6.402 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1} \cdot \text{RPS}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1} (5 \text{ kg} - (0.005) \text{ kg})}{2} = -1.60 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1} \cdot \text{RPS}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$$

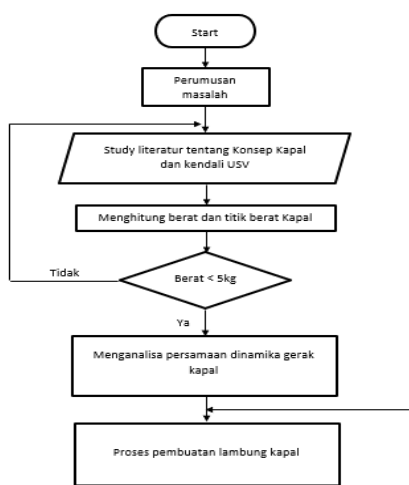
$$d = \frac{\ddot{d}(m-X_{ii})}{2} = \frac{2.014 \times 10^{-4} \text{ ms}^{-2} \cdot \text{RPS}^{-2} \cdot \text{kg}^{-1} (5 \text{ kg} - (0.005) \text{ kg})}{2} = 5.04 \times 10^{-4} \text{ ms}^{-2} \cdot \text{RPS}^{-2} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Tabel 1. Parameter Motor

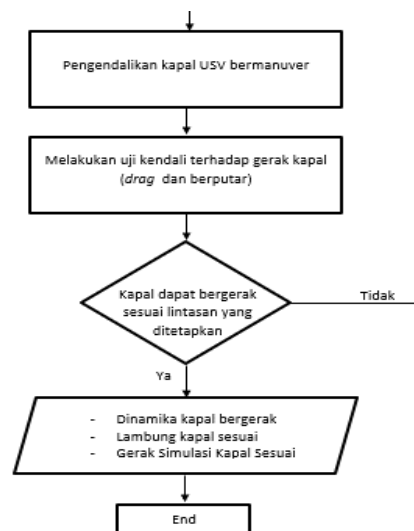
Lambang	Parameter	Nilai dan satuan
J	Momen inersia rotor	0.01 Kg.m <sup>2</sup>
B	Konstanta gesekan motor	0.1 N.m.s
K	Konstanta motor	0.01 N.m
R	Hambatan listrik	1 Ohm
L	Induktansi listrik	0.5 H

### Metode Penelitian

Berikut adalah metodologi penelitian yang digunakan dalam artikel ini.

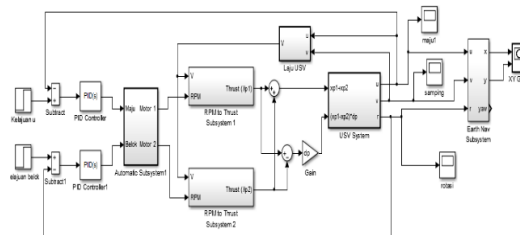


Gambar 6a. Diagram alir penelitian (awal)



Gambar 6b. Diagram alir penelitian (lanjutan)

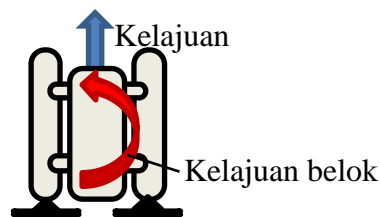
Sistem Gerak USV dalam perangkat lunak numerik dapat dilihat pada Gambar 7. Input ada pada bagian kiri dan output pada bagian kanan. Terdapat dua input yang diberikan (perintah maju dan belok) sedangkan pada bagian output yang diamati adalah kelajuan maju dan beloknya saja.



Gambar 7. Blok diagram USV simulation system

### Perintah pada USV

Perintah yang akan diberikan oleh sistem *autonomous* adalah maju atau belok. Perintah ini didefinisikan sebagai perintah kelajuan. Pada gerakan maju, satuan yang digunakan adalah meter per detik. Sedangkan pada gerakan belok, radian per detik. Gerakan belok mengikuti aturan tangan kanan dengan sumbu putar mengarah ke atas. Ilustrasi mengenai gerakan ini ada pada gambar 8.



**Gambar 8.** Ilustrasi kelajuan maju dan kelajuan belok.

**Hasil dan Pembahasan**

Nilai PID yang didapatkan adalah menggunakan metode *trial-error* dengan estimasi pendahuluan dari fitur autotuning. Nilai PID yang digunakan tertera pada Tabel 2.

Kendali Roll	Nilai
Proportional	100
Integral	100
Derivative	15

**Tabel 2.** Nilai PID

Pengukuran kualitas gerakan kapal dengan menggunakan persentase *overshoot*. Adapun rumus yang digunakan untuk mengukur overshoot pada grafik:

$$\%OS = \frac{C_{Max} - C_{Final}}{C_{Final}} \times 100 \quad \dots (12)$$

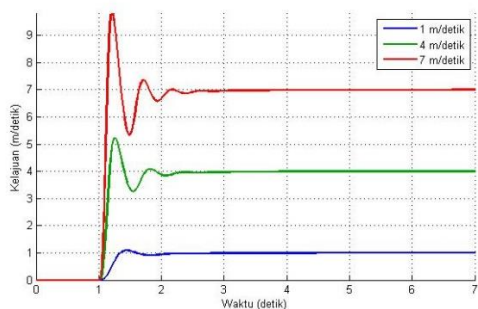
Dimana :

$C_{Max}$  = Nilai terbesar

$C_{Final}$  = Nilai Final yang diperoleh

**Percobaan Gerak Maju**

Nilai yang kami gunakan pada kelajuan maju adalah 1; 4 dan 7 meter per detik. Sedangkan untuk kelajuan belok adalah 1; 1,5 dan 2 radian per detik. Hasil respon USV dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



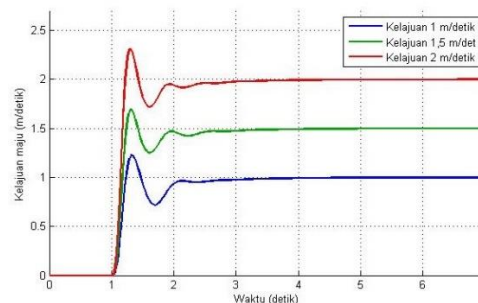
**Gambar 9.** Grafik kelajuan maju 1 m/s; 4 m/s; 7 m/s

**Tabel 3.** Rangkuman nilai *settling time* dan *overshoot* pada perintah maju

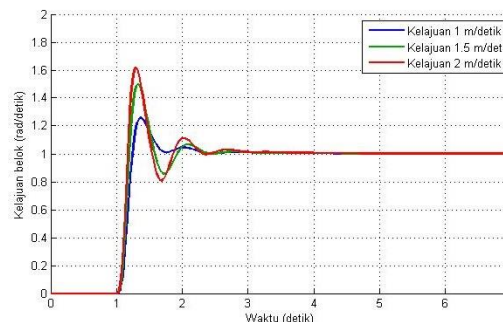
Percobaan	P	I	D	Settling time	Over shoot	
(kelajuan maju 1 m/det)	1	100	100	15	1.68s	9 %
(kelajuan maju 4 m/det)	4	100	100	15	1.22s	30,475%
(kelajuan maju 7 m/det)	7	100	100	15	1,07s	40,34%

**Percobaan Gerak Belok**

Pada percobaan ini perintah maju terdapat tiga variasi: 1; 1,5 dan 2 meter per detik. Sedangkan untuk belok, kelajuan yang digunakan adalah 1 radian per detik saja. Pemilihan nilai tersebut disebabkan karena respon radius pada Gambar 11 yang cukup besar apa bila nilai kelajuan belok atau maju terlalu besar. Gambar 10 (a) dan (b) adalah tiga percobaan yang dilakukan bersamaan namun yang dilihat adalah dua hal berbeda. *Subsystem* belok dan sub sistem maju diamati satu persatu.



(a)



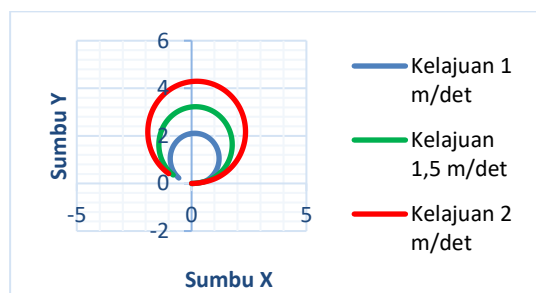
(b)

**Gambar 10.** Grafik gerak lurus (a) dan grafik kelajuan belok (b), dengan kelajuan belok 1 rad/s dan kelajuan maju 1 m/s; 1,5 m/s; 2 m/s

Dari hasil percobaan-percobaan di atas dapat diringkas kedalam tabel berikut:

**Tabel 4.** Rangkuman nilai *settling time* dan *overshoot* pada perintah maju dan belok

Sistem	P	I	D	Settling time	Over shoot
<b>Percobaan 1 (kelajuan: maju 1 m/det dan belok 1 rad/det)</b>					
Maju	100	100	15	2,175 s	22,2 %
Belok	100	100	15	1,237 s	25,77 %
<b>Percobaan 2 (kelajuan: maju 1,5 m/det dan belok 1 rad/det)</b>					
Maju	100	100	15	1,817 s	30,93 %
Belok	100	100	15	1,327 s	49,82 %
<b>Percobaan 3 (kelajuan: maju 2 m/det &amp; belok 1 rad/det)</b>					
Maju	100	100	15	1,435 s	15,3 %
Belok	100	100	15	1,86 s	61,7 %



**Gambar 11.** Grafik Trayektori kapal saat laju belok 1 rad/detik dengan variasi perintah maju

### Analisis

Dari hasil percobaan di atas kita dapat mengambil perkiraan radius belok yang sesuai dengan skenario yang ingin dijalankan. Misalnya untuk radius belok 2 m, maka kita atur kelajuan maju pada 1 m/s dan belok pada 1 m/s. Untuk kecepatan yang lebih, kita dapat gunakan nilai yang lebih tinggi. Namun jika menggunakan kecepatan yang tinggi berisiko tidak stabil karena tingginya nilai *overshoot*. Pada kondisi air tenang tentu ini tidak akan ada masalah, namun jika air bergelombang akan mengakibatkan tidak stabil.

Untuk pengembangan selanjutnya, perlu diberikan sebuah perintah berurutan kepada USV dapat dinilai manuvernya. Baik perintah *zig-zag*, *path following* atau *path maneuvering*.

### KESIMPULAN

Dari pembahasan hasil dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Respon gerak USV sudah sesuai dengan skenario misinya.
2. Nilai PID sebesar  $P = 100$ ,  $I = 100$ , dan  $D = 15$ .
3. Skenario belok dengan radius 2 meter, maka perintah pada input adalah maju 1 m/s dan belok 1 m/s. Untuk radius yang lebih besar, dapat menggunakan perintah maju yang lebih cepat lagi.
4. Respon *subsystem* maju percobaan gerak maju adalah semakin tinggi nilai kelajuannya, *settling time* semakin cepat, namun persentase *overshoot* meningkat
5. Respon *subsystem* belok pada percobaan gerak belok adalah semakin tinggi nilai kelajuannya, *settling time* dan persentase *overshoot* meningkat.

### Ucapan Terima kasih

Terimakasih tim penulis ucapkan kepada UPN Veteran Jakarta. Penelitian ini terwujud karena adanya hibah penelitian internal kampus dengan skema Riset Dosen Pemula.

### Daftar Pustaka

- [1] J. Liu, J. Luo, J. Cui, and Y. Peng, "Trajectory Tracking Control of Underactuated USV with Model Perturbation and External Interference," *MATEC Web Conf.*, vol. 77, no. 15, pp. 0–5, 2016, doi: 10.1051/mateconf/20167709009.
- [2] R. jian Yan, S. Pang, H. bing Sun, and Y. jie Pang, "Development and missions of unmanned surface vehicle," *J. Mar. Sci. Appl.*, vol. 9, no. 4, pp. 451–457, 2010, doi: 10.1007/s11804-010-1033-2.
- [3] S. K. Sharma, W. Naeem, and R. Sutton, "An autopilot based on a local control network design for an unmanned surface vehicle," *J. Navig.*, vol. 65, no. 2, pp. 281–301,

- 2012, doi:  
10.1017/S0373463311000701.
- [4] N. S. Nise, "Control system engineering, john wiley & sons," *Inc, New York*, 2011.
- [5] E. Pitowarno, "Robotika desain, kontrol, dan kecerdasan buatan," *Yogyakarta Andi*, 2006.
- [6] O. Sutresman, R. Syam, and S. Asmal, "Controlling Unmanned Surface Vehicle Rocket using GPS Tracking Method," *Int. J. Technol*, vol. 8, pp. 709–718, 2017.
- [7] C. Li *et al.*, "Modeling and experimental testing of an unmanned surface vehicle with rudderless double thrusters," *Sensors (Switzerland)*, vol. 19, no. 9, 2019, doi: 10.3390/s19092051.