



Perancangan Sistem Kontrol Kecepatan Kapal dengan Sistem Propulsi Hibrida berbasis *Neural Network Method*

Figgo Cahyo Prasajo¹, Edi Kurniawan^{2*}, Eka Nurmala Sari Agustina³

¹⁻³Program Studi Teknologi Rekayasa Kelistrikan Kapal, Politeknik Pelayaran Surabaya, Indonesia

*Penulis Korespondensi: edi.kurniawan@polteknikpel-sby.ac.id

Abstract. *The increasing number of fossil fuel-powered vessels in Indonesia poses serious challenges related to energy efficiency and exhaust emissions. This study aims to design and implement a hybrid propulsion ship speed control system based on the Neural Network (NN) method to improve fuel efficiency, speed stability, and system safety. The system was developed on a trimaran ship prototype that combines a Brushless Directional Current electric motor and an Internal Combustion Engine (ICE). The Neural Network method is designed with a 5-8-3 architecture as an adaptive controller, processing actual speed and RPM inputs to generate real-time motor control signals. Tests were conducted statically and dynamically at five speed set points under current conditions of ± 0.57 m/s and waves of 2–15 cm. The test results showed that the application of Neural Network control improved speed stability, with a deviation of < 0.5 km/h at the low set point, and significantly reduced RPM fluctuations. Fuel efficiency also improved, especially at high speeds; the increase in consumption was only ± 3.42 ml with control compared to ± 43.6 ml without control. In addition, the system is equipped with overcurrent protection that effectively prevents component damage, as proven after initial trial incidents. Overall, the results of this study demonstrate that the integration of Neural Network methods into hybrid propulsion systems has great potential for the development of energy-efficient, stable, and environmentally friendly smart ships.*

Keywords: *BLDC Motor, Hybrid Propulsion, Neural Network, Speed Control, Trimaran Ship*

Abstrak. Peningkatan jumlah kapal berbahan bakar fosil di Indonesia menimbulkan tantangan serius terkait efisiensi energi dan emisi gas buang. Penelitian ini bertujuan merancang dan mengimplementasikan sistem kontrol kecepatan kapal dengan propulsi hibrida berbasis metode *Neural Network* (NN) untuk meningkatkan efisiensi bahan bakar, stabilitas kecepatan, dan keselamatan sistem. Sistem dikembangkan pada prototipe kapal trimaran yang menggabungkan motor listrik *Brushless Directional Current* dan *Internal Combustion Engine* (ICE). Metode dengan *Neural Network* dirancang dengan arsitektur 5-8-3 sebagai pengendali adaptif, memproses input kecepatan aktual dan RPM untuk menghasilkan sinyal kendali motor secara *real-time*. Pengujian dilakukan secara statis dan dinamis pada lima *set point* kecepatan dalam kondisi arus $\pm 0,57$ m/s dan ombak setinggi 2–15 cm. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penerapan kontrol *Neural Network* meningkatkan stabilitas kecepatan, dengan deviasi $< 0,5$ km/jm pada *set point* rendah, serta mengurangi fluktuasi RPM secara signifikan. Efisiensi bahan bakar juga meningkat, khususnya pada kecepatan tinggi; kenaikan konsumsi hanya $\pm 3,42$ ml dengan kontrol dibandingkan $\pm 43,6$ ml tanpa kontrol. Selain itu, sistem dilengkapi proteksi *overcurrent* yang efektif mencegah kerusakan komponen, terbukti setelah insiden percobaan awal. Secara keseluruhan, hasil penelitian ini membuktikan bahwa integrasi metode *Neural Network* dalam sistem propulsi hibrida berpotensi besar untuk pengembangan kapal cerdas yang hemat energi, stabil, dan ramah lingkungan.

Kata kunci: Kapal Trimaran, Kontrol Kecepatan, Motor BLDC, Neural Network, Propulsi Hibrida

1. LATAR BELAKANG

Pelayaran merupakan kegiatan yang berada pada sektor laut, kegiatan ini sangat berpengaruh terhadap perekonomian dunia. Selain itu, pelayaran juga bertujuan untuk rekreasi, penelitian, ataupun militer. Kapal merupakan moda transportasi yang bekerja di lingkungan pelayaran.

Kapal yang ada di Indonesia sebagian besar masih berbahan bakar fosil. Karena minyak bumi adalah bahan bakar yang tidak bisa diperbaharui maka kita harus memikirkan bahan penggantinya (Pustaka, 2014). Sedangkan jumlah kapal yang semakin bertambah

menyebabkan kelangkaan bahan bakar dan tingginya jumlah emisi gas buang yang dihasilkan dari kapal (H. Saputra et al., 2018).

Dengan adanya permasalahan tersebut, inovasi dari sistem propulsi bisa menjadikan solusi dari kelangkaan bahan bakar dan pencemaran lingkungan yang dihasilkan oleh emisi gas buang. Salah satu inovasi sistem propulsi yang dapat digunakan sebagai penggerak kapal adalah sistem propulsi hibrida (Kurniawan et al., 2024). Dengan sistem propulsi hibrida ini konsumsi bahan bakar dapat diminimalkan dengan menggunakan sistem penggerak hibrida yang menggabungkan sistem penggerak mekanis dan sistem penggerak listrik (Muhammad et al., 2019).

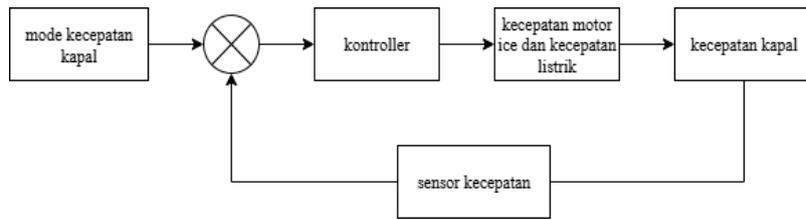
Untuk mengatur sistem propulsi tersebut, maka dibutuhkan suatu sistem kontrol yang dapat memudahkan pengendalian kestabilan kecepatan kapal. Maka dari itu, sistem kontrol propulsi yang memiliki kemampuan untuk berfungsi secara stabil menjadi salah satu ide yang menarik untuk diteliti. Keadaan kapal yang bersifat non-linear yang disebabkan oleh naik turunnya gelombang dan kecepatan angin laut menjadikan salah satu sistem kontrol yang memiliki keunggulan dalam mengolah data yang bersifat non linear dan memiliki jumlah data yang banyak adalah Neural network (Azmi et al., 2020).

Penelitian ini dilakukan untuk membuat pengendalian kecepatan sistem propulsi hibrida kapal berbasis *neural network*. Sehingga nantinya diharapkan sistem kontrol propulsi hibrida berbasis *neural network* tersebut mampu mengontrol kestabilan kecepatan kapal dengan menggunakan salah satu atau kombinasi dari motor diesel dan motor BLDC (Azmi et al., 2020). Kapal yang digunakan pada penelitian ini adalah kapal jenis trimaran yang dari segi desain mendukung untuk sistem mesin propulsi hibrida. Dengan landasan teori dari sebelum sebelumnya sebagai peneliti ingin mengangkat judul *Perancangan Sistem Kontrol Kecepatan Kapal Dengan Sistem Propulsi hibrida Berbasis Neural network Method*.

2. METODE PENELITIAN

Peneliti menggunakan metode penelitian eksperimen untuk bertujuan menghasilkan alat yang dapat diujikan. Metode eksperimen bertujuan untuk meneliti hubungan sebab-akibat dengan cara memanipulasikan satu atau beberapa variable dalam sebuah kelompok eksperimen kemudian membandingkan hasilnya dengan kelompok kontrol yang merupakan kelompok tanpa perlakuan (Aulia, 2022).

Perancangan Sistem

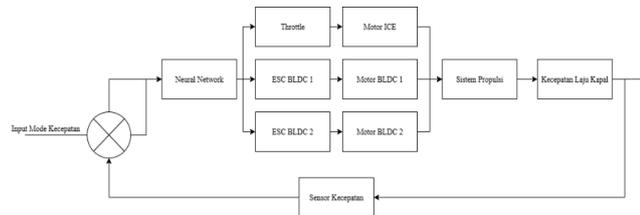


Gambar 1. blok diagram Perancangan Sistem

Pada blok diagram diatas, dijelaskan bahwa alur awal yang dilakukan adalah memilih mode kecepatan yang diinginkan atau bisa disebut *set point*. Setelah menentukan mode kecepatan yang diinginkan kontroler sebagai penerima target kecepatan kapal memproses apa yang sudah diterima.

Perancangan Alat

Blok Diagram Perancangan Alat

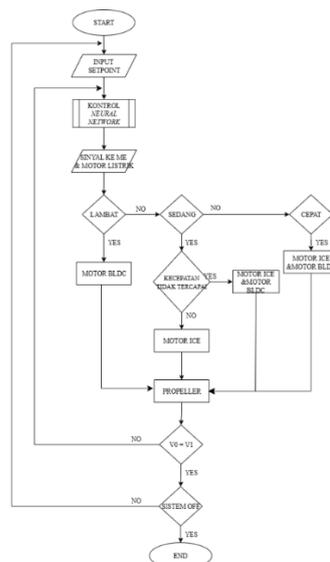


Sumber: Dokumen Pribadi

Gambar 1. Blok Diagram Perancangan Alat

Gambar 2 menjelaskan tentang alur diagram perancangan alat, tiap tiap komponen mempunyai peran dan fungsi masing masing.

a. Flowchart

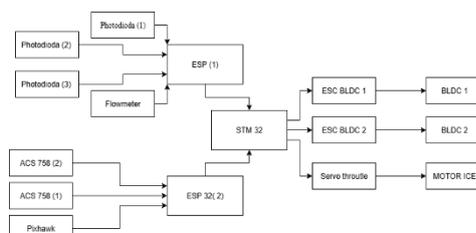


Sumber: Dokumen Pribadi

Gambar 3. Flowchart

Untuk menunjang sistem kontrol kecepatan kapal yang adaptif dan efisien, digunakan metode *Neural Network* (NN) sebagai sistem pengolah utama dalam merespons kondisi kecepatan aktual terhadap target yang telah ditentukan. NN ini diimplementasikan secara tertanam (*embedded*) ke dalam mikrokontroler STM32 dan bekerja secara *real-time*.

b. Blok Diagram Alat



Sumber: Dokumen Pribadi

Gambar 2. Blok Diagram Alat

Sistem kontrol propulsi hibrida yang ditunjukkan pada diagram dirancang untuk mengelola kecepatan kapal trimaran secara adaptif dengan memanfaatkan berbagai sensor, mikrokontroler, dan aktuator. Pusat dari sistem ini adalah mikrokontroler STM32, yang berperan sebagai otak pengendali utama. Semua sinyal dari sensor dan perintah ke aktuator diproses dan dikendalikan oleh STM32 secara *real-time*.

Untuk mendeteksi kecepatan rotasi motor, sistem menggunakan tiga sensor *photodiode* yang ditempatkan secara strategis. Sensor-sensor ini memberikan informasi akurat mengenai RPM dari motor BLDC maupun Mesin ICE. Selain itu, terdapat dua sensor arus ACS758 yang digunakan untuk membaca arus yang mengalir ke motor BLDC, sehingga sistem dapat menilai beban kerja motor dan menganalisis efisiensi penggunaan daya listrik.

Rencana Pengujian

Perancangan alat pastinya akan lebih matang dengan adanya pengujian dari alat yang dibangun. Rencana pengujian adalah salah satu cara untuk menemukan titik titik permasalahan. Untuk menemukan permasalahan alat ini penelitimenggunakan metode metode pengujian yang diantaranya adalah metode pengujian statis dan pengujian dinamis.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Pengujian Statis

Pengujian statis dilakukan terhadap berbagai komponen utama sistem propulsi hibrida untuk memastikan bahwa setiap unit dapat beroperasi secara individual dengan benar sebelum diintegrasikan ke dalam sistem kendali kapal. Komponen-komponen yang diuji meliputi mikrokontroler (STM32 dan ESP32), motor penggerak (BLDC dan ICE Zenoah), pengendali daya (ESC), serta sejumlah sensor utama (ACS758, voltage divider, dan photodiode IR). Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilaporkan, seluruh komponen menunjukkan performa yang sesuai dengan spesifikasi fungsional masing-masing.

Pengujian terhadap mikrokontroler STM32 membuktikan bahwa unit ini mampu mengeksekusi perintah digital dasar dengan stabil. LED yang terhubung ke pin PA5 berhasil menyala dan mati secara periodik sesuai program blink yang diunggah, menandakan bahwa sistem output digital berfungsi optimal. Meskipun pengujian hanya mencakup logika output, hal ini sudah cukup sebagai indikator bahwa STM32 layak dijadikan sebagai pusat pengendali sistem.

Modul ESP32, yang berfungsi sebagai komponen komunikasi dan pemrosesan tambahan, diuji melalui transmisi data serial. Hasilnya menunjukkan bahwa ESP32 mampu mengirim dan menerima data tanpa error, yang membuktikan kestabilan koneksi serta kesesuaian untuk diintegrasikan dalam sistem monitoring atau komunikasi antar module.

Motor ICE Zenoah sebagai penggerak utama dalam mode engine only dan hybrid menunjukkan kinerja yang baik. Pengujian menunjukkan bahwa mesin dapat menyala stabil pada kecepatan idle (1.200 RPM) hingga mencapai batas maksimum sekitar 10.000 RPM. Ini menandakan bahwa mesin mampu menghasilkan tenaga dorong yang diperlukan dalam berbagai skenario operasi kapal.

Motor BLDC diuji dengan berbagai nilai PWM dan menunjukkan respons kecepatan yang linier dan akurat, dengan error selalu di bawah 0,5%. Deviasi RPM juga sangat kecil (± 20 RPM), membuktikan bahwa motor ini sangat responsif terhadap sinyal kendali, dan layak dijadikan penggerak bantu dalam sistem hybrid. Selaras dengan itu, ESC 100A yang digunakan untuk mengatur BLDC juga berhasil merespons perubahan PWM secara cepat dan stabil, menegaskan kompatibilitas antara driver dan motor.

Sensor arus ACS758 menunjukkan tingkat akurasi yang cukup tinggi, dengan error berkisar antara 0,42% hingga 4,40%. Meskipun terdapat sedikit deviasi pada pembacaan arus rendah, sensor mampu memberikan hasil yang akurat dan konsisten terutama pada beban menengah

hingga tinggi. Ini sangat penting untuk monitoring arus dalam aplikasi real-time yang membutuhkan stabilitas pembacaan.

Sensor voltage divider yang digunakan untuk memantau tegangan input 12V juga menunjukkan akurasi yang baik, dengan error hanya sekitar 1,2–1,5%. Kesamaan hasil antara nilai pada LCD dan AVO meter menandakan bahwa pembacaan tegangan dari sistem dapat diandalkan dan layak digunakan sebagai referensi tegangan dalam sistem.

Terakhir, sensor photodiode IR yang digunakan untuk mendeteksi kecepatan rotasi (RPM) motor memberikan hasil pembacaan yang sangat akurat. Error antara nilai pembacaan sensor dengan tachometer hanya berkisar antara 0,04% hingga 0,16%. Akurasi tinggi ini penting untuk menjamin kestabilan sistem kendali kecepatan, terutama pada pengujian dinamis saat sensor ini menjadi elemen feedback utama.

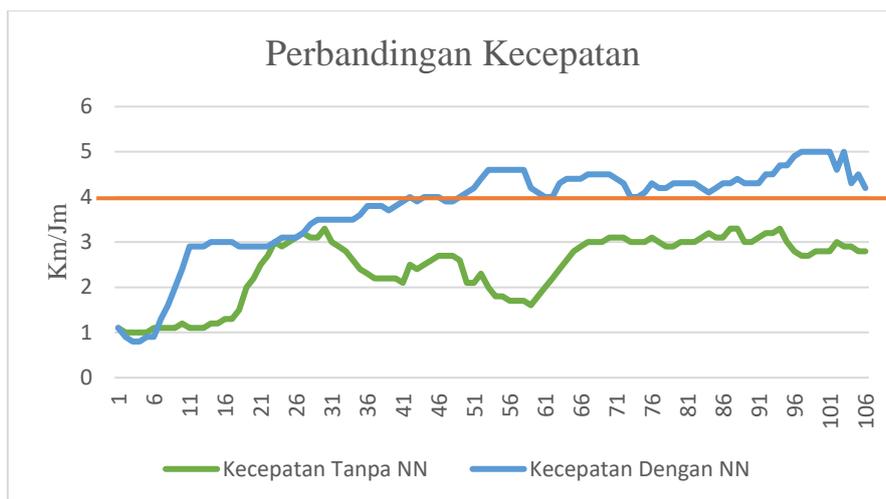
Secara keseluruhan, hasil pengujian statis menunjukkan bahwa semua komponen inti dari sistem propulsi hibrida telah memenuhi standar fungsional dan teknis untuk digunakan pada tahap pengujian dinamis. Kinerja mikrokontroler, aktuator, serta sensor-sensor pendukung menunjukkan stabilitas, keakuratan, dan responsivitas yang dibutuhkan dalam sistem kontrol kecepatan kapal berbasis neural network. Oleh karena itu, seluruh komponen telah dinyatakan layak untuk diintegrasikan ke dalam sistem kontrol kapal trimaran guna pengujian lebih lanjut dalam kondisi dinamis.

Analisis Pengujian Dinamis

Subbab ini menyajikan perbandingan performa sistem kontrol kecepatan kapal pada lima set point utama: 4 km/jm, 5 km/jm, 7 km/jm, 9 km/jm, dan 11km/jm. Setiap set point diuji pada dua kondisi operasional, yaitu dengan dan tanpa penerapan kontrol berbasis neural network. Parameter yang dibandingkan meliputi kecepatan aktual kapal, RPM motor BLDC atau engine, konsumsi arus atau bahan bakar, serta tegangan motor. Pengujian dilakukan pada lokasi dan kondisi lingkungan yang serupa untuk memastikan konsistensi pengamatan. Perbandingan dilakukan dengan fokus pada fase steady state, yaitu saat sistem telah mencapai kestabilan kecepatan, guna memperoleh gambaran kinerja sistem dalam mempertahankan set point secara berkelanjutan.

Analisis Data Perbandingan Pengujian Set Point 4km/jm

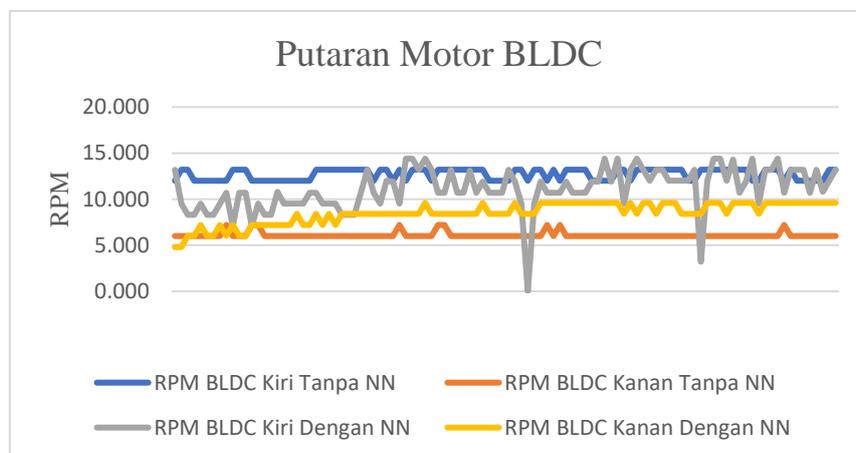
Pengujian ini bertujuan untuk membandingkan performa sistem kapal dalam mencapai kecepatan target 4 km/jm, baik dalam kondisi tanpa kontrol maupun dengan kontrol berbasis neural network. Evaluasi dilakukan dengan membandingkan kecepatan aktual serta performa putaran motor (RPM BLDC Kiri dan RPM BLDC Kanan) sebagai indikator kestabilan dan efektivitas sistem.



Sumber: Dokumen Pribadi

Gambar 5. Grafik Perbandingan Kecepatan Tanpa dan Dengan Kontrol Pada 4km/jm

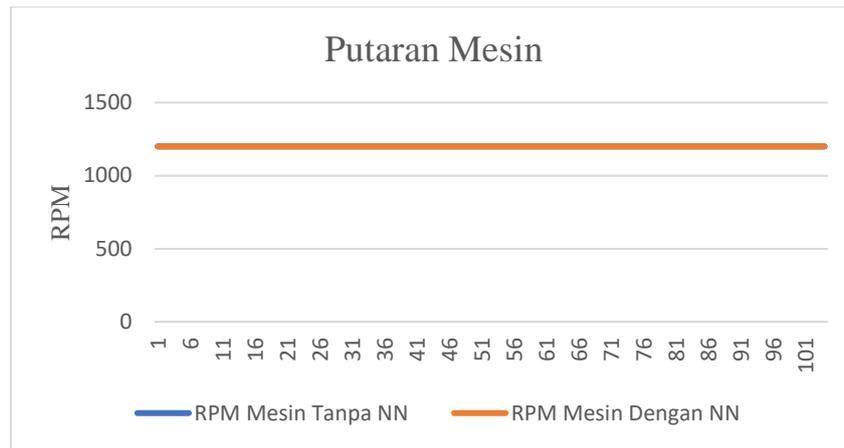
Pada set point 4 km/jm, performa kecepatan aktual kapal tanpa kontrol menunjukkan rentang 2,1–3,3 km/jm, dengan rata-rata 2,81 km/jm dan deviasi sekitar 0,35 km/jm. Sementara, pada kondisi dengan kontrol, kecepatan berada dalam kisaran 3,8–5,0 km/jm, dengan rata-rata 4,36 km/jm dan deviasi 0,29 km/jm. Perbedaan ini menunjukkan bahwa kontrol neural network mampu mendekati kecepatan terhadap set point.



Sumber: Dokumen Pribadi

Gambar 6. Grafik Perbandingan RPM Motor BLDC Tanpa dan Dengan Kontrol Pada 4Km/jm

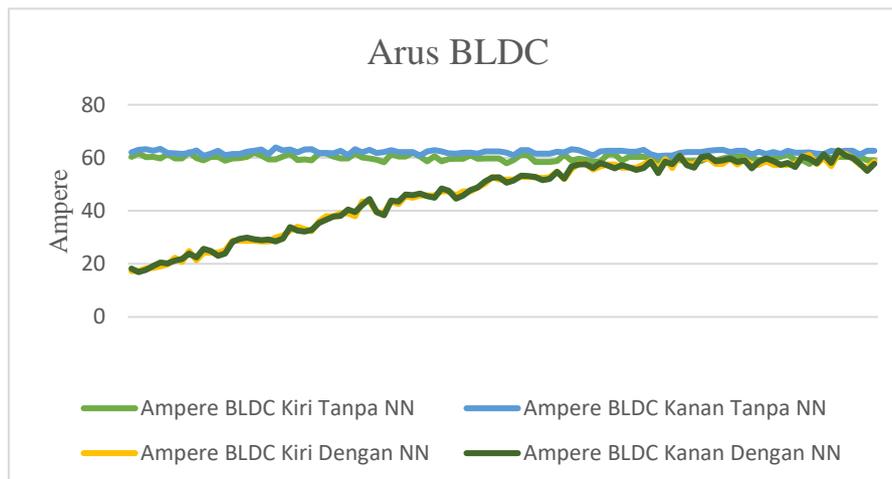
Nilai RPM motor BLDC kiri dan kanan pada pengujian tanpa kontrol bersifat statis, masing-masing berada di rentang 12.000–13.200 RPM dan 6.000–7.200 RPM. Sebaliknya, dalam pengujian dengan kontrol, RPM kiri bervariasi dari 9.500 hingga 13.200 RPM dan RPM kanan dari 8.400 hingga 9.600 RPM, menandakan adanya penyesuaian dinamis sesuai perubahan kecepatan aktual.



Sumber: Dokumen Pribadi

Gambar 7. Grafik Perbandingan RPM Mesin Tanpa dan Dengan Kontrol Pada 4Km/jm

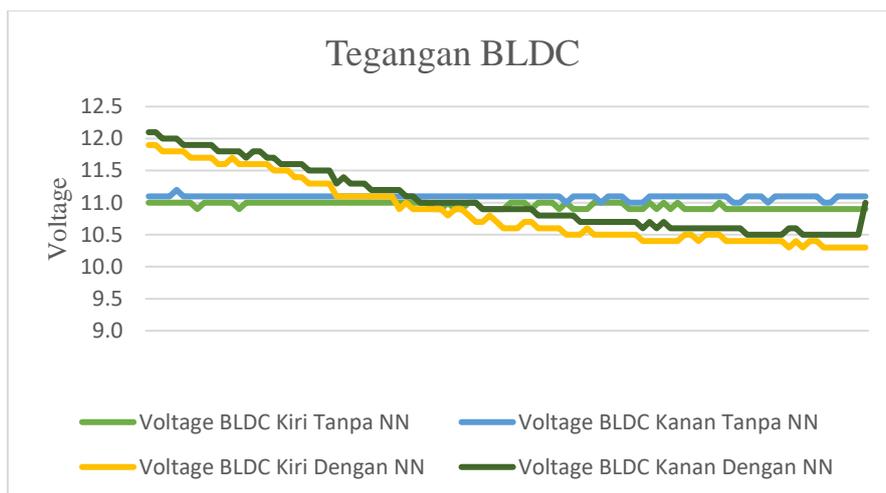
RPM mesin pada kedua skenario tetap konstan di sekitar 1.200 RPM, menunjukkan bahwa dorongan utama untuk mencapai kecepatan target pada set point ini masih didominasi oleh motor BLDC.



Sumber: Dokumen Pribadi

Gambar 8. Grafik Perbandingan Ampere Tanpa dan Dengan Kontrol Pada 4Km/jm

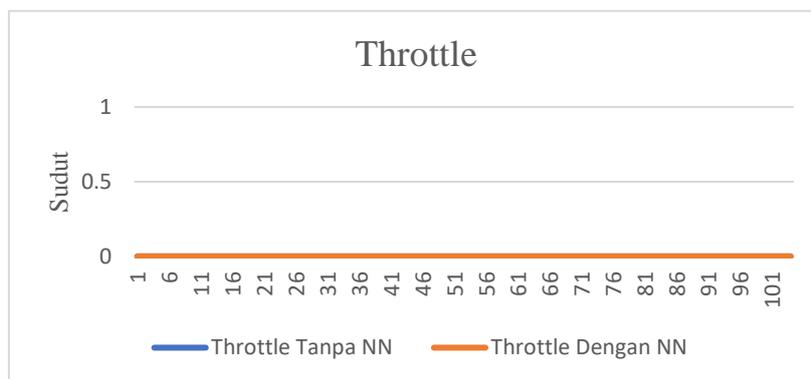
Konsumsi arus pada pengujian tanpa kontrol tercatat rata-rata 60,2 A untuk motor kiri dan 61,8 A untuk motor kanan. Sementara pada pengujian dengan kontrol, arus berada dalam rentang 56,2–61,5 A (kiri) dan 55,1–62,8 A (kanan), menunjukkan pola kerja aktif yang menyesuaikan kebutuhan dorong kapal.



Sumber: Dokumen Pribadi

Gambar 9. Grafik Perbandingan Voltase Tanpa dan Dengan Kontrol Pada 4Km/jm

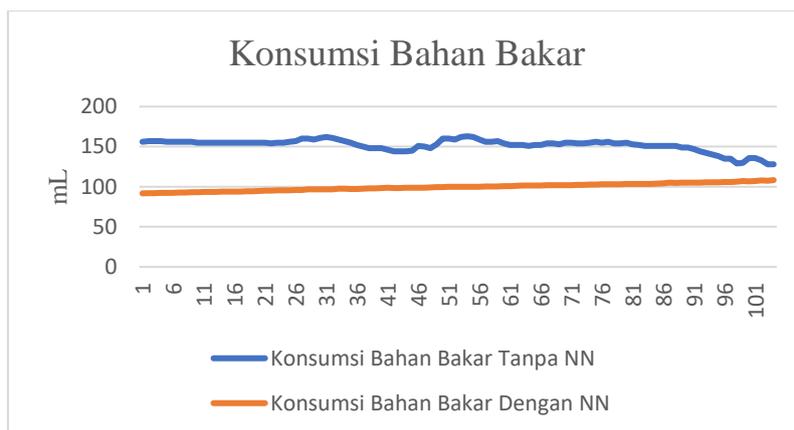
Pengukuran tegangan pada kondisi tanpa kontrol berkisar antara 10,9 hingga 11,1 V, sedangkan pada kondisi dengan kontrol, nilai tegangan tercatat antara 10,3–10,6 V untuk motor kiri dan 10,5–11,0 V untuk motor kanan. Rentang tegangan pada kedua skenario memperlihatkan karakteristik suplai daya dalam kondisi operasional yang berbeda.



Sumber: Dokumen Pribadi

Gambar 10. Grafik Perbandingan Throttle Tanpa dan Dengan Kontrol Pada 4Km/jm

Throttle tanpa kontrol tercatat konstan di 0° untuk mendukung pencapaian kecepatan target, menunjukkan bahwa kontrol aktif memaksimalkan kinerja BLDC saat diperlukan.



Sumber: Dokumen Pribadi

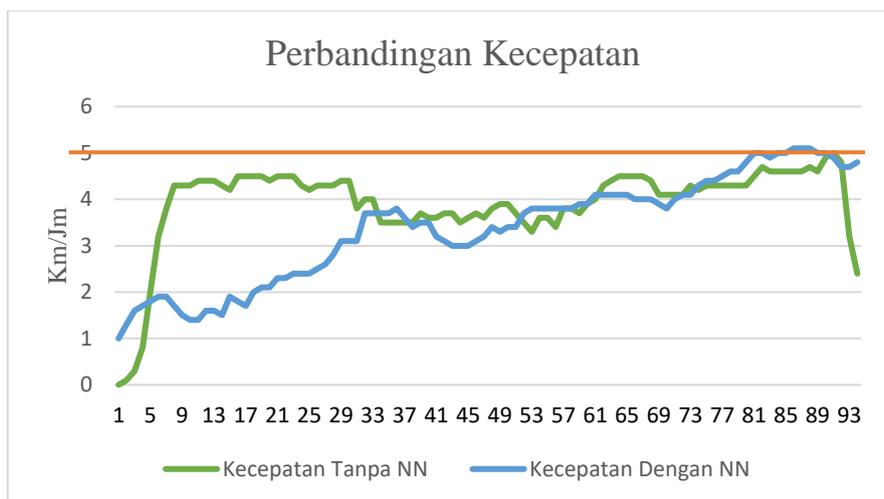
Gambar 11. Grafik Perbandingan Konsumsi Bahan Bakar Tanpa dan Dengan Kontrol Pada 4Km/jm

Konsumsi bahan bakar tanpa kontrol berada pada kisaran 138 – 163 ml/menit, sedangkan dengan kontrol turun drastis menjadi 91 – 108 ml/menit. Hal ini membuktikan bahwa kontrol neural network meningkatkan efisiensi bahan bakar sekitar 35–40%, meskipun pada beberapa kondisi kecepatan lebih tinggi dari target.

Berdasarkan hasil pengujian, penerapan kontrol berbasis neural network pada set point 4 km/jm secara signifikan meningkatkan stabilitas dan akurasi kecepatan dibandingkan tanpa kontrol. Kecepatan rata-rata meningkat dari sekitar 2,6 km/jm menjadi 4,4 km/jm, mendekati target yang diinginkan, dengan deviasi kecepatan yang lebih kecil. Sistem kontrol juga memungkinkan penyesuaian dinamis pada RPM motor BLDC untuk mempertahankan kecepatan sesuai kebutuhan, sementara konsumsi arus dan tegangan tetap dalam batas normal. Yang paling mencolok adalah penurunan konsumsi bahan bakar sebesar $\pm 35\text{--}40\%$, yang menunjukkan efisiensi energi lebih baik dengan strategi kontrol ini. Dengan demikian, kontrol neural network terbukti mampu mengoptimalkan performa kapal.

Analisis Data Perbandingan Pengujian Set Point 5km/jm

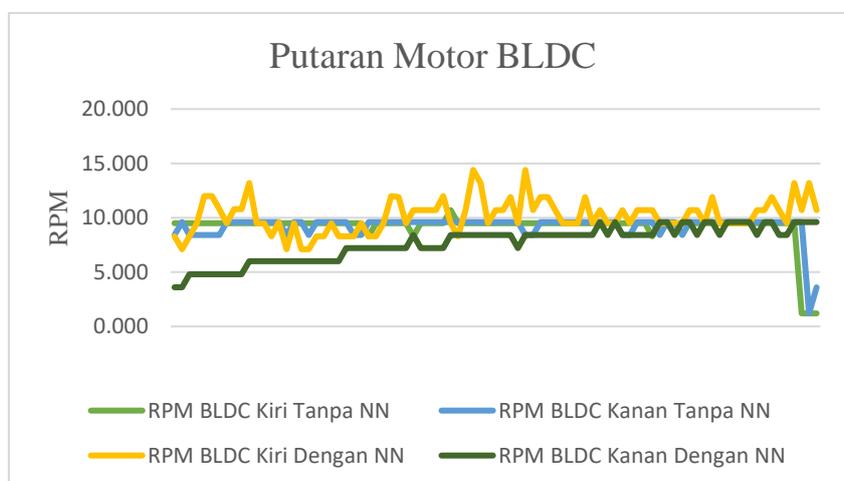
Analisis ini membandingkan hasil pengujian kapal pada kecepatan target 5 km/jm dalam dua kondisi, tanpa kontrol dan dengan kontrol berbasis neural network. Tujuannya adalah untuk menilai efektivitas sistem kontrol dalam menjaga kecepatan dan kestabilan kerja motor kapal.



Sumber: Dokumen Pribadi

Gambar 12. Grafik Perbandingan Kecepatan Tanpa dan Dengan Kontrol Pada 5km/jm

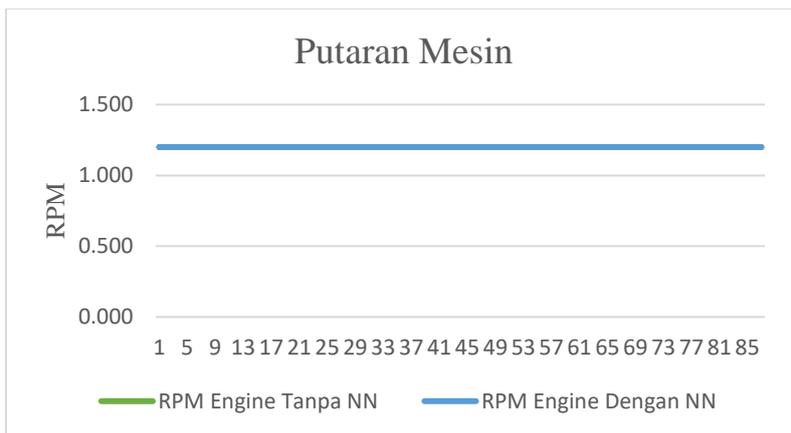
Pada set point 5 km/jm, kecepatan aktual kapal tanpa kontrol berada dalam kisaran 3,2 hingga 5,0 km/jm, dengan rata-rata sekitar 4,18 km/jm. Dengan penerapan kontrol, kecepatan tercatat antara 4,8 hingga 5,0 km/jm, dengan rata-rata 4,93 km/jm dan deviasi yang lebih kecil yaitu $\pm 0,12$ km/jm. Perbedaan rentang kecepatan memperlihatkan distribusi nilai yang lebih rapat pada kondisi dengan kontrol.



Sumber: Dokumen Pribadi

Gambar 13. Grafik Perbandingan RPM Motor BLDC Tanpa dan Dengan Kontrol Pada 5Km/jm

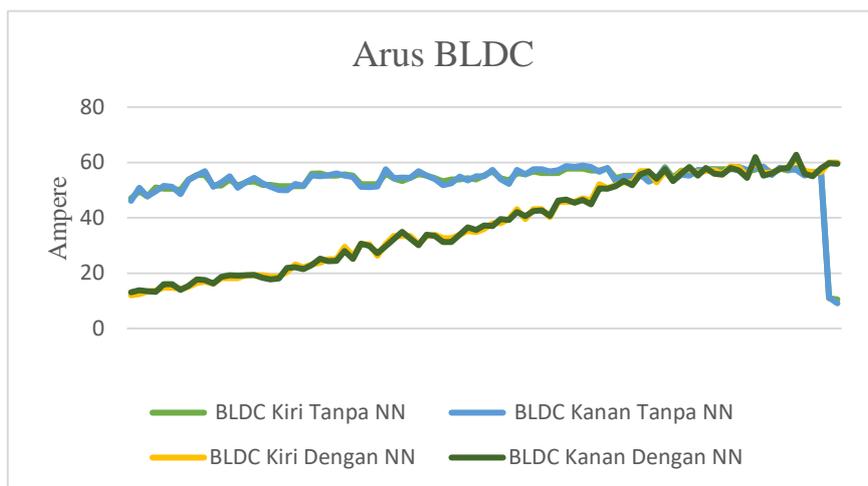
RPM motor kiri pada pengujian tanpa kontrol didominasi oleh nilai tetap sekitar 9.500 RPM, sementara RPM kanan bervariasi antara 8.400 hingga 9.600 RPM. Pada pengujian dengan kontrol, RPM kiri tercatat antara 10.700–11.900 RPM dan RPM kanan pada rentang 8.400–9.600 RPM, menunjukkan keberadaan variasi RPM yang konsisten pada kedua pendekatan.



Sumber: Dokumen Pribadi

Gambar 14. Grafik Perbandingan RPM Mesin Tanpa dan Dengan Kontrol Pada 5Km/jm

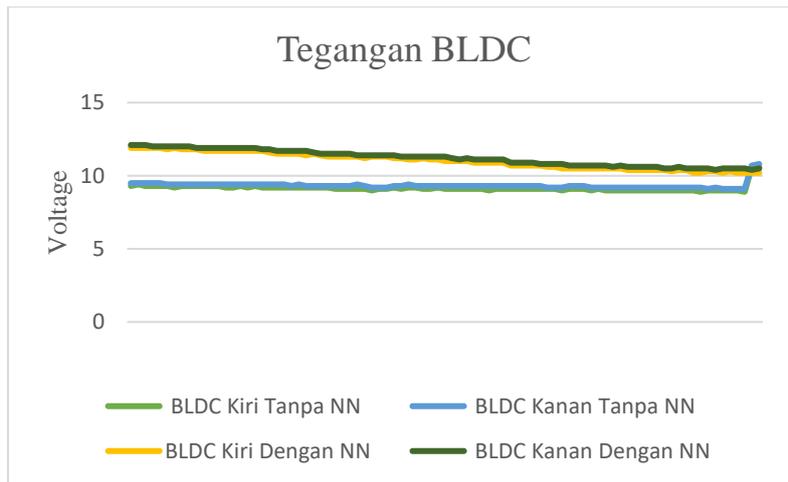
RPM mesin pada kedua kondisi (tanpa dan dengan kontrol) berada pada nilai konstan 1.200 RPM, menandakan bahwa mesin utama berperan sebagai sumber daya stabil, sementara pengaturan kecepatan sepenuhnya dikontrol oleh sistem BLDC.



Sumber: Dokumen Pribadi

Gambar 15. Grafik Perbandingan Ampere Tanpa dan Dengan Kontrol Pada 5 Km/jm

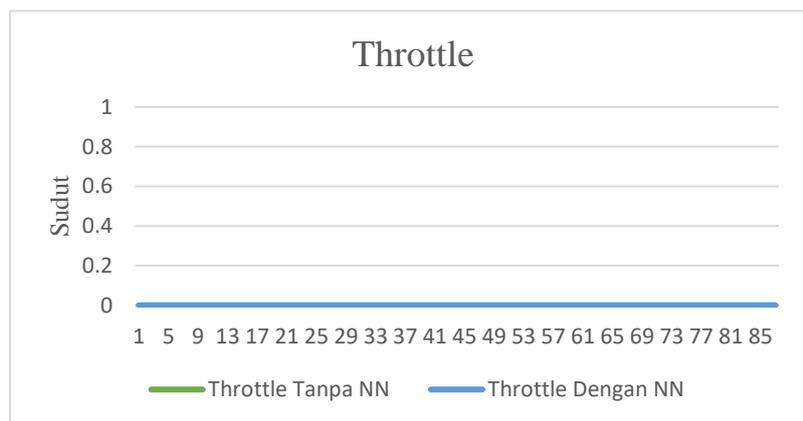
Konsumsi arus pada kondisi tanpa kontrol berada di kisaran 47–58,3 A untuk motor kiri dan 46,1–58,9 A untuk motor kanan. Dalam pengujian dengan kontrol, arus tercatat lebih tinggi, yaitu 57,5–61,4 A (kiri) dan 57,7–62,8 A (kanan), yang mencerminkan pola kerja sistem dalam mempertahankan kecepatan mendekati set point.



Sumber: Dokumen Pribadi

Gambar 16. Grafik Perbandingan Voltase Tanpa dan Dengan Kontrol Pada 5Km/jm

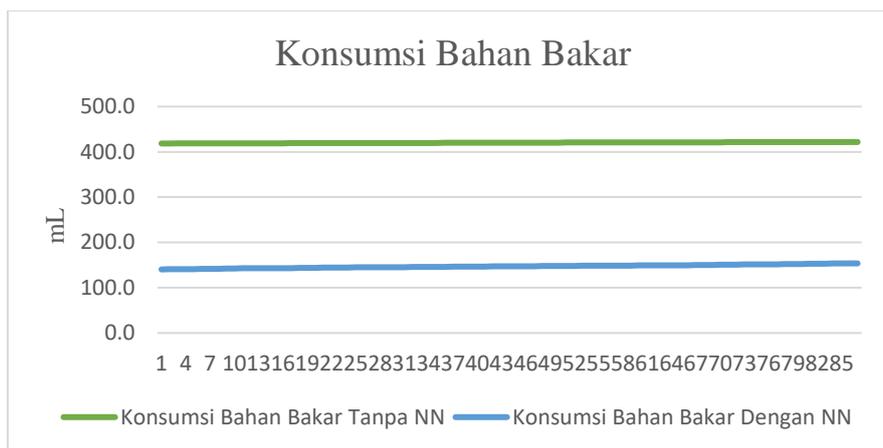
Tegangan sistem pada kondisi tanpa kontrol menunjukkan penurunan dari 8,9 hingga 9,4 V (kiri) dan 9,1–9,5 V (kanan). Pada kondisi dengan kontrol, tegangan lebih tinggi dan relatif stabil, dengan nilai 10,2–10,3 V untuk motor kiri dan 10,4–10,5 V untuk motor kanan.



Sumber: Dokumen Pribadi

Gambar 17. Grafik Perbandingan Throttle Tanpa dan Dengan Kontrol Pada 5Km/jm

Nilai throttle pada kedua kondisi relatif konstan di 0° tanpa kontrol dan dengan kontrol, menunjukkan bahwa perbedaan performa lebih disebabkan oleh algoritma pengaturan daya, bukan setelan throttle.



Sumber: Dokumen Pribadi

Gambar 18. Grafik Perbandingan Konsumsi Bahan Bakar Tanpa dan Dengan Kontrol Pada 5Km/jm

Konsumsi bahan bakar menunjukkan perbedaan mencolok. Pada kondisi tanpa kontrol, penggunaan bahan bakar mencapai 418,5–421,8 ml, sedangkan pada kondisi dengan kontrol NN hanya 140,3–153,7 ml. Hal ini berarti terjadi penghematan lebih dari 60%, menandakan perbaikan signifikan dalam efisiensi energi.

Penerapan kontrol berbasis neural network pada set point 5 km/jm memberikan dampak signifikan terhadap efisiensi bahan bakar dan kestabilan sistem. Konsumsi bahan bakar turun lebih dari 60% dibandingkan tanpa kontrol, sementara arus dan tegangan disesuaikan secara dinamis untuk mempertahankan performa. Walaupun pada fase awal sistem belum langsung mencapai target kecepatan, kontrol NN menunjukkan kemampuan adaptasi yang baik dengan pengaturan RPM motor secara fleksibel. Dengan demikian, kontrol NN tidak hanya meningkatkan efisiensi energi, tetapi juga memberikan stabilitas yang lebih baik dalam pengendalian kecepatan.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Penelitian ini berhasil merancang dan mengimplementasikan sistem kontrol kecepatan kapal dengan propulsi hibrida berbasis metode *neural network* (NN). Sistem ini menggunakan arsitektur NN 5-8-3 yang menerima *input* kecepatan aktual, RPM BLDC kiri-kanan, RPM engine, serta *set point* kecepatan, dan menghasilkan *output* berupa pengaturan ESC BLDC dan servo *throttle engine*. (1). Hasil pengujian dinamis pada lima *set point* menunjukkan bahwa penerapan kontrol berbasis NN meningkatkan stabilitas kecepatan dan efisiensi energi dibandingkan pengoperasian tanpa kontrol. (2). Pada *set point* 4 km/jm, kecepatan rata-rata

meningkat dari 2,81 km/jm menjadi 4,36 km/jm, dengan deviasi menurun dari $\pm 0,35$ menjadi $\pm 0,29$ km/jm, serta konsumsi bahan bakar turun drastis dari 138–163 ml/menit menjadi 91–108 ml/menit (efisiensi ± 35 –40%). Pada 5 km/jm, kecepatan lebih stabil dengan rata-rata 4,93 km/jm (deviasi $\pm 0,12$ km/jm) dibandingkan 4,18 km/jm tanpa kontrol, dan konsumsi bahan bakar berkurang signifikan dari ± 420 ml menjadi ± 150 ml (hemat $>60\%$). Secara keseluruhan, sistem kontrol berbasis *neural network* efektif meningkatkan kestabilan kecepatan, mengurangi konsumsi bahan bakar, dan menjaga kestabilan suplai daya pada berbagai *set point*. Penghematan bahan bakar sangat signifikan pada kecepatan rendah dan menengah, sementara pada kecepatan tinggi diperlukan optimasi database NN agar sistem dapat mencapai target kecepatan lebih presisi.

Saran

Berdasarkan hasil pengujian dan temuan selama penelitian, beberapa saran yang dapat diberikan untuk pengembangan selanjutnya adalah: (1). Optimasi Dataset *Neural Network*: Kualitas dan kelengkapan data latih harus ditingkatkan agar proses pembelajaran lebih akurat, sehingga sistem mampu mencapai *set point* dengan deviasi minimal, terutama pada mode kecepatan tinggi. (2). Peningkatan Perangkat Keras: (a). Gunakan komponen elektronik dengan kapasitas arus dan tegangan yang lebih besar. (b). Tambahkan proteksi termal dan sistem pendinginan aktif untuk menghindari *overheating* pada ESC dan jalur daya. (3). Integrasi Multi-Level Control: Pertimbangkan penerapan algoritma kontrol adaptif tingkat lanjut seperti *Hybrid Neural-Fuzzy* atau *PID-Neural* untuk meningkatkan fleksibilitas dan presisi dalam berbagai kondisi perairan.

DAFTAR REFERENSI

- Akbar, D., & Riyadi, S. (2019). *Pengaturan kecepatan pada motor brushless DC (BLDC) menggunakan PWM (pulse width modulation)*. 255–262. <https://doi.org/10.5614/sniko.2018.30>
- Aulia, U. (2022). *Pelatihan metodologi penelitian eksperimen bagi mahasiswa tingkat akhir*. Genitri: Jurnal Pengabdian Masyarakat Bidang Kesehatan, 1(1), 31–37. <https://doi.org/10.36049/genitri.v1i1.54>
- Azmi, M., Munif, N., Teknik, D., Perkapalan, S., & Kelautan, F. T. (2020). *Pengendalian kecepatan sistem propulsi hybrid pada model kapal trimaran berbasis neural network*.
- Chin, C. S., Tan, Y. J., & Kumar, M. V. (2022). *Study of hybrid propulsion systems for lower emissions and fuel saving on merchant ship during voyage*. Journal of Marine Science and Engineering, 10(3). <https://doi.org/10.3390/jmse10030393>
- Dharma, A. E., Taufik, A., Studi, P., Mesin, T., ITN, D., Raya, J. L., & Km, K. (2019). *Maintenance and repair engine Zenoah G300PUM mesin kapal cepat tak berawak fuel engine remote control*, 1–5.

- Faiz, A., Kusyanti, A., & Siregar, R. A. (2022). *Implementasi pengamanan protokol MAVLink menggunakan algoritma kriptografi Simeck*. Jurnal Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer e, 6(10), 4678–4685.
- Kurniawan, E., Koenhardono, E. S., Kurniawan, A., & Kusuma, I. R. (2024). *Literature review of hybrid propulsion system on ship*. <https://doi.org/10.1109/ICEECIT63698.2024.10859836>
- Lorenza, B. (2019). *Monitoring kecepatan motor BLDC dengan beban rem magnetik*, 11.
- Muhammad, A. H., Baharuddin, & Hasan, H. (2019). *Desain konfigurasi sistem propulsi hybrid terhadap pengurangan konsumsi BBM kapal penangkap ikan 30 GT (Configuration design of a hybrid propulsion system to reduce fuel oil consumption of a 30 GT fishing vessel)*. Marine Fisheries: Journal of Marine Fisheries Technology and Management, 10(1), 1–9. <https://doi.org/10.29244/jmf.10.1.1-9>
- Pustaka, T. (2014). *Analisa eksperimental performansi mesin diesel, 1*, 1–10.
- Samuel, & Sisworo. (2013). *Studi konfigurasi lambung kapal trimaran dengan bantuan computational fluid dynamic (CFD)*. Kapal, 10(3), 132–137.
- Saputra, H., Yuniarsih, N., Abdurrahman, N., Muvariz, M. F., Satoto, S. W., & Arjo, T. R. (2018). *Update estimasi emisi gas buang kapal di perairan Batam-Singapore menggunakan data Automatic Identification System (AIS)*. Inovtek Polbeng, 8(2), 314. <https://doi.org/10.35314/ip.v8i2.814>
- Saputra, M. J., & Suryono, R. R. (2024). *Implementasi teknologi irigasi tetes pada tanaman jagung menggunakan sensor soil moisture dan mikrokontroler ESP 32*. Malcom: Indonesian Journal of Machine Learning and Computer Science, 5(1), 111–118. <https://doi.org/10.57152/malcom.v5i1.1642>
- Subur, J., & Suryadhi. (2022). *Pengaturan kecepatan motor penggerak propeller pada kapal menggunakan metode PID dan MA filter*, 4(2), 1–6.
- Trihantoro, D. H., Darlis, D., & Putri, H. (2014). *Implementasi visible light communication (VLC) untuk pengiriman teks*. Seminar Nasional Teknologi Terapan 2014, 1–5.
- Utomo, D., Wirawan, G. A., Murtianta, B., Teknik, F., Kristen, U., & Wacana, S. (2024). *Akuisisi data state of health dan state of charge sel baterai LiPO*, 0–12.