

# Sistem Kemudi Otomatis Kapal Adaptif dalam Mendukung Smart Shipping

<sup>1</sup>Arif Rakhman Suharso, <sup>2</sup>Galang Persada Nurani Hakim

<sup>1</sup>Politeknik Maritim Negeri Indonesia, <sup>2</sup> Universitas Mercu Buana

e-mail: <sup>1</sup>arif.rakhman@polimarin.ac.id, <sup>2</sup>galang.persada@mercubuana.ac.id

\*Corresponding author: <sup>1</sup>arif.rakhman@polimarin.ac.id

## ABSTRAK

Perkembangan transformasi digital di sektor maritim telah mendorong penerapan konsep smart shipping yang mengintegrasikan teknologi otomasi, sensor, komunikasi data, dan kecerdasan buatan untuk meningkatkan keselamatan dan efisiensi pelayaran. Salah satu teknologi utama dalam implementasi smart shipping adalah sistem kemudi otomatis kapal adaptif yang mampu mempertahankan arah pelayaran serta menyesuaikan respons kendali terhadap perubahan kondisi lingkungan secara real-time. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji perkembangan sistem kemudi otomatis kapal adaptif berbasis Arduino dan komputer dalam mendukung implementasi smart shipping dan Maritime Autonomous Surface Ships (MASS). Metode yang digunakan adalah studi literatur dengan mengumpulkan dan menganalisis berbagai jurnal ilmiah, prosiding, buku referensi, serta dokumen resmi yang berkaitan dengan sistem kemudi kapal, autopilot, kendali adaptif, kecerdasan buatan, Internet of Things (IoT), dan kapal otonom. Hasil kajian menunjukkan bahwa penerapan sistem kemudi otomatis berbasis sensor navigasi, aktuator kemudi, dan algoritma kendali modern seperti PID adaptif, fuzzy logic, sliding mode control, dan artificial neural network mampu meningkatkan akurasi navigasi, stabilitas arah kapal, serta mengurangi kesalahan lintasan. Integrasi sistem kemudi dengan GPS, AIS, ECDIS, radar, dan komunikasi digital juga mendukung pengambilan keputusan navigasi secara otomatis dan real-time. Selain meningkatkan keselamatan pelayaran sesuai persyaratan IMO dan SOLAS, sistem kemudi adaptif berpotensi meningkatkan efisiensi operasional kapal dan menjadi fondasi penting dalam pengembangan kapal pintar serta kapal otonom di masa depan.

**Kata kunci:** steering gear, Arduino, adaptive control, smart shipping, SOLAS, autopilot kapal

## ABSTRACT

*The digital transformation of the maritime sector has accelerated the implementation of the smart shipping concept, which integrates automation, sensors, data communication, and artificial intelligence technologies to improve navigation safety and operational efficiency. One of the key technologies supporting smart shipping is an adaptive automatic ship steering system capable of maintaining vessel heading and adjusting control responses to changing environmental conditions in real time. This study aims to review the development of adaptive automatic ship steering systems based on Arduino and computer technologies in supporting smart shipping and Maritime Autonomous Surface Ships (MASS). The research employed a literature review method by collecting and analyzing scientific journals, conference proceedings, reference books, and official publications related to ship steering systems, autopilot technology, adaptive control, artificial intelligence, the Internet of Things (IoT), and autonomous ships. The results indicate that the implementation of automatic steering systems utilizing navigation sensors, steering actuators, and advanced control algorithms such as adaptive PID, fuzzy logic, sliding mode control, and artificial neural networks can significantly improve navigation accuracy, heading stability, and reduce cross-track errors. Furthermore, the integration of steering systems with GPS, AIS, ECDIS, radar, and digital communication technologies enables real-time navigation decision-making and enhances operational reliability. In addition to supporting compliance with IMO and SOLAS safety requirements, adaptive steering systems contribute to improved operational efficiency and represent a fundamental technology for the future development of smart ships and autonomous vessels.*

**Keywords:** steering gear, Arduino, adaptive control, smart shipping, SOLAS, ship autopilot

## 1. PENDAHULUAN

Transformasi digital pada sektor maritim telah mendorong lahirnya konsep smart shipping, yaitu sistem pelayaran yang memanfaatkan teknologi otomasi, sensor, komunikasi data, dan kecerdasan buatan untuk meningkatkan keselamatan, efisiensi, dan keberlanjutan operasional kapal. Salah satu komponen penting dalam implementasi smart shipping adalah sistem kemudi otomatis yang mampu mengendalikan arah kapal secara mandiri dan beradaptasi terhadap perubahan kondisi lingkungan pelayaran. Perkembangan teknologi ini menjadi semakin penting seiring meningkatnya kebutuhan akan sistem navigasi yang lebih presisi, responsif, dan andal pada kapal modern. Sistem kemudi otomatis merupakan komponen utama dalam pengembangan Maritime Autonomous Surface Ships (MASS) yang menjadi bagian dari implementasi smart shipping. Sistem ini berfungsi memastikan kapal mampu mengikuti jalur pelayaran yang telah ditentukan dengan kesalahan lintasan (cross-track error) yang minimal melalui integrasi subsistem guidance, navigation, dan control (GNC). Berbagai metode kendali adaptif telah dikembangkan, seperti Line of Sight (LOS), Integral LOS, Model Predictive Control (MPC), fuzzy control, adaptive control, dan neural network, untuk meningkatkan kemampuan kapal dalam menghadapi gangguan lingkungan seperti angin, gelombang, dan arus laut. [1].

Sistem kemudi otomatis (autopilot) memiliki peran penting dalam meningkatkan kinerja dan keandalan pengendalian kapal. Dengan memanfaatkan Programmable Automatic Controller berbasis NI CompactRIO, sistem autopilot dirancang untuk mengendalikan pergerakan kemudi secara otomatis dan divalidasi melalui simulasi uji manuver zig-zag sesuai standar manuverabilitas IMO. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu merespons perubahan sudut kemudi dengan baik serta menghasilkan lintasan zig-zag sesuai yang diharapkan [2]. Dalam mendukung implementasi smart shipping, sistem kemudi otomatis memerlukan data posisi kemudi yang akurat dan real-time. Oleh karena itu, berbagai penelitian telah mengembangkan penggunaan sensor seperti incremental rotary encoder dan potensiometer untuk mendeteksi sudut kemudi kapal [4]–[6]. Olah gerak kapal dipengaruhi oleh faktor internal dan eksternal. Faktor internal meliputi desain kapal, sistem propulsi, kemudi, kondisi muatan, kecepatan kapal, serta kemampuan awak kapal. Sementara itu, faktor eksternal meliputi kondisi lingkungan seperti angin, gelombang, arus, dan kedalaman perairan. Selain itu, penggunaan peralatan navigasi modern seperti radar, GPS, dan autopilot dapat meningkatkan kemampuan manuver kapal sehingga keselamatan pelayaran dapat terjaga, terutama saat menghadapi kondisi cuaca buruk [7].

Selain aspek teknis, pengembangan sistem kemudi otomatis harus memenuhi standar keselamatan pelayaran internasional. International Maritime Organization (IMO) melalui konvensi SOLAS menetapkan persyaratan mengenai keandalan, redundansi, dan kemampuan operasional sistem steering gear untuk menjamin keselamatan navigasi kapal [3]. Ketentuan tersebut menjadi landasan penting dalam pengembangan sistem kemudi otomatis modern agar tetap memenuhi aspek keselamatan sekaligus mendukung penerapan teknologi otomasi di sektor maritim. Perkembangan teknologi otomasi juga mendorong integrasi berbagai fitur cerdas pada sistem kemudi kapal. Penelitian mengenai sistem isolasi otomatis pada steering gear menunjukkan bahwa otomatisasi dapat meningkatkan keandalan sistem dan mengurangi risiko kegagalan operasional [8]. Di sisi lain, penerapan teknologi antarmuka manusia-mesin (Human Machine Interface), komunikasi digital, dan pengenalan suara membuka peluang terciptanya sistem navigasi yang lebih intuitif dan efisien bagi operator kapal [10]. Inovasi tersebut menjadi bagian dari evolusi menuju sistem kemudi adaptif yang mampu berinteraksi dengan berbagai subsistem kapal secara terintegrasi.

Perkembangan sistem kemudi otomatis kapal adaptif juga sejalan dengan tren pengembangan Maritime Autonomous Surface Ships (MASS), di mana kapal mampu melakukan navigasi secara semi-otonom maupun otonom dengan intervensi manusia yang minimal [1], [9]. Dalam konteks ini, kemampuan sistem kemudi untuk beradaptasi terhadap perubahan kondisi pelayaran menjadi faktor utama dalam menjamin keselamatan dan efektivitas operasi kapal. Sejalan dengan perkembangan konsep smart shipping, International Maritime Organization (IMO) juga tengah mendorong pengembangan Maritime Autonomous Surface Ships (MASS) sebagai bagian dari transformasi digital sektor pelayaran. Kapal otonom memerlukan integrasi antara sistem navigasi, sensor, komunikasi data, dan sistem kemudi otomatis yang mampu mengambil keputusan secara adaptif berdasarkan kondisi lingkungan dan operasional kapal. Dalam konteks tersebut, sistem kemudi otomatis adaptif menjadi salah satu teknologi kunci yang memungkinkan kapal mempertahankan jalur pelayaran, melakukan manuver dengan aman, serta merespons perubahan kondisi secara real-time tanpa ketergantungan penuh pada operator manusia. Oleh karena itu, pengembangan sistem kemudi adaptif tidak hanya mendukung peningkatan keselamatan dan efisiensi pelayaran, tetapi juga menjadi fondasi penting dalam implementasi kapal pintar dan kapal otonom di masa depan [11]. Berdasarkan uraian tersebut, diperlukan kajian mengenai perkembangan sistem kemudi otomatis kapal adaptif yang mendukung implementasi smart shipping. Kajian ini bertujuan untuk meninjau teknologi kendali otomatis, sensor kemudi, sistem steering gear, serta integrasi teknologi digital yang

berperan dalam meningkatkan keselamatan, efisiensi navigasi, dan kesiapan industri pelayaran menuju era kapal pintar dan kapal otonom.

## 2. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode studi literatur untuk mengkaji perkembangan sistem kemudi otomatis kapal adaptif berbasis Arduino dan komputer dalam mendukung konsep smart shipping. Metode studi literatur dipilih karena mampu memberikan pemahaman yang komprehensif mengenai perkembangan teknologi, konsep, dan hasil penelitian terdahulu yang relevan dengan topik yang diteliti. Studi literatur merupakan pendekatan yang efektif untuk mengidentifikasi teori, temuan penelitian, serta perkembangan ilmu pengetahuan yang dapat dijadikan dasar dalam menganalisis suatu permasalahan penelitian [12]. Data penelitian diperoleh dari berbagai sumber ilmiah yang meliputi jurnal nasional dan internasional, prosiding konferensi, buku referensi, serta dokumen dan publikasi resmi yang berkaitan dengan sistem kemudi kapal (steering gear), sistem autopilot, adaptive control, kecerdasan buatan, Internet of Things (IoT), dan konsep smart shipping. Selain itu, penelitian ini juga memanfaatkan publikasi dan informasi dari International Maritime Organization (IMO) mengenai pengembangan Autonomous Shipping dan Maritime Autonomous Surface Ships (MASS) sebagai bagian dari transformasi industri pelayaran menuju sistem operasi kapal yang lebih cerdas dan otomatis [11].

Literatur dikumpulkan melalui berbagai basis data akademik seperti Google Scholar, ScienceDirect, IEEE Xplore, SpringerLink, dan ResearchGate dengan menggunakan kata kunci yang berkaitan dengan sistem kemudi otomatis kapal, Arduino, autopilot, adaptive steering, smart shipping, dan autonomous ship. Literatur yang diperoleh kemudian diseleksi berdasarkan relevansi topik, kualitas sumber, tahun publikasi, serta keterkaitannya dengan pengembangan sistem kemudi otomatis dan teknologi kapal pintar. Literatur yang membahas sensor navigasi, sensor posisi rudder, aktuator kemudi, sistem kontrol PID, kontrol adaptif, dan teknologi kecerdasan buatan diprioritaskan dalam proses analisis.

Tahap analisis dilakukan secara deskriptif dan komparatif dengan membandingkan berbagai hasil penelitian mengenai metode pengendalian kemudi kapal, performa sistem otomatis, serta integrasi antara mikrokontroler dan komputer dalam mendukung navigasi kapal. Analisis juga difokuskan pada kemampuan sistem dalam meningkatkan stabilitas arah kapal, efisiensi manuver, serta mendukung implementasi konsep smart shipping dan kapal otonom yang saat ini menjadi fokus pengembangan IMO [11]. Selanjutnya, hasil analisis disintesis untuk memperoleh gambaran mengenai tren perkembangan teknologi sistem kemudi otomatis kapal adaptif, kelebihan dan keterbatasannya, serta peluang penerapannya pada sistem pelayaran modern. Melalui metode studi literatur ini diharapkan dapat diperoleh pemahaman yang lebih mendalam mengenai perkembangan sistem kemudi otomatis kapal adaptif berbasis Arduino dan komputer serta kontribusinya dalam mendukung implementasi smart shipping dan Maritime Autonomous Surface Ships (MASS) pada masa mendatang [11], [12].

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Perkembangan teknologi pelayaran menuju konsep Smart Shipping mendorong penggunaan sistem kemudi otomatis yang mampu beradaptasi terhadap perubahan kondisi lingkungan dan operasional kapal. Sistem kemudi otomatis modern tidak hanya berfungsi mempertahankan arah kapal (heading control), tetapi juga mengintegrasikan data navigasi, sensor, komunikasi, dan kecerdasan buatan untuk meningkatkan keselamatan serta efisiensi pelayaran [1], [11]. Penelitian mengenai sistem autopilot kapal menunjukkan bahwa penggunaan pengendali otomatis mampu meningkatkan akurasi pengendalian arah dibandingkan metode manual. Implementasi Programmable Automatic Controller pada sistem autopilot model kapal terbukti mampu menjaga kestabilan arah kapal selama proses navigasi [2]. Selain itu, perkembangan teknologi automatic steering telah mengalami transformasi dari sistem kontrol konvensional menuju sistem kontrol adaptif yang mampu menyesuaikan parameter kendali sesuai kondisi operasional kapal [9].

Keberhasilan sistem kemudi otomatis sangat dipengaruhi oleh akurasi sensor yang digunakan untuk mendeteksi posisi rudder dan arah kapal. Penelitian yang membandingkan sensor incremental rotary encoder dan potensiometer menunjukkan bahwa kedua sensor memiliki karakteristik berbeda dalam pengukuran sudut kemudi. Sensor encoder memberikan resolusi yang lebih tinggi dan stabilitas yang lebih baik dibandingkan potensiometer [4], [5].

sistem kemudi adaptif pada kapal perlu mempertimbangkan berbagai faktor yang memengaruhi olah gerak kapal, seperti desain dan dimensi kapal, sistem propulsi, karakteristik kemudi (rudder), distribusi muatan, kondisi lingkungan, kecepatan kapal, kemampuan operator, serta dukungan peralatan navigasi. Pada kondisi operasional yang dinamis, khususnya saat menghadapi

gelombang, arus, dan angin yang berubah-ubah, sistem kemudi adaptif mampu menyesuaikan parameter kendali secara otomatis berdasarkan perubahan respons kapal. Kemampuan adaptasi ini memungkinkan kapal mempertahankan haluan dengan lebih stabil dibandingkan sistem kemudi konvensional, mengurangi kesalahan lintasan, serta meningkatkan keselamatan pelayaran [7]. Perkembangan kecerdasan buatan (Artificial Intelligence) membuka peluang pengembangan sistem kemudi kapal yang lebih cerdas. Penggunaan jaringan saraf tiruan (Artificial Neural Network) pada pengendalian heading dan posisi kapal mampu meningkatkan kemampuan sistem dalam mengatasi gangguan eksternal seperti angin, arus, dan gelombang laut [18].

Kajian mengenai path-following control untuk Maritime Autonomous Surface Ships (MASS) menunjukkan bahwa metode berbasis AI dan kontrol adaptif memiliki performa lebih baik dibandingkan kontrol klasik karena mampu melakukan pembelajaran terhadap perubahan lingkungan secara real-time [1]. Selain itu, teknologi kontrol modern seperti sliding mode control telah terbukti mampu meningkatkan stabilitas dan ketahanan sistem terhadap ketidakpastian model dinamis kapal [16]. Penelitian terbaru juga menunjukkan bahwa teknologi kemudi otomatis berkembang menuju integrasi berbagai metode kontrol seperti PID adaptif, fuzzy logic, neural network, dan machine learning untuk meningkatkan akurasi navigasi kapal otonom [17].

Konsep Smart Shipping menekankan integrasi antara sistem navigasi, komunikasi data, sensor, dan otomatisasi kapal. Dalam konteks ini, sistem kemudi otomatis berfungsi sebagai komponen utama yang memungkinkan kapal beroperasi secara efisien dan aman [11]. Data navigasi dari Automatic Identification System (AIS) yang diintegrasikan dengan Geographic Information System (GIS) memungkinkan pemantauan posisi kapal secara real-time dan mendukung pengambilan keputusan navigasi secara otomatis [14]. Selain itu, teknologi pengenalan suara mulai diterapkan sebagai sistem asistensi manuver kapal untuk meningkatkan interaksi manusia dan mesin (Human Machine Interface) pada kapal modern [10].

Pengembangan prototipe kendali rudder berbasis PID yang mengacu pada persyaratan SOLAS menunjukkan bahwa sistem kontrol modern mampu mempertahankan performa kemudi sesuai standar keselamatan pelayaran internasional [15]. Dengan demikian, integrasi sensor, sistem kendali adaptif, dan teknologi komunikasi menjadi fondasi utama implementasi Smart Shipping. Penerapan sistem kemudi otomatis harus memenuhi ketentuan keselamatan yang ditetapkan oleh International Maritime Organization (IMO). Regulasi SOLAS mensyaratkan bahwa sistem kemudi kapal harus memiliki keandalan tinggi, kemampuan redundansi, serta tetap dapat dioperasikan secara aman ketika terjadi kegagalan sistem [3].

Selain itu, IMO sedang mengembangkan regulasi untuk Maritime Autonomous Surface Ships yang mengatur penggunaan teknologi otonom dalam operasi kapal masa depan [11]. Kehadiran regulasi tersebut menunjukkan bahwa pengembangan sistem kemudi otomatis adaptif harus mempertimbangkan aspek keselamatan, keamanan siber, dan interoperabilitas sistem digital. Meskipun perkembangan teknologi kemudi otomatis menunjukkan hasil yang menjanjikan, masih terdapat beberapa tantangan seperti keandalan sensor, keamanan siber, integrasi data multi-sensor, serta kemampuan sistem dalam menghadapi kondisi lingkungan ekstrem. Ancaman siber pada sistem maritim digital juga menjadi perhatian penting dalam pengembangan kapal pintar masa depan [13]. Prospek pengembangan sistem kemudi otomatis adaptif diperkirakan akan semakin meningkat dengan pemanfaatan kecerdasan buatan, komputasi kuantum, Internet of Things (IoT), dan komunikasi kapal-ke-pantai (ship-to-shore communication). Teknologi tersebut memungkinkan terciptanya kapal yang lebih aman, efisien, dan mampu beroperasi secara semi-otonom maupun otonom penuh sesuai visi Smart Shipping dan MASS yang sedang dikembangkan oleh IMO [1], [11], [17].

Implementasi sistem kemudi otomatis adaptif pada kapal modern memerlukan integrasi berbagai komponen yang bekerja secara terpadu. Arsitektur sistem umumnya terdiri atas lapisan sensor, pengolah data, sistem pengendali, aktuator kemudi, dan sistem komunikasi maritim. Sensor navigasi seperti GPS, gyrocompass, AIS, dan sensor posisi rudder berfungsi sebagai sumber data utama yang memberikan informasi kondisi kapal secara real-time [14]. Data dari berbagai sensor kemudian diproses oleh unit pengendali yang menggunakan algoritma kontrol tertentu, seperti PID, adaptive control, sliding mode control, maupun neural network. Sistem ini bertugas menghitung besarnya sudut rudder yang diperlukan untuk mempertahankan heading kapal atau mengikuti lintasan pelayaran yang telah direncanakan [1], [16], [18]. Hasil perhitungan tersebut dikirimkan kepada aktuator kemudi sehingga rudder dapat bergerak sesuai perintah sistem.

Pada konsep Smart Shipping, sistem kemudi tidak lagi bekerja secara mandiri, tetapi terhubung dengan sistem navigasi elektronik, electronic chart display and information system (ECDIS), radar, AIS, dan pusat kendali kapal. Integrasi tersebut memungkinkan pengambilan keputusan yang lebih cepat dan akurat karena sistem memperoleh informasi yang lebih lengkap mengenai kondisi lingkungan pelayaran. Dengan demikian, kapal dapat melakukan koreksi arah secara otomatis ketika mendeteksi perubahan jalur, hambatan navigasi, atau kondisi cuaca yang berpotensi mengganggu keselamatan pelayaran [1], [11].

Selain integrasi internal, sistem kemudi modern juga mendukung pertukaran data dengan pusat kendali di

darat melalui jaringan komunikasi maritim. Konsep ini dikenal sebagai ship-to-shore connectivity, yaitu kemampuan kapal untuk mengirimkan data operasional secara berkelanjutan kepada operator di darat. Data tersebut dapat digunakan untuk pemantauan kondisi kapal, analisis performa navigasi, maupun dukungan pengambilan keputusan secara jarak jauh. Kemampuan ini menjadi salah satu karakteristik utama dalam implementasi Smart Shipping dan Maritime Autonomous Surface Ships (MASS) [11].

Keselamatan pelayaran merupakan aspek utama dalam pengembangan sistem kemudi otomatis. Berdasarkan ketentuan SOLAS, sistem kemudi harus mampu mempertahankan kemampuan manuver kapal secara aman pada berbagai kondisi operasi [3]. Penggunaan sistem kemudi adaptif memberikan beberapa keuntungan dibandingkan sistem konvensional, terutama dalam hal respons terhadap gangguan eksternal. Pada sistem konvensional, perubahan kondisi laut sering kali menyebabkan penyimpangan heading yang memerlukan koreksi berulang oleh operator. Sistem adaptif mampu menyesuaikan parameter kontrol secara otomatis sehingga kesalahan arah (heading error) dapat diminimalkan tanpa intervensi manusia yang berlebihan [9]. Hal ini berkontribusi terhadap pengurangan beban kerja awak kapal dan peningkatan stabilitas navigasi.

Keuntungan lain adalah kemampuan sistem dalam mendeteksi anomali operasi lebih awal. Integrasi sensor dan sistem monitoring memungkinkan terjadinya pemantauan kondisi rudder, aktuator, serta perangkat kontrol secara berkesinambungan. Jika ditemukan indikasi kegagalan komponen, sistem dapat memberikan peringatan dini kepada operator sehingga tindakan korektif dapat segera dilakukan [8]. Pendekatan ini sejalan dengan konsep predictive maintenance yang saat ini banyak diterapkan pada kapal pintar. Dari sisi efisiensi pelayaran, sistem kemudi adaptif mampu menjaga kapal tetap berada pada jalur optimal sehingga konsumsi bahan bakar dapat ditekan. Kemampuan path-following yang lebih akurat mengurangi deviasi lintasan dan menghindari manuver yang tidak diperlukan [1]. Dengan demikian, sistem kemudi otomatis tidak hanya meningkatkan keselamatan, tetapi juga mendukung efisiensi operasional dan keberlanjutan lingkungan. Perkembangan teknologi digital menunjukkan bahwa sistem kemudi otomatis akan menjadi salah satu elemen utama dalam transformasi industri maritim menuju era kapal otonom. Integrasi antara sensor cerdas, kecerdasan buatan, komunikasi data, dan sistem navigasi modern akan menghasilkan sistem kemudi yang lebih adaptif, andal, dan sesuai dengan tuntutan keselamatan pelayaran masa depan [11], [17].

#### 4. KESIMPULAN

sistem kemudi otomatis kapal adaptif merupakan salah satu teknologi kunci dalam mendukung implementasi smart shipping dan pengembangan Maritime Autonomous Surface Ships (MASS). Perkembangan teknologi kendali kapal telah bergeser dari sistem kontrol konvensional menuju sistem kontrol adaptif yang mampu menyesuaikan parameter kendali secara otomatis terhadap perubahan kondisi operasional dan lingkungan pelayaran. Berbagai metode pengendalian seperti PID adaptif, fuzzy logic, adaptive control, sliding mode control, artificial neural network, dan machine learning menunjukkan kemampuan yang baik dalam meningkatkan akurasi navigasi, stabilitas arah kapal, serta mengurangi kesalahan lintasan. Keberhasilan sistem kemudi otomatis sangat dipengaruhi oleh integrasi sensor navigasi dan sensor posisi kemudi yang mampu menyediakan data secara akurat dan real-time. Penggunaan sensor seperti incremental rotary encoder, potensiometer, GPS, gyrocompass, dan AIS memungkinkan sistem memperoleh informasi yang diperlukan untuk melakukan pengendalian secara efektif. Selain itu, integrasi antara sistem kemudi, sistem navigasi elektronik, komunikasi data, serta teknologi Human Machine Interface (HMI) semakin memperkuat kemampuan kapal dalam melakukan operasi yang aman dan efisien. Dari aspek keselamatan, pengembangan sistem kemudi otomatis harus memenuhi ketentuan dan standar yang ditetapkan oleh International Maritime Organization (IMO) melalui konvensi SOLAS terkait keandalan, redundansi, dan keamanan operasional sistem kemudi kapal. Meskipun masih terdapat tantangan berupa keandalan sensor, keamanan siber, dan integrasi data multi-sensor, perkembangan teknologi kecerdasan buatan, Internet of Things (IoT), serta komunikasi kapal-ke-pantai menunjukkan prospek yang sangat menjanjikan bagi pengembangan sistem kemudi otomatis yang lebih cerdas dan adaptif sesuai dengan smart shipping dan MASS yang sedang dikembangkan oleh IMO.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. Xu and C. Guedes Soares, "Review of Path-Following Control Systems for Maritime Autonomous Surface Ships," *Journal of Marine Science and Application*, vol. 22, no. 2, pp. 153–171, 2023, doi:

10.1007/s11804-023-00338-6

- [2] Yuniati and C. Permana, "Perancangan Sistem Autopilot untuk Kontrol Kemudi Model Kapal Menggunakan Programable Automatic Controller NI CompactRIO," *Jurnal Wave*, vol. 9, no. 2, pp. 65–70, Dec. 2015.
- [3] International Maritime Organization, SOLAS Consolidated Edition 2018. London, UK: IMO Publishing, 2018.
- [4] A. R. Suharso, G. B. Santoso, A. Hendartono, and R. B. Kumara, "Perbandingan Sensor Incremental Rotary Encoder Dan Potensiometer Pada Simulasi Kemudi Kapal Berbasis Arduino," *ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, dan Teknik Elektronika*, vol. 11, no. 1, pp. 155–166, 2023, doi: 10.26760/elkomika.v11i1.155.
- [5] A. R. Suharso, "Incremental Rotary Encoder Accuracy Testing On Ship Rudder Simulation," *Ocean Engineering: Jurnal Ilmu Teknik dan Teknologi Maritim*, vol. 1, no. 3, pp. 118–127, 2022.
- [6] A. R. Suharso, A. Hendartono, E. Sirait, R. B. Kumara, and Susanto, "Pengujian Tingkat Ketelitian Potensiometer pada Simulasi Kemudi Kapal," *Wave: Jurnal Ilmiah Teknologi Maritim*, vol. 16, no. 2, pp. 79–86, Dec. 2022.
- [7] S. R., E. Nurmala, I. K. Laju, H. R. Dahlan, and G. Astria, "Olah Gerak Kapal dalam Kondisi Cuaca Buruk di MT. MPMT XII," *Jurnal Multidisiplin Riset Ilmiah*, vol. 2, no. 1, pp. 1–10, Jan. 2025.
- [8] L. Samuel, H. H. Kulkarni, and V. S. Jape, "Relay Based Robot for Automated Isolating Systems Used in Steering Gear of a Ship: Comparative Performance Analysis with Manual System," *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education (TURCOMAT)*, vol. 12, no. 12, pp. 3490–3498, 2021, doi: 10.17762/turcomat.v12i12.8082.
- [9] J. van Amerongen and H. R. van Nauta Lemke, "Recent Developments in Automatic Steering of Ships," *The Journal of Navigation*, vol. 39, no. 3, pp. 349–362, Sep. 1986.
- [10] G. B. Prasajo, M. I. Firdaus, F. Nofandi, and T. Haryanto, "Prototipe Asistensi Pengenalan Suara Untuk Manuver Kapal," *SIBATIK*, vol. 5, no. 3, pp. 1660–1673, 2026, doi: 10.54443/sibatik.v5i3.4401.
- [11] International Maritime Organization (IMO), "Autonomous Shipping." [Online]. Available: <https://www.imo.org/en/mediacentre/hottopics/pages/autonomous-shipping.aspx>. Accessed: Apr. 2, 2026.
- [12] Andre Febrianto, Rusdy A Siroj, and Hartatiana, "Studi Literatur: Landasan Dalam Memilih Metode Penelitian Yang Tepat," *JERD*, vol. 1, no. 2, pp. 259–263, Dec. 2024.
- [13] D. Gading, "Transformasi Keamanan Maritim Adaptif Melalui Inovasi Teknologi Kuantum Dalam Menghadapi Ancaman Hibrida Global," *Indonesian Maritime Journal*, vol. 13, no. 3, p. 13, Jan. 2026, doi: 10.52307/a98scw89.
- [14] M. Masmilah, H. Setiawan, W. Hermawansyah, and R. Haryadi, "Rancang Bangun Sistem Monitoring Kapal Menggunakan Data Automatic Identification System (AIS) dengan Geographic Information System (GIS)," in *Prosiding TAU SNAR-TEK: Seminar Nasional Rekayasa dan Teknologi 2019*, vol. 1, no. 1, 2019.
- [15] A. R. Suharso, A. Hendartono, A. Anwar, and S. Supriyadi, "Design and experimental evaluation of a PID based ship rudder control prototype referenced to SOLAS," *Advance Sustainable Science, Engineering and Technology (ASSET)*, vol. 8, no. 2, pp. 1–8, 2026, doi: 10.26877/asset.v8i2.2739.
- [16] A. J. Healey and D. Lienard, "Multivariable Sliding Mode Control for Autonomous Diving and Steering of Unmanned Underwater Vehicles," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 18, no. 3, pp. 327–339, 1993.
- [17] M. Zheng et al., "A Comprehensive Review of Ship Automatic Rudder Technology: Development, Challenges, and Prospects," *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 13, no. 5, p. 851, 2025.
- [18] S. Unar, M. A. Unar, Z. A. Memon, and S. Narejo, "A Neural Network Based Heading and Position Control System of a Ship," *Mehran University Research Journal of Engineering and Technology*, vol. 41, no. 2, pp. 172–177, 2022, doi: 10.22581/muet1982.2202.16.