

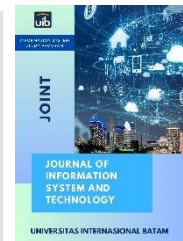
Contents list available at <https://journal.uib.ac.id/>



JOINT

(Journal of Information System and Technology)

journal homepage: <https://journal.uib.ac.id/index.php/joint/>



Perancangan Sistem Kontrol Propulsi Hibrida Kapal Trimaran Berbasis *Fuzzy Logic*

**Fajar Surya Muhammad Aldoko¹, Edi Kurniawan², Romanda Annas Amrullah³,
Henna Nurdiansari⁴, Wulan Marlia Sandi⁵**

1,2,3,4,5 Teknologi Rekayasa Kelistrikan Kapal, Politeknik Perkapalan Surabaya, Surabaya, Indonesia

E-mail: suryafajar1416@gmail.com

Abstract

This study presents the design and implementation of a hybrid propulsion control system for a trimaran vessel using fuzzy logic. The system integrates a Brushless DC (BLDC) motor and an internal combustion engine, controlled by STM32 and ESP32 microcontrollers, with sensors for speed and current monitoring. The fuzzy logic algorithm was developed with two input variables—speed error and delta error—and one output variable for motor control. Experimental testing was conducted on a trimaran prototype in river conditions to evaluate system performance. The results show that, without fuzzy logic, the vessel's speed fluctuated significantly, deviating from the reference set point. In contrast, with fuzzy logic control, the vessel maintained a more stable speed, achieving an average error of less than 5%. This demonstrates that fuzzy logic can effectively address the non-linear characteristics of hybrid propulsion systems, providing adaptive control that enhances speed stability and energy efficiency.

Keywords: *fuzzy logic, hybrid propulsion, speed control, trimaran vessel*

Abstrak

Penelitian ini membahas perancangan dan implementasi sistem kontrol propulsi hibrida pada kapal trimaran menggunakan *fuzzy logic*. Sistem propulsi mengombinasikan motor *Brushless DC* (BLDC) dan mesin pembakaran dalam yang dikendalikan oleh mikrokontroler STM32 dan ESP32 dengan dukungan sensor kecepatan dan arus. Algoritma *fuzzy logic* dirancang dengan dua variabel input, yaitu *error* kecepatan dan *delta error*, serta satu variabel *output* berupa sinyal kendali motor. Pengujian dilakukan pada prototipe kapal trimaran di perairan sungai untuk mengevaluasi kinerja sistem. Hasil pengujian menunjukkan bahwa tanpa *fuzzy logic* kecepatan kapal berfluktuasi signifikan dan menyimpang dari set *point* referensi. Sebaliknya, dengan kontrol *fuzzy logic*, kecepatan kapal lebih stabil dengan rata-rata *error* kurang dari 5%. Temuan ini membuktikan bahwa *fuzzy logic* mampu mengatasi karakteristik *non-linear* sistem propulsi hibrida serta memberikan pengendalian adaptif yang meningkatkan stabilitas kecepatan dan efisiensi energi.

Katakunci: *fuzzy logic, propulsi hibrida, kontrol kecepatan, kapal trimaran*

I. PENDAHULUAN

Indonesia sebagai negara maritim dengan ribuan pulau sangat bergantung pada transportasi laut untuk mendukung konektivitas antarwilayah [1]. Namun demikian, sebagian besar kapal yang beroperasi masih menggunakan sistem propulsi konvensional berbasis mesin diesel yang memiliki kelemahan signifikan berupa konsumsi bahan bakar yang tinggi dan emisi gas buang yang berkontribusi pada pencemaran udara serta perubahan iklim global [2]. Upaya pengembangan teknologi yang lebih ramah lingkungan kemudian mengarah pada pemanfaatan sistem propulsi hibrida, yaitu kombinasi antara motor listrik dan mesin pembakaran dalam, yang mampu meningkatkan efisiensi energi sekaligus menurunkan emisi [3]. Meskipun demikian, integrasi dua sumber tenaga tersebut menimbulkan kompleksitas dalam pengaturan distribusi daya serta pengendalian kecepatan kapal, mengingat sistem bersifat non-linear dan harus beroperasi pada kondisi dinamis.

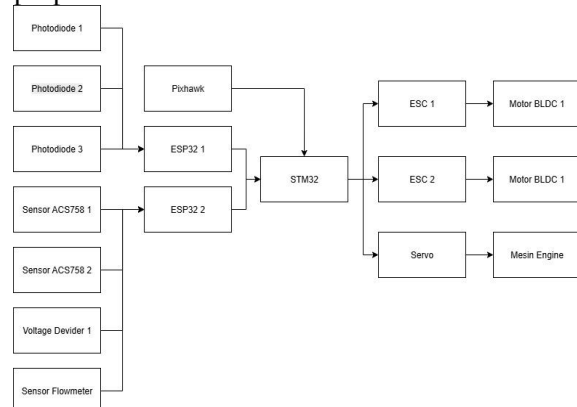
Dalam kontrol, metode klasik seperti PID banyak digunakan, tetapi memiliki keterbatasan saat diterapkan pada sistem non-linear dengan ketidakpastian yang tinggi [4]. Sebaliknya, pendekatan berbasis *fuzzy logic* menawarkan solusi yang lebih fleksibel karena dapat mengolah informasi dengan aturan linguistik dan tidak bergantung pada model matematis yang presisi [5, 7]. Pendekatan ini terbukti efektif pada berbagai aplikasi kontrol, termasuk dalam pengelolaan energi pada sistem propulsi maritim. Misalnya, Zhu et al. [8] mengembangkan strategi manajemen energi berbasis *fuzzy* untuk kapal bertenaga *fuel cell* yang mampu menstabilkan beban dinamis. Penelitian lain oleh Guler et al. [9] menunjukkan bahwa *fuzzy logic* dapat digunakan untuk mendistribusikan daya antara mesin diesel dan baterai secara lebih adaptif. Lebih lanjut, Nivolianiti et al. [10] membuktikan bahwa strategi *fuzzy logic* mampu mengoptimalkan distribusi energi pada kapal hibrida sehingga meningkatkan efisiensi keseluruhan sistem.

Walaupun berbagai studi telah menegaskan potensi *fuzzy logic* dalam manajemen energi dan kontrol propulsi, sebagian besar penelitian masih terbatas pada simulasi berbasis perangkat lunak seperti MATLAB/Simulink dan jarang diaplikasikan pada prototipe kapal nyata [10-14]. Selain itu, fokus penelitian yang sudah ada hanya pada sistem propulsi tunggal, baik motor

listrik atau mesin diesel [11-17], sementara observasi yang secara komprehensif mengintegrasikan propulsi hibrida dengan kontrol *fuzzy logic* pada kapal trimaran masih sangat terbatas. Di samping itu, belum banyak penelitian yang secara kuantitatif membandingkan kinerja kapal dengan dan tanpa penerapan *fuzzy logic* dalam konteks kestabilan kecepatan dan efisiensi energi. Dengan demikian, penelitian ini dirancang untuk mengisi kekosongan tersebut melalui perancangan dan implementasi sistem kontrol berbasis *fuzzy logic* pada prototipe kapal trimaran berpropulsi hibrida, serta melakukan pengujian nyata untuk mengevaluasi performa sistem baik dari sisi stabilitas kecepatan maupun efisiensi penggunaan energi.

II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini diawali dengan tahap perancangan sistem propulsi hibrida pada prototipe kapal trimaran yang terdiri atas dua sumber tenaga utama, yaitu motor listrik jenis *Brushless DC* (BLDC) dan mesin pembakaran dalam. Kedua sumber tenaga tersebut diintegrasikan melalui unit kendali berbasis mikrokontroler dan sistem logika *fuzzy*. Arsitektur keseluruhan sistem ditunjukkan pada Gambar 1 Blok Diagram Sistem, yang berfungsi untuk memperlihatkan aliran informasi dan interaksi antar komponen dalam sistem kontrol propulsi hibrida.



Gambar 1. Blok Perancangan Sistem

Pada blok diagram tersebut ditunjukkan bahwa sensor *photodiode* digunakan untuk membaca putaran poros motor (RPM) sebagai masukan utama sistem, sedangkan sensor arus ACS758 berfungsi untuk memantau konsumsi daya listrik dari motor BLDC [18, 19]. Data dari sensor kemudian dikirim menuju mikrokontroler STM32 dan ESP32, yang

berperan sebagai unit pengolah utama [20]. Informasi yang diperoleh diproses menggunakan algoritma *fuzzy logic* yang telah dirancang sebelumnya dengan variabel input berupa *error* kecepatan dan perubahan *error*, serta variabel *output* berupa sinyal kendali ke motor melalui *Electronic Speed Controller* (ESC).

Fuzzy logic pada sistem ini dibangun dengan fungsi keanggotaan (*membership function*) yang merepresentasikan kondisi kecepatan kapal dalam lima level linguistik, misalnya “sangat lambat”, “lambat”, “sedang”, “cepat”, dan “sangat cepat”. Aturan (*rule base*) berbentuk kaidah IF–THEN dirumuskan untuk menentukan aksi pengendalian yang sesuai terhadap perubahan kecepatan kapal. Dengan demikian, *fuzzy logic* memungkinkan sistem untuk merespons perubahan kondisi operasi tanpa memerlukan model matematis yang presisi.

Unit kontrol kemudian mengirimkan sinyal kendali ke aktuator berupa motor BLDC, sementara mesin pembakaran dalam berfungsi sebagai tenaga cadangan untuk menjaga kestabilan operasi pada kondisi beban tinggi. Integrasi antara kedua sumber energi ini memungkinkan sistem propulsi bekerja dalam mode hibrida, yang dapat meningkatkan efisiensi konsumsi bahan bakar sekaligus menjaga kestabilan kecepatan kapal pada berbagai kondisi operasi.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Perancangan sistem kontrol propulsi hibrida kapal trimaran berbasis *fuzzy logic* diawali dengan penentuan *membership function* dan *rule base* yang menjadi inti dari algoritma pengendalian. Kedua aspek ini berfungsi untuk menerjemahkan informasi kecepatan aktual kapal menjadi sinyal kendali yang sesuai, sehingga kapal dapat mempertahankan kecepatan stabil meskipun menghadapi variasi beban maupun kondisi lingkungan yang dinamis.

Tabel 1 menampilkan *membership function* yang dirancang untuk variabel *input error* kecepatan dan *delta error*, serta variabel *output* berupa sinyal kendali motor. Masing-masing variabel dibagi menjadi lima kategori linguistik, mulai dari “sangat rendah” hingga “sangat tinggi”. Desain ini memungkinkan sistem untuk merepresentasikan kondisi operasional kapal

secara lebih halus (*fine-grained*) dibandingkan metode linier seperti kontrol PID.

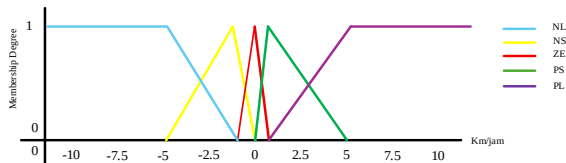
Tabel 1. *Membership Function Fuzzy Logic*

Variabel Linguistik	Simbol	Range	Tipe Kurva	Parameter
Negative Large	NL	≤ -1.0	Trapezo id	$(-\infty, -\infty, -5.0, -1.0)$
Negative Small	NS	-5.0 to 0.0	Triangl e	$(-5.0, -1.0, 0.0)$
Zero	ZE	-1.0 to $+1.0$	Triangl e	$(-1.0, 0.0, +1.0)$
Positive Small	PS	0.0 to $+5.0$	Triangl e	$(0.0, +1.0, +5.0)$
Positive Large	PL	$\geq +1.0$	Trapezo id	$(+1.0, +5.0, +\infty, +\infty)$

Ketika kapal mengalami deviasi kecil dari kecepatan referensi, *membership function* akan memetakan kondisi ini sebagai “rendah”, sehingga sistem hanya memberikan penyesuaian kecil pada sinyal kendali. Sebaliknya, jika deviasi besar, fungsi keanggotaan akan mengklasifikasikannya sebagai “tinggi” atau “sangat tinggi”, yang memicu penyesuaian lebih agresif. Dengan demikian, *membership function* berperan sebagai jembatan antara data sensor yang bersifat numerik dengan mekanisme pengambilan keputusan berbasis linguistik.

Membership function kemudian dipadukan dalam *rule base*, yaitu seperangkat aturan IF–THEN yang ditunjukkan pada Gambar 2. Sebagai contoh, aturan “IF *error* besar AND *delta error* positif THEN kurangi sinyal kendali” memungkinkan sistem untuk secara adaptif menurunkan daya motor saat kapal melaju lebih cepat dari kecepatan referensi. Aturan lain, seperti “IF *error* kecil AND *delta error* negatif THEN tambahkan sinyal kendali”, memastikan kapal tetap stabil ketika kecepatannya menurun akibat hambatan lingkungan.

Keunggulan *rule base* terletak pada fleksibilitasnya: aturan-aturan tersebut dapat disusun berdasarkan pengalaman empiris maupun simulasi awal, tanpa perlu menurunkan persamaan matematis kompleks dari dinamika kapal. Dalam konteks sistem non-linear seperti propulsi hibrida, kelebihan ini menjadi sangat penting karena model matematis seringkali tidak mampu merepresentasikan ketidakpastian akibat arus laut, angin, atau beban tambahan.



Gambar 2. Rule Base Fuzzy Logic yang digunakan dalam Sistem Kontrol Propulsi Hibrida

Desain *fuzzy logic* kemudian diimplementasikan pada prototipe kapal trimaran skala laboratorium sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 3. Kapal dilengkapi dengan motor BLDC, mesin diesel, sensor RPM, sensor arus ACS758, serta unit mikrokontroler STM32 dan ESP32 yang mengolah algoritma *fuzzy logic*. Prototipe ini berfungsi sebagai *platform* nyata untuk menguji efektivitas sistem, sehingga penelitian tidak hanya berhenti pada tingkat simulasi perangkat lunak.

Pengujian dilakukan pada perairan sungai dengan arus sedang, yang merepresentasikan kondisi operasi kapal skala kecil. Hal ini penting karena faktor lingkungan seperti arus dan gelombang dapat menjadi gangguan signifikan terhadap kestabilan kecepatan. Keberhasilan sistem pada prototipe menunjukkan potensi penerapannya pada skala kapal yang lebih besar.

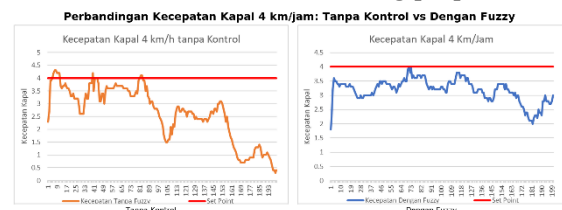


Gambar 3. Prototipe Kapal Trimaran dengan Sistem Propulsi Hibrida

Kinerja sistem kemudian diuji dengan membandingkan dua kondisi: tanpa kontrol *fuzzy logic* dan dengan kontrol *fuzzy logic*. Hasil pengujian yang ditampilkan pada Gambar 4 menunjukkan perbedaan signifikan. Pada kondisi tanpa kontrol, kecepatan kapal berfluktuasi secara tajam dengan deviasi yang besar dari nilai referensi. Kondisi ini dapat mengganggu efisiensi energi, karena motor

bekerja dengan intensitas yang tidak stabil, serta menurunkan kenyamanan operasional.

Sebaliknya, pada kondisi dengan kontrol *fuzzy logic*, kecepatan kapal lebih stabil dengan rata-rata *error* di bawah 5%. Hal ini menunjukkan bahwa sistem mampu melakukan penyesuaian adaptif terhadap perubahan kondisi, menjaga kecepatan kapal tetap mendekati referensi meskipun terdapat gangguan eksternal. Stabilitas ini tidak hanya penting dari segi kenyamanan, tetapi juga meningkatkan efisiensi penggunaan bahan bakar pada mesin diesel, karena motor listrik bekerja lebih konsisten dalam mendukung propulsi.



Gambar 4. Perbandingan Kecepatan Kapal dengan dan Tanpa Fuzzy Logic

Hasil yang diperoleh memperlihatkan bahwa *fuzzy logic* mampu mengatasi keterbatasan metode kontrol klasik seperti PID yang cenderung kurang efektif pada sistem non-linear. Dengan memanfaatkan *membership function* dan *rule base*, sistem dapat merespons perubahan kecepatan secara *real-time* dengan tindakan yang lebih halus namun tepat sasaran. Implementasi pada prototipe nyata juga memperkuat validitas hasil, karena sistem diuji dalam kondisi perairan dengan gangguan riil, bukan hanya pada simulasi terkontrol.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa *fuzzy logic* mampu meningkatkan kinerja sistem kontrol propulsi hibrida pada kapal trimaran. Dengan memanfaatkan *membership function* dan *rule base* yang dirancang, sistem berhasil mengatur distribusi daya secara adaptif sehingga kecepatan kapal dapat dipertahankan mendekati nilai referensi. Hasil pengujian memperlihatkan bahwa penggunaan *fuzzy logic* menghasilkan kestabilan kecepatan dengan rata-rata *error* kurang dari 5%, jauh lebih baik dibandingkan kondisi tanpa kontrol. Selain meningkatkan stabilitas, penerapan *fuzzy logic* juga berkontribusi pada efisiensi energi karena beban mesin diesel dapat dioptimalkan oleh motor listrik. Penelitian ini sekaligus menegaskan

bahwa *fuzzy logic* dapat diterapkan secara nyata pada prototipe kapal, bukan hanya sebatas simulasi. Dengan demikian, kontribusi penelitian ini terletak pada bukti empiris implementasi kontrol berbasis *fuzzy logic* pada kapal trimaran berpropulsi hibrida. Untuk penelitian selanjutnya, sistem ini dapat dikembangkan dengan integrasi metode kecerdasan buatan adaptif lain seperti *machine learning* atau penerapan sistem *monitoring* berbasis IoT untuk memperluas fungsionalitas dan meningkatkan keandalan dalam skala operasional yang lebih besar.

V. REFERENSI

- [1] Ronaldy Lovina, "KAJIAN KONEKTIFITAS ANTAR PULAU DI WILAYAH KEPULAUAN RIAU," Jurnal Potensi, vol. 2, no. 2, Sep. 2022, doi: 10.37776/jpot.v2i2.1013.
- [2] Z. Tan, Q. Tan, and M. Rong, "Analysis on the financing status of PV industry in China and the ways of improvement," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 93, pp. 409–420, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.05.036.
- [3] P. Li, H. Xie, F. Liu, P. Yu, and X. Liu, "Numerical approach for predicting the slamming loads in oblique long waves considering the wave-body interface," Ocean Engineering, vol. 262, p. 112089, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.oceaneng.2022.112089.
- [4] R. P. Borase, D. K. Maghade, S. Y. Sondkar, and S. N. Pawar, "A review of PID control, tuning methods and applications," Int J Dyn Control, vol. 9, no. 2, pp. 818–827, Jun. 2021, doi: 10.1007/s40435-020-00665-4.
- [5] I. Nica, C. Delcea, and N. Chiriță, "Mathematical Patterns in Fuzzy Logic and Artificial Intelligence for Financial Analysis: A Bibliometric Study," Mathematics, vol. 12, no. 5, p. 782, Mar. 2024, doi: 10.3390/math12050782.
- [6] H. H. Tang and N. S. Ahmad, "Fuzzy logic approach for controlling uncertain and nonlinear systems: a comprehensive review of applications and advances," Systems Science & Control Engineering, vol. 12, no. 1, Dec. 2024, doi: 10.1080/21642583.2024.2394429.
- [7] A. Peralta, J. A. Olivas, and P. Navarro-Illana, "A Fuzzy Logic Framework for Text-Based Incident Prioritization: Mathematical Modeling and Case Study Evaluation," Mathematics, vol. 13, no. 12, p. 2014, Jun. 2025, doi: 10.3390/math13122014.
- [8] L. Zhu, J. Han, D. Peng, T. Wang, T. Tang, and J.-F. Charpentier, "Fuzzy logic based energy management strategy for a fuel cell/battery/ultra-capacitor hybrid ship," in 2014 First International Conference on Green Energy ICGE 2014, IEEE, Mar. 2014, pp. 107–112.
- [9] N. Guler, Z. M. Ismail, Z. Ben Hazem, and N. Naik, "Adaptive Fuzzy Logic Controller-Based Intelligent Energy Management System Scheme for Hybrid Electric Vehicles," IEEE Access, vol. 12, pp. 173441–173454, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3496897.
- [10] E. Nivolianiti, Y. L. Karnavas, and J.-F. Charpentier, "Fuzzy Logic-Based Energy Management Strategy for Hybrid Fuel Cell Electric Ship Power and Propulsion System," J Mar Sci Eng, vol. 12, no. 10, p. 1813, Oct. 2024, doi: 10.3390/jmse12101813.
- [11] H. Sutanto, I. Sutrisno, P. J. M. Senda, A. S. Pang, and A. W. B. Santosa, "Development of a fuzzy control system for optimizing fuel consumption on ship main propulsion engines," Edelweiss Applied Science and Technology, vol. 9, no. 5, pp. 489–500, May 2025.
- [12] Y. Ge, J. Zhang, K. Zhou, J. Zhu, and Y. Wang, "Research on Energy Management for Ship Hybrid Power System Based on Adaptive Equivalent Consumption Minimization Strategy," J Mar Sci Eng, vol. 11, no. 7, p. 1271, Jun. 2023, doi: 10.3390/jmse11071271.
- [13] M. Xie, Y. Guo, B. Han, and Y. Li, "Energy management strategy of hydrogen-powered ship based on real-time wavelet-fuzzy control," in 2024 6th International Conference on Energy, Power and Grid (ICEPG), IEEE, Sep. 2024, pp. 27–32.
- [14] L. Zhu, J. Han, D. Peng, T. Wang, T. Tang, and J.-F. Charpentier, "Fuzzy logic based energy management

- strategy for a fuel cell/battery/ultra-capacitor hybrid ship,” in 2014 First International Conference on Green Energy ICGE 2014, IEEE, Mar. 2014, pp. 107–112.
- [15] A.-D. Maimon, “On the electric propulsion of river ships,” *Analele Universității “Dunărea de Jos” din Galați. Fascicula XI, Construcții navale/Annals of “Dunărea de Jos” of Galati, Fascicle XI, Shipbuilding*, vol. 47, pp. 143–149, Dec. 2024, doi: 10.35219/AnnUgalShipBuilding/2024.47.17.
- [16] D.-R. Hur and D.-R. Shin, “Design of High-Efficiency and High-Torque Multiphase Motor with Electric Propulsion System for Small Vessels for Energy Saving,” *Korea Industrial Technology Convergence Society*, vol. 29, no. 4, pp. 29–37, Dec. 2024.
- [17] H. Chen, “WITHDRAWN: Simulation Research on Ship Electric Propulsion Speed Regulation System Based on Variable Structure Control and FPGA,” *Microprocess Microsyst*, p. 103588, Dec. 2020.
- [18] A. Sharma, S. Pal, P. Mahalle, B. A. Botre, and S. A. Akbar, “The development of current, speed and torque measurement system for low power electric vehicle motion control applications,” 2021, p. 100004.
- [19] I. Anshory, I. Robandi, and W. Wirawan, “Parameters identification BLDC motor: Instrumentations and transfer functions,” *MATEC Web of Conferences*, vol. 197, p. 11012, Sep. 2018.
- [20] T. Hadi Saputro, F. Faizah, and Lady Silk Moonlight, “DESIGN OF CONTROL AND MONITORING OF BRUSHLESS DIRECT CURRENT (BLDC) MOTOR ON CONVEYOR USING BLUETOOTH BASED ON STM 32,” *Proceeding of International Conference of Advance Transportation, Engineering, and Applied Social Science*, vol. 2, no. 1, pp. 954–961, Nov. 2023.