



Perancangan Sistem Kontrol Kecepatan Kapal dengan Sistem Propulsi Hibrida Berbasis Fuzzy-PID

Rahma Nurul Afifah^{1*}, Edi Kurniawan¹, Kuntoro Bayu Ajie¹, Agus Dwi Santoso¹, Rizqi Aini Rakhman¹

¹ Program Studi Darjana Terapan Teknologi Rekayasa Kelistrikan Kapal, Politeknik Pelayaran Surabaya, Indonesia

*Corresponding author email: rahmanurulafifah3055@gmail.com

Article Info

Article history:

Received December 15, 2025

Approved March 15, 2026

Keywords:

Hybrid Propulsion, Fuzzy-PID Method, ICE Machine, BLDC Motor.

ABSTRACT

This study aims to design and determine the Fuzzy-PID control system for ship speed with a hybrid propulsion system. This system is designed to increase the efficiency of fuel use in Internal Combustion Engines, so it is expected to reduce exhaust emissions in the environment. The control system uses Fuzzy-PID control which aims to determine the effectiveness of using the Fuzzy-PID method on ships with hybrid propulsion systems. The design of this system involves the use of a pixhawk as a ship speed monitor, an STM32 microcontroller as a data processor, an ICE engine as a main engine, a BLDC motor as a auxiliary propulsion engine, a photodiode sensor as an RPM reader on the main engine and BLDC motor, and the Fuzzy-PID method as an error value processing. The results of the experiments conducted, experiments without control produced the largest error value compared to experiments with control, with an average error value of 30.4% experiments with PID control produced an average error value of 30.2% and experiments with Fuzzy PID control optimization produced the smallest average error value of 22.4%. The lowest fuel consumption was found in the PID-controlled experiment, with the lowest consumption at 6.44 mL during the experiment with a setpoint speed of 4.87 knots.

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengetahui sistem kontrol Fuzzy-PID terhadap kecepatan kapal dengan sistem propulsi hibrida. Sistem ini dirancang untuk meningkatkan efisiensi penggunaan bahan bakar pada mesin Internal Combustion Engine, sehingga diharapkan dapat mengurangi emisi gas buang pada lingkungan. Sistem kontrol menggunakan kontrol Fuzzy-PID yang bertujuan untuk mengetahui efektivitas penggunaan metode Fuzzy-PID pada kapal dengan sistem propulsi hibrida. Perancangan sistem ini melibatkan penggunaan pixhawk sebagai pemantau kecepatan kapal, mikrokontroler STM32 sebagai pengolah data, mesin ICE sebagai mesin induk, motor BLDC sebagai mesin penggerak pembantu, sensor photodiode sebagai pembaca RPM pada mesin induk dan motor BLDC, serta metode Fuzzy-PID sebagai pengolahan nilai error. Hasil percobaan yang dilakukan, percobaan tanpa kontrol menghasilkan nilai error yang paling besar dibandingkan dengan percobaan dengan kontrol, dengan rata-rata nilai error sebesar 30,4%, percobaan dengan kontrol PID menghasilkan nilai rata-rata error sebesar 30,2% dan percobaan dengan optimalisasi kontrol Fuzzy PID menghasilkan rata-rata nilai error yang paling kecil yaitu 22,4%. Penggunaan bahan bakar paling sedikit ada pada percobaan dengan kontrol PID, dengan paling sedikit penggunaan pada 6,44 mL saat percobaan dengan *setpoint* kecepatan 4,87 knot.



How to cite: Afifah, R. N., Kurniawan, E., Ajie, K. B., Santoso, A. D., & Rakhman, R. A. (2026). Perancangan Sistem Kontrol Kecepatan Kapal dengan Sistem Propulsi Hibrida Berbasis Fuzzy-PID. *Jurnal Ilmiah Global Education*, 7(1), 887–910. <https://doi.org/10.55681/jige.v7i1.4703>

PENDAHULUAN

Transportasi laut memegang peranan penting dalam distribusi barang dan penumpang, dengan kapal trimaran menjadi salah satu inovasi desain yang menawarkan stabilitas dan efisiensi lebih baik dibandingkan kapal konvensional (Naramurti et al., 2016; Kurniawan et al., 2024). Namun, penggunaan mesin diesel sebagai penggerak utama pada kapal-kapal ini masih menghadapi tantangan besar terkait efisiensi bahan bakar dan tingginya emisi gas buang, yang berkontribusi signifikan terhadap pencemaran udara di sektor pelayaran (Inal et al., 2022; Azmi et al., 2020). Seiring meningkatnya kesadaran akan pentingnya pengurangan emisi, sistem propulsi hibrida yang mengombinasikan mesin diesel dan motor induksi mulai banyak dikembangkan untuk meningkatkan efisiensi energi dan menekan dampak lingkungan (Kurniawan et al., 2024; Azmi et al., 2020).

Permasalahan utama dalam implementasi sistem propulsi hibrida terletak pada pengendalian kecepatan kapal yang bersifat non-linear akibat pengaruh gelombang laut, angin, dan hambatan lainnya (Yahya et al., 2024; Muqorrobin et al., 2024). Sistem kontrol konvensional seperti PID seringkali hanya efektif pada rentang operasi tertentu, sehingga diperlukan pendekatan kontrol yang lebih adaptif. Fuzzy Logic Control telah banyak digunakan untuk mengatasi sistem non-linear dengan pendekatan berbasis aturan linguistik, sementara Neural Network Control menawarkan solusi untuk sistem yang sangat kompleks (Yahya et al., 2024; Azmi et al., 2020). Namun, integrasi metode Fuzzy dan PID dalam bentuk Fuzzy-PID control dinilai mampu memberikan respons yang lebih cepat, memperbaiki kesalahan kondisi tunak, serta meningkatkan stabilitas sistem pada berbagai kondisi operasi (Muqorrobin et al., 2024; Yahya et al., 2024).

Penelitian sebelumnya umumnya berfokus pada pengendalian putaran mesin menggunakan metode kontrol tunggal, sedangkan penelitian ini mengkaji secara khusus penerapan metode Fuzzy-PID pada sistem propulsi hibrida kapal trimaran (Azmi et al., 2020; Kurniawan et al., 2024). Permasalahan yang diangkat meliputi bagaimana merancang metode Fuzzy-PID pada prototipe sistem propulsi hibrida dan menganalisis kinerjanya terhadap variasi kondisi gelombang. Selain itu, penelitian ini membatasi ruang lingkup pada pengujian kecepatan kapal trimaran dengan lima mode kecepatan, penggunaan mesin ICE Zenoah dan motor BLDC, serta pengujian pada sungai berarus tenang dengan hambatan gelombang yang bervariasi (Muqorrobin et al., 2024; Yahya et al., 2024).

Tujuan utama penelitian ini adalah merancang sistem kontrol kecepatan kapal berbasis Fuzzy-PID pada sistem propulsi hibrida dan menganalisis kinerjanya dalam berbagai kondisi operasi. Urgensi penelitian ini terletak pada upaya meningkatkan efisiensi energi dan menurunkan emisi gas buang di sektor pelayaran, sejalan dengan tren global menuju transportasi ramah lingkungan (Inal et al., 2022; Kurniawan et al., 2024). Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi metode Fuzzy-PID dalam pengendalian kecepatan kapal trimaran dengan sistem propulsi hibrida, yang belum banyak dikaji dalam literatur terkini dan diharapkan dapat menjadi

referensi bagi pengembangan sistem kontrol kapal masa depan (Azmi et al., 2020; Muqorrobin et al., 2024).

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimen terapan untuk merancang dan menguji sistem kontrol kecepatan kapal berbasis Fuzzy-PID pada sistem propulsi hibrida trimaran. Metode eksperimen dipilih karena memungkinkan peneliti untuk mengamati secara langsung pengaruh variabel kontrol terhadap kinerja sistem dalam kondisi nyata, sesuai dengan rekomendasi penelitian terapan di bidang teknik dan pendidikan (Sugiyono, 2022; Cresswell & Creswell, 2023). Penelitian ini juga mengacu pada prinsip-prinsip desain eksperimen yang sistematis dan terstruktur untuk memastikan validitas hasil (Sudaryono, 2021; Emzir, 2022).

Instrumen utama yang digunakan meliputi prototipe kapal trimaran yang dilengkapi dengan mikrokontroler STM32, sensor photodiode untuk pembacaan RPM, sensor arus ACS758, sensor flowmeter, serta modul ESP32 untuk transmisi data. Sistem kontrol terdiri dari algoritma Fuzzy-PID yang diimplementasikan pada STM32, dengan output berupa sinyal PWM untuk mengatur kecepatan motor BLDC dan mesin ICE. Teknik analisis data dilakukan secara kuantitatif dengan membandingkan nilai error kecepatan, konsumsi bahan bakar, dan respons sistem pada berbagai mode kecepatan dan kondisi gelombang, menggunakan analisis statistik deskriptif dan inferensial (Sugiyono, 2022; Kurniawan et al., 2024; Muqorrobin et al., 2024).

Populasi penelitian adalah seluruh data hasil pengujian prototipe kapal trimaran dengan sistem propulsi hibrida berbasis Fuzzy-PID, sedangkan sampel penelitian diambil dari hasil pengujian pada lima mode kecepatan (pengintaian, patroli lambat, patroli cepat, jelajah, dan pengejaran) serta tiga kondisi gelombang (rendah, sedang, tinggi). Penentuan sampel dilakukan secara purposive sampling, yaitu memilih data yang paling relevan dengan tujuan penelitian dan karakteristik sistem yang diuji (Cresswell & Creswell, 2023; Azmi et al., 2020).

Prosedur penelitian dimulai dengan perancangan sistem dan alat, dilanjutkan dengan pengujian statis untuk memastikan setiap komponen berfungsi dengan baik, kemudian dilakukan pengujian dinamis dengan menjalankan prototipe kapal pada berbagai setpoint kecepatan dan kondisi gelombang. Data hasil pengujian dikumpulkan secara real-time melalui sistem IoT dan dianalisis untuk mengevaluasi efektivitas kontrol Fuzzy-PID dalam menjaga kecepatan kapal sesuai setpoint serta efisiensi konsumsi bahan bakar. Setiap tahapan penelitian dirancang secara sistematis agar hasil yang diperoleh dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah (Emzir, 2022; Inal et al., 2022; Yahya et al., 2024).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini disajikan hasil pengujian dan analisis data yang diperoleh dari percobaan sistem kendali kecepatan menggunakan kontrol PID dan Fuzzy PID. Pengujian dilakukan dengan memberikan beberapa *setpoint* kecepatan berupa kecepatan rendah, kecepatan sedang dan kecepatan tinggi. Setiap grafik memperlihatkan respons dari sistem sesuai dengan kondisi yang berbeda.

Analisis Pengujian Statis

Berdasarkan hasil dari uji statis, diketahui bahwa semua komponen yang diuji menunjukkan kinerja dan dapat berfungsi dengan baik. Dimulai dari mesin penggerak utama atau mesin ICE dan motor BLDC sebagai motor penggerak bantu pada *prototype* kapal trimaran. Mesin ICE dapat bergerak berdasarkan tarikan pada throttle dan menghasilkan kecepatan putaran RPM

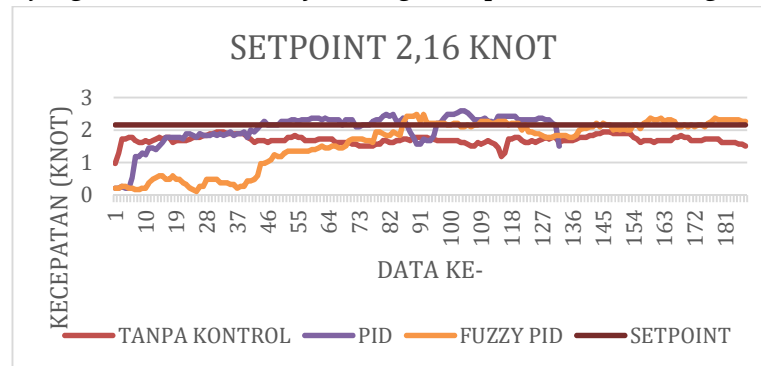
berdasarkan besar kecilnya tarikan yang diberikan. Putaran pada motor BLDC didapatkan berdasarkan *input* PWM pada kontrol. Sensor photodiode dapat dengan baik merespons cahaya pantulan dan dapat membaca RPM dengan baik, dibuktikan dengan perbandingan pada saat pengukuran dengan menggunakan tachometer. Kontroller STM32 dan ESP32 berfungsi dengan baik, percobaan dilakukan dengan melakukan percobaan sederhana pada kontroller STM32 dan ESP32. Percobaan pada ESP32 juga dilakukan dengan percobaan pengiriman data menggunakan Wi-Fi pada kontrol ESP32. Kontroller ESP32 dapat mengirim dan menerima data dengan baik. Pada percobaan sensor arus dan tegangan dilakukan dengan membandingkan antara hasil dari sensor arus dan tegangan dengan multimeter.

Analisis Pengujian Dinamis

Pengujian dinamis dianalisa guna mengevaluasi hasil dari kinerja kendali kecepatan pada kapal dengan sistem propulsi hibrida berbasis Fuzzy PID. Tujuan dari analisis ini adalah untuk menilai kemampuan sistem dalam merespons perubahan kecepatan dan mempertahankan kinerja kapal dengan stabil. Analisis ini dilakukan dengan membandingkan hasil uji dari kondisi tanpa kontrol, dengan kontrol PID dan dengan kontrol Fuzzy PID.

Analisis Pengujian Kecepatan Rendah

Pengujian pada kecepatan rendah dengan *setpoint* kecepatan 2,16 knot dan 2,7 knot menunjukkan hasil yang berbeda ketika diujian dengan tanpa kontrol dan dengan kontrol.



Gambar 1 Perbandingan Kecepatan dengan *Setpoint* 2,16 Knot

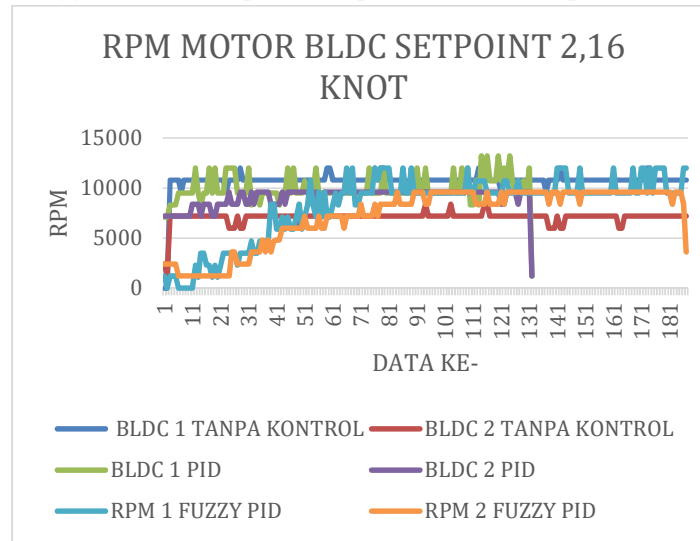
Pada gambar 1 terlihat grafik perbandingan kecepatan dengan tiga kondisi pengujian, yaitu tanpa kontrol, dengan kontrol PID, dan dengan kontrol fuzzy PID terhadap *setpoint* kecepatan 2,16 knot. Sistem tanpa kontrol menunjukkan hasil yang paling tidak stabil, dengan kecepatan berada jauh di bawah *setpoint*. Hal ini mengindikasikan tanpa adanya pengendalian sistem tidak mampu mempertahankan kecepatan yang dibutuhkan.

Sementara itu, sistem dengan kontrol PID menunjukkan performa yang lebih baik dibandingkan dengan tanpa kontrol. Kecepatan dapat mendekati bahkan melebihi *setpoint* pada beberapa titik. Namun terdapat fluktuasi yang cukup tinggi yang terlihat pada grafik. Sehingga menunjukkan bahwa meskipun PID dapat merespons perubahan secara cepat, kontrol masih menghasilkan overshoot yang signifikan dan belum mampu mempertahankan kestabilan secara konsisten dalam jangka panjang. Hal ini disebabkan oleh keterbatasan PID dalam menangani sistem non-linear dan gangguan lingkungan yang tidak terprediksi.

Kontrol fuzzy PID menunjukkan hasil yang paling mendekati *setpoint* dan relatif stabil dibanding dengan kedua percobaan sebelumnya. Sistem mampu mengatur kecepatan secara bertahap hingga mendekati nilai *setpoint* dan mempertahankannya tanpa fluktuasi yang terlalu tinggi. Hal ini menandakan bahwa kontrol fuzzy PID lebih adaptif terhadap perubahan dan gangguan, serta mampu memberikan kestabilan dan akurasi lebih tinggi dalam mengatur

kecepatan kapal. Dengan demikian, penggunaan kontrol fuzzy PID terbukti lebih efektif dalam mencapai performa yang diharapkan sesuai dengan target kecepatan 2,16 knot.

Hasil pengujian pada *setpoint* kecepatan 2,16 knot menunjukkan bahwa sistem tanpa kontrol memiliki error sebesar 24%, menandakan bahwa kecepatan aktual jauh dari target yang diinginkan. Penerapan kontrol PID mampu menurunkan error menjadi 6%. Dan penggunaan kontrol fuzzy PID menghasilkan error sebesar 26%, lebih tinggi dibandingkan tanpa kontrol maupun dengan kontrol PID, mengindikasikan bahwa parameter fuzzy belum optimal dalam mengatur sistem sehingga belum mampu mencapai *setpoint* secara presisi.



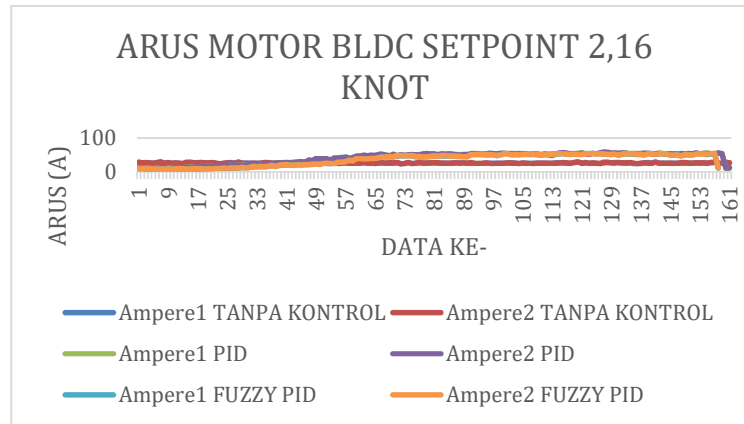
Gambar 2. Perbandingan RPM *Setpoint* 2,16 Knot

Berdasarkan gambar 2 terlihat perbandingan kecepatan RPM dari dua motor BLDC tanpa kontrol, dengan kontrol PID dan kontrol fuzzy PID pada *setpoint* kecepatan 2,16 knot. Dengan tanpa kontrol, BLDC 1 dan BLDC 2 menunjukkan performa yang kurang stabil dengan variasi RPM yang tidak seragam. Nilai RPM cenderung rendah dan tidak mampu beradaptasi terhadap perubahan beban dan gangguan.

Penggunaan kontrol PID menghasilkan nilai RPM yang mampu mencapai kisaran target dan menunjukkan respons yang cepat terhadap perubahan. Masih terdapat fluktuasi tajam yang menunjukkan potensi overshoot dan kurangnya peredaman terhadap gangguan eksternal. Hal ini mengindikasikan bahwa meskipun kontrol PID dapat meningkatkan respons, kontrol masih memiliki keterbatasan dalam menghadapi sistem yang kompleks.

Kontrol fuzzy PID menunjukkan hasil yang paling optimal dibandingkan dengan percobaan tanpa kontrol dan dengan kontrol PID. RPM motor BLDC 1 dan motor BLDC 2 mampu mencapai nilai yang mendekati target secara stabil dan konsisten. Dengan menggunakan kontrol fuzzy PID, fluktuasi pada sistem lebih terkendali dan dapat beroperasi secara lebih seimbang. Hal ini menunjukkan bahwa pendekatan fuzzy PID mampu mengatasi kelemahan dari metode PID konvensional dengan menyesuaikan parameter kendali yang digunakan.

Gambar 4.125 menunjukkan grafik arus dari dua motor BLDC dalam tiga kondisi yang berbeda, yaitu tanpa kontrol, dengan kontrol PID dan dengan kontrol fuzzy PID.

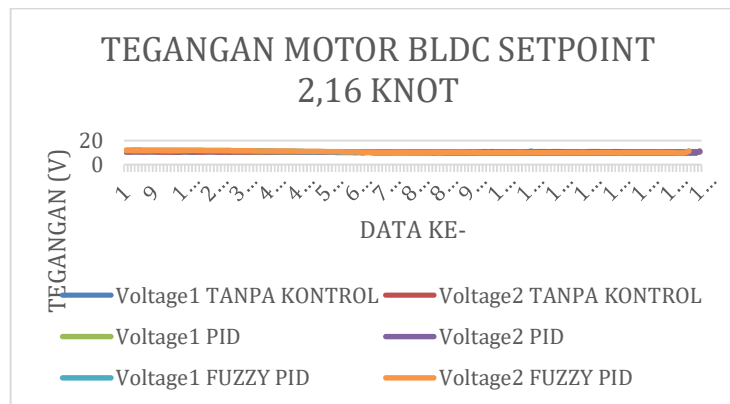


Gambar 3. Perbandingan Ampere *Setpoint* 2,16 Knot

Dari grafik terlihat bahwa sistem tanpa kontrol memiliki nilai konsumsi arus yang cenderung tetap, namun lebih rendah dibandingkan sistem dengan kontrol. Hal ini terjadi karena sistem tanpa kontrol tidak mampu meningkatkan performa motor secara optimal sehingga konsumsi arus pun terbatas.

Sistem dengan kontrol PID menunjukkan peningkatan konsumsi arus yang signifikan. Peningkatan ini memerlukan usaha sistem untuk mengejar dan mempertahankan kecepatan *setpoint*. Namun, lonjakan arus yang cukup tinggi menunjukkan bahwa kontrol PID cenderung memberikan respon yang agresif dan tidak efisien dalam penggunaan energi.

Sistem dengan kontrol fuzzy PID menunjukkan performa yang lebih stabil dan efisien. Nilai arus pada kedua motor naik secara bertahap dan mampu mempertahankan ampere tanpa adanya fluktuasi tajam. Ini menunjukkan bahwa fuzzy PID mampu mengatur kebutuhan arus secara adaptif berdasarkan kondisi aktual sistem.



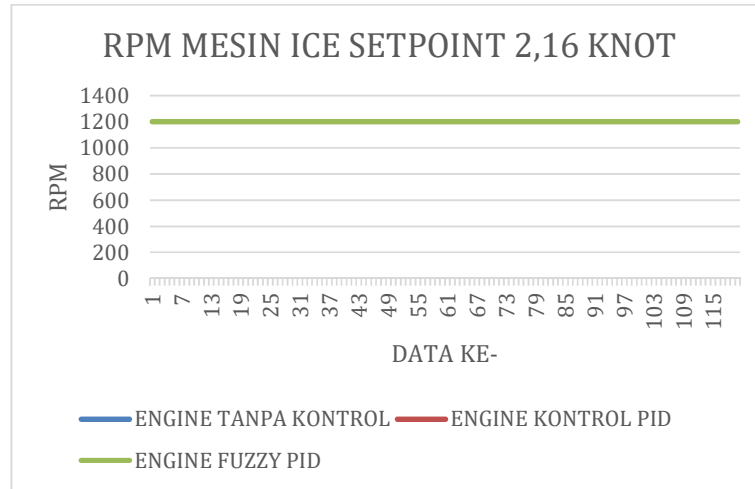
Gambar 4. Perbandingan Tegangan *Setpoint* 2,16 Knot

Gambar 4 menunjukkan grafik perbandingan tegangan dari dua motor BLDC dengan tiga kondisi, yaitu kondisi tanpa kontrol, dengan kontrol PID dan dengan kontrol fuzzy PID pada *setpoint* kecepatan 2,16 knot. Secara umum, semua kondisi mengalami penurunan tegangan yang merupakan indikasi dari konsumsi daya selama pengoperasian. Tegangan awal di nilai 12V dan secara bertahap turun hingga sekitar 10V. hal ini menunjukkan bahwa beban kerja sistem menguras sumber daya secara bertahap terutama pada sistem yang aktif mengatur kecepatan motor.

Pada sistem tanpa kontrol, penurunan tegangan cenderung stabil dan tidak terlalu tajam, yang mengindikasikan konsumsi daya tidak terlalu besar karena performa motor tidak maksimal. Pada sistem dengan kontrol PID, terlihat adanya sedikit peningkatan pada tegangan yang

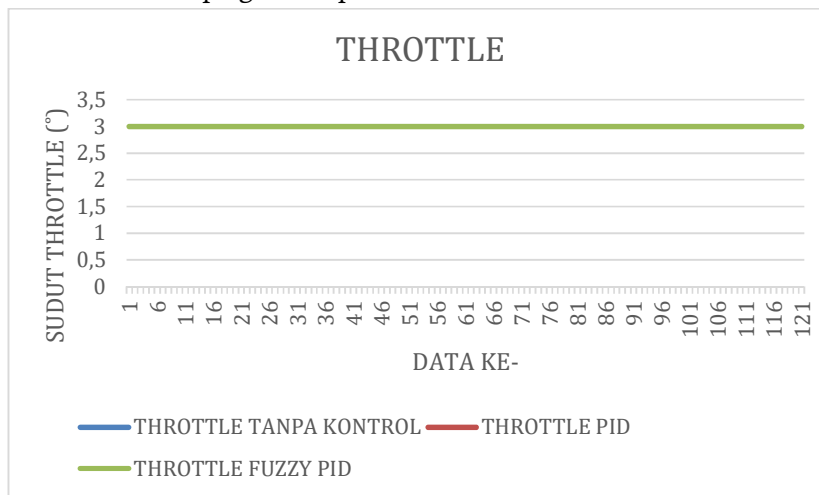
disebabkan oleh respons pengontrol terhadap perubahan mendadak pada sistem atau upaya untuk mempertahankan performa kecepatan saat tegangan mulai melemah.

Sistem dengan kontrol fuzzy PID menunjukkan pola penurunan tegangan yang paling halus dan konsisten. Ini menandakan bahwa fuzzy PID tidak hanya efektif dalam menjaga kestabilan kecepatan dan efisiensi arus, tetapi juga mampu mempertahankan kestabilan suplai tegangan dengan baik. Terlihat tidak adanya lonjakan atau penurunan drastis yang mengindikasikan bahwa sistem bekerja dengan beban yang lebih seimbang dan tidak membebani sumber daya secara berlebihan.



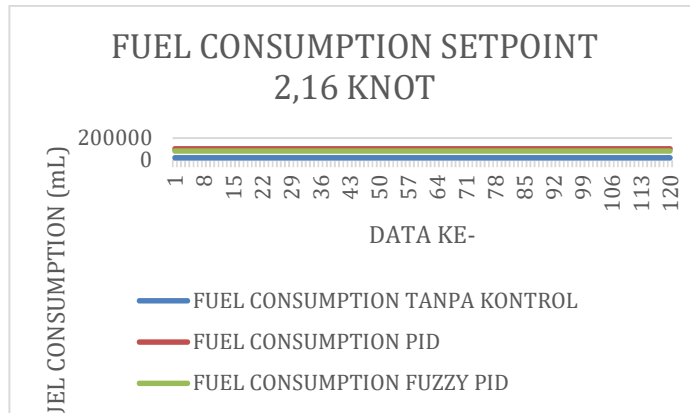
Gambar 5 Grafik RPM Mesin ICE Setpoint 2,16 Knot

Gambar 5 memperlihatkan putaran mesin ICE pada saat *setpoint* kecepatan 2,16 knot. Pada saat kondisi tanpa kontrol maupun dengan kontrol, RPM mesin ICE tetap dalam kondisi idle, yang memperlihatkan tidak ada pergerakan pada mesin ICE.



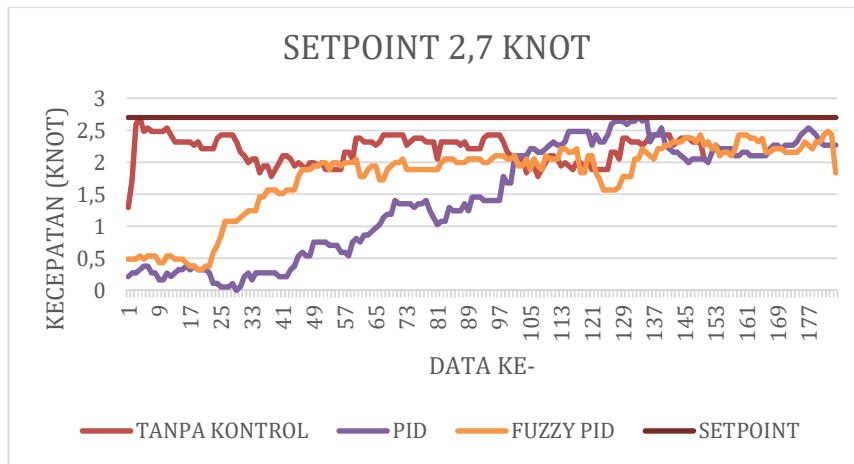
Gambar 6 Grafik Sudut Throttle Setpoint 2,16 Knot

Gambar 6 memperlihatkan grafik pergerakan sudut throttle pada saat *setpoint* kecepatan 2,16 knot. Pada percobaan tanpa kontrol dan dengan kontrol, terlihat tidak adanya pergerakan pada sudut throttle. Kondisi ini membuktikan bahwa mesin dalam kondisi idle dan tidak memberikan daya dorong aktif terhadap pergerakan gaya dorong kapal.



Gambar 7 Grafik Konsumsi Bahan Bakar *Setpoint* 2,16 Knot

Grafik pada gambar 4.129 memperlihatkan penggunaan konsumsi bahan bakar pada saat *setpoint* kecepatan 2,16 knot. Pada grafik hasil percobaan, terlihat adanya kenaikan konsumsi bahan bakar, yang menunjukkan bahwa masih adanya penggunaan bahan bakar pada saat mesin dalam kondisi idle.

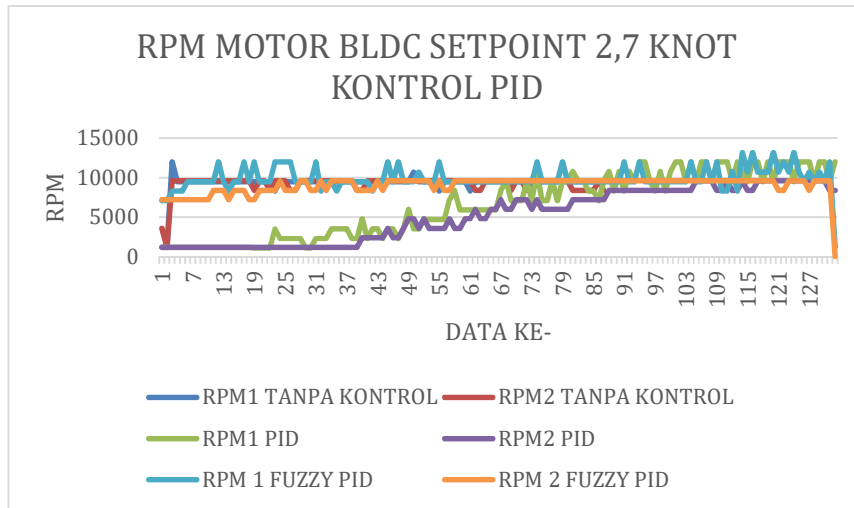


Gambar 8 Perbandingan Kecepatan *Setpoint* 2,7 Knot

Gambar 8 menunjukkan grafik performa kecepatan kapal terhadap *setpoint* 2,7 knot dengan kondisi tanpa kontrol, dengan kontrol PID dan dengan kontrol Fuzzy PID. Hasil dari pengujian tanpa kontrol menunjukkan bahwa meskipun kecepatan sempat mendekati *setpoint*, sistem tidak mampu mempertahankan dengan stabil dan terjadi beberapa fluktuasi pada sistem.

Pada sistem dengan kontrol fuzzy PID terdapat peningkatan performa secara signifikan. Kecepatan meningkat secara bertahap dan relatif stabil. Terjadi beberapa fluktuasi kecil, namun sistem mampu mempertahankan kecepatan dengan cepat dan tetap berada dalam target *setpoint*. Hal ini mencerminkan kemampuan kontrol fuzzy PID dalam menyesuaikan keluaran terhadap kondisi dinamis dan gangguan yang terjadi.

Pada pengujian *setpoint* 2,7 knot, sistem tanpa kontrol menunjukkan error sebesar 22%. Penggunaan kontrol PID memberikan nilai error sebesar 47% yang mengindikasikan bahwa penyetelan parameter PID kurang optimal pada kondisi ini. Penerapan kontrol fuzzy PID mampu menurunkan error hingga error mencapai 5% yang membuktikan bahwa kontrol fuzzy PID lebih efektif dalam menjaga kecepatan sesuai *setpoint*.

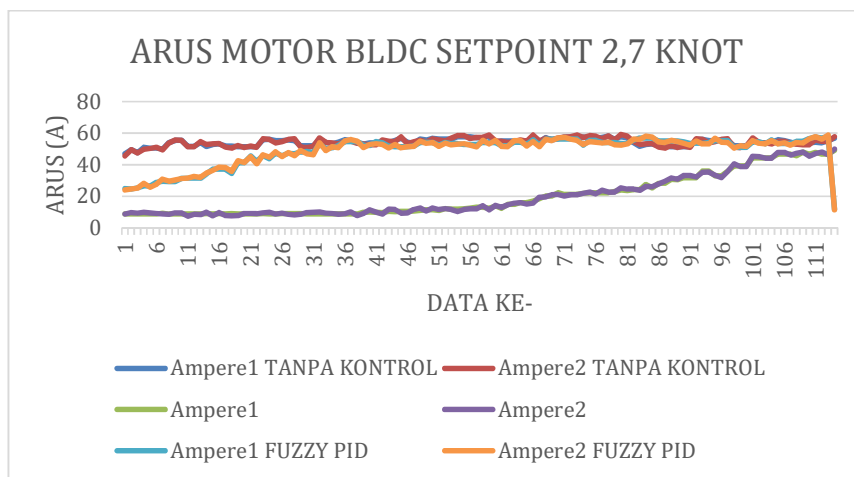


Gambar 9. Perbandingan RPM Setpoint 2,7 Knot

Gambar 9 merupakan grafik perbandingan RPM motor BLDC pada *setpoint* kecepatan 2,7 knot dalam tiga kondisi pengujian, yaitu pengujian dengan tanpa kontrol, dengan kontrol PID dan dengan kontrol fuzzy PID. Hasil menunjukkan bahwa sistem tanpa kontrol menghasilkan RPM yang cenderung statis dan tidak merespon perubahan, dimana motor BLDC 2 mengalami ketidakstabilan pada beberapa titik. Hal ini menunjukkan bahwa tanpa kendali aktif, sistem tidak dapat mempertahankan performa motor pada nilai optimal.

Ketika dengan kontrol PID, nilai RPM terlihat lebih terjaga dan responsif. Namun masih terdapat sedikit fluktuasi yang menandakan kurangnya adaptasi terhadap kondisi dinamis atau ketidakseimbangan antar motor. Tetapi kontrol PID mampu menjaga RPM yang menunjukkan peningkatan performa dibandingkan dengan sistem tanpa kontrol.

Sistem dengan kontrol fuzzy PID menunjukkan hasil yang paling stabil dan mendekati ideal. RPM motor BLDC 1 dan motor BLDC 2 mampu mempertahankan nilai yang relatif konstan dan mendekati nilai referensi sepanjang waktu pengamatan dengan fluktuasi yang lebih kecil dibandingkan dengan percobaan sebelumnya. Hal ini menunjukkan kemampuan kontrol fuzzy PID dalam mengelola kestabilan dan distribusi kerja motor secara adaptif dan dalam berbagai kondisi dinamis.



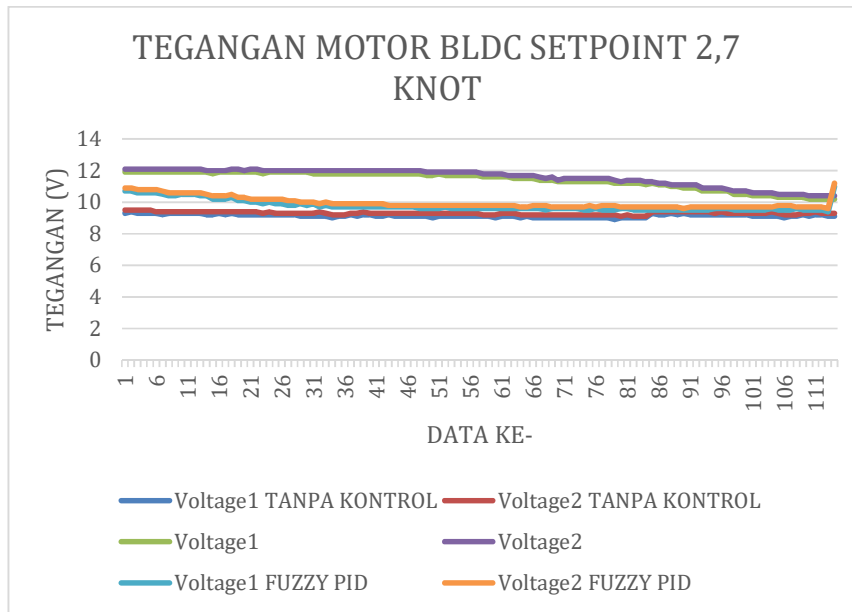
Gambar 10 Perbandingan Arus Setpoint 2,7 Knot

Gambar 10 menunjukkan grafik perbandingan konsumsi arus dari motor BLDC pada *setpoint* kecepatan 2,7 knot dalam tiga kondisi, yaitu tanpa kontrol, dengan kontrol PID dan dengan kontrol fuzzy PID. Arus motor pada sistem tanpa kontrol terlihat cukup tinggi dan cenderung fluktuatif.

Sedangkan percobaan dengan kontrol PID menunjukkan peningkatan kestabilan konsumsi arus. Nilai arus motor BLDC 1 dan motor BLDC 2 cenderung lebih terkontrol dan dapat dipertahankan dalam rentang 50-60 ampere. Meskipun masih terjadi sedikit fluktuasi, sistem kontrol PID masih mampu memberikan respon yang cepat terhadap perubahan beban walaupun belum sepenuhnya optimal. Konsumsi arus yang tinggi mengindikasikan bahwa sistem terus berusaha menjaga RPM.

Kontrol fuzzy PID memperlihatkan performa terbaik dalam hal efisiensi dan kestabilan arus. Arus yang dibutuhkan oleh kedua motor meningkat secara bertahap dan stabil di rentang 50-55 ampere. Terlihat minim fluktuasi pada percobaan ini, hal ini menunjukkan bahwa sistem fuzzy PID lebih mampu menyesuaikan besarnya arus secara cerdas berdasarkan kondisi beban dan kecepatan.

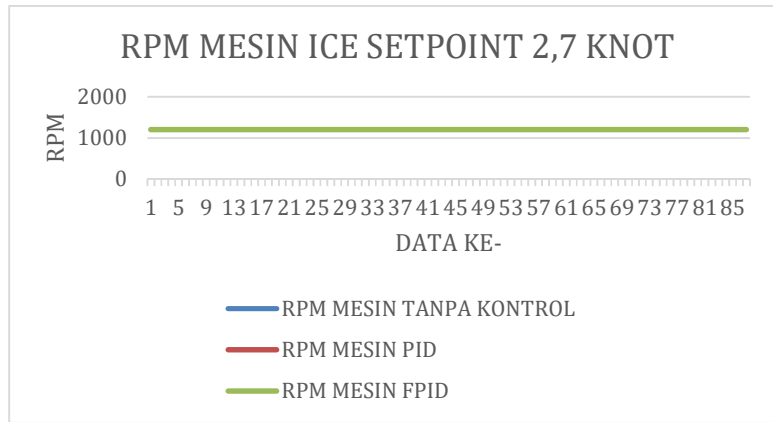
Gambar 11 menunjukkan perbandingan nilai tegangan motor BLDC pada *setpoint* kecepatan 2,7 knot dalam beberapa kondisi, yaitu tanpa kontrol, dengan kontrol PID dan dengan kontrol fuzzy PID.



Gambar 11 Perbandingan Tegangan *Setpoint* 2,7 Knot

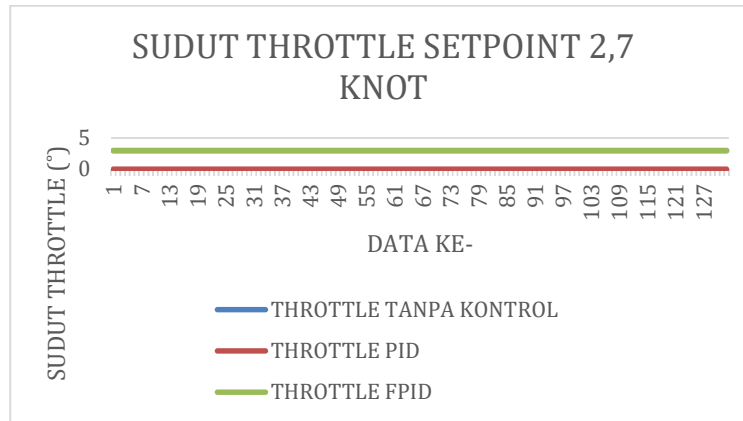
Secara keseluruhan sistem mengalami penurunan tegangan yang mencerminkan penurunan kapasitas baterai akibat adanya konsumsi energi. Pada sistem tanpa kontrol, tegangan cenderung menurun secara linear hingga mencapai nilai 9,5V. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun tidak ada upaya pengendalian aktif, beban pada sistem cukup konstan. Akan tetapi tegangan tidak mampu bertahan di level optimal, yang mengindikasikan kurangnya efisiensi dalam penggunaan daya.

Sistem dengan kontrol fuzzy PID menunjukkan performa terbaik dalam menjaga kestabilan tegangan. Tegangan dari kedua motor tetap berada di level yang relatif stabil mendekati 10V tanpa adanya penurunan drastis. Hal ini mengindikasikan bahwa kontrol fuzzy PID mampu mengelola beban motor secara efisien, sehingga konsumsi energi tetap terkontrol dan tidak membebani sumber daya secara berlebihan.



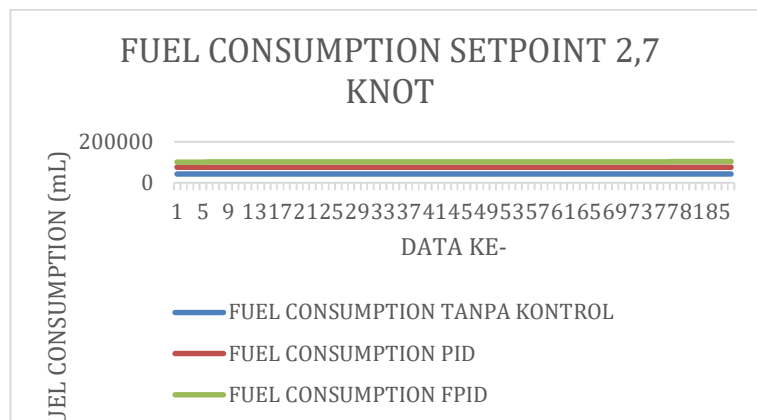
Gambar 12. RPM Mesin ICE *Setpoint* 2,7 Knot

Gambar 12 memperlihatkan grafik RPM mesin ICE pada saat percobaan dengan *setpoint* kecepatan 2,7 knot. Dari grafik terlihat tidak adanya perbedaan putaran RPM pada mesin ICE saat percobaan tanpa kontrol maupun percobaan dengan kontrol yang menandakan bahwa mesin ICE berada dalam kondisi idle.



Gambar 13. Sudut Throttle *Setpoint* 2,7 Knot

Gambar 13 memperlihatkan hasil sudut throttle pada saat percobaan dengan *setpoint* kecepatan 2,7 knot. Dari grafik terlihat adanya perbedaan sudut pada throttle, namun perbedaan sudut pada throttle tidak menyebabkan mesin ICE berjalan, namun posisi mesin ICE tetap dalam keadaan idle.

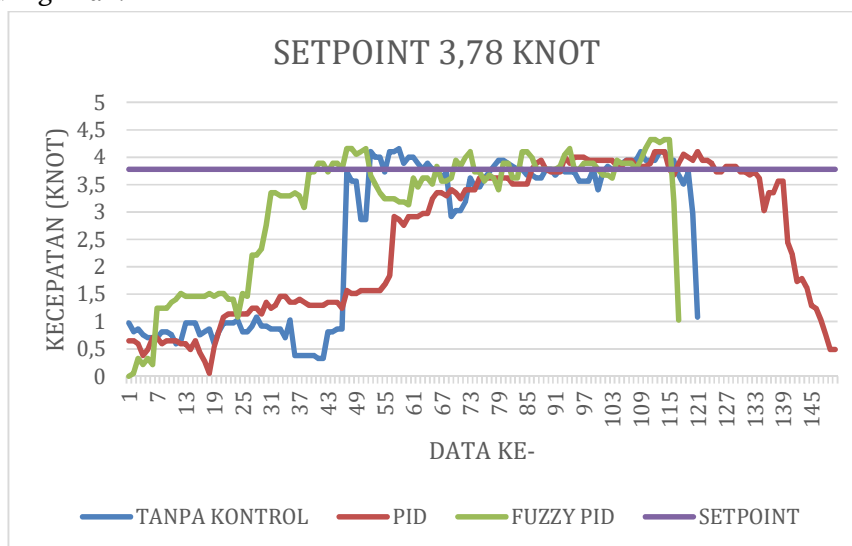


Gambar 14. Konsumsi Bahan Bakar *Setpoint* 2,7 Knot

Grafik pada gambar 14 memperlihatkan penggunaan konsumsi bahan bakar pada saat *setpoint* kecepatan 2,7 knot. Pada grafik hasil percobaan, terlihat adanya sedikit kenaikan pada konsumsi bahan bakar, yang menunjukkan bahwa masih adanya penggunaan bahan bakar pada saat mesin dalam kondisi idle.

Analisis Pengujian Kecepatan Sedang

Pengujian pada kecepatan sedang dengan *setpoint* 3,78 knot dan 4,86 knot menunjukkan adanya perbedaan. Pada saat percobaan tanpa menggunakan kontrol, kecepatan kapal cenderung mengalami keterlambatan dalam mencapai *setpoint* dan kecepatan tidak dapat stabil mendekati *setpoint* yang diinginkan.



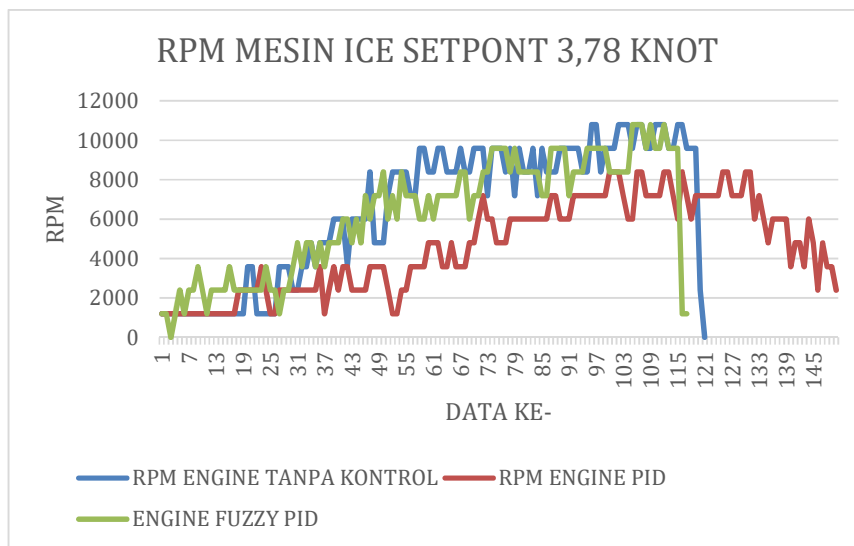
Gambar 15 Perbandingan Kecepatan Setpoint 3,78 Knot

Gambar 15 menunjukkan grafik perbandingan kecepatan aktual sistem terhadap *setpoint* 3,78 knot dalam 3 kondisi, yaitu tanpa kontrol, dengan kontrol PID dan dengan kontrol fuzzy PID. Pada sistem tanpa kontrol, kecepatan mengalami fluktuasi signifikan dan terdapat kenaikan mendekati *setpoint*. Hal ini menunjukkan bahwa tanpa adanya kontrol, sistem tidak mampu menyesuaikan diri terhadap perbedaan kondisi beban.

Pada sistem kontrol PID kecepatan emningkat secara bertahap dan lebih stabil dibanding tanpa kontrol. Sistem berhasil mendekati *setpoint* dan mencapai *setpoint* yang diinginkan.

Sistem kontrol fuzzy PID menunjukkan kinerja yang terbaik. Kecepatan cepat naik dan mendekati *setpoint* lebih awal serta mampu menjaga kestabilan di sekitar nilai target dengan fluktuasi yang kecil. Sistem mampu menjaga kecepatan di sekitar *setpoint* yang mengindikasikan bahwa kontrol fuzzy PID memiliki kemampuan adaptif yang tinggi dan lebih responsif terhadap perubahan kondisi.

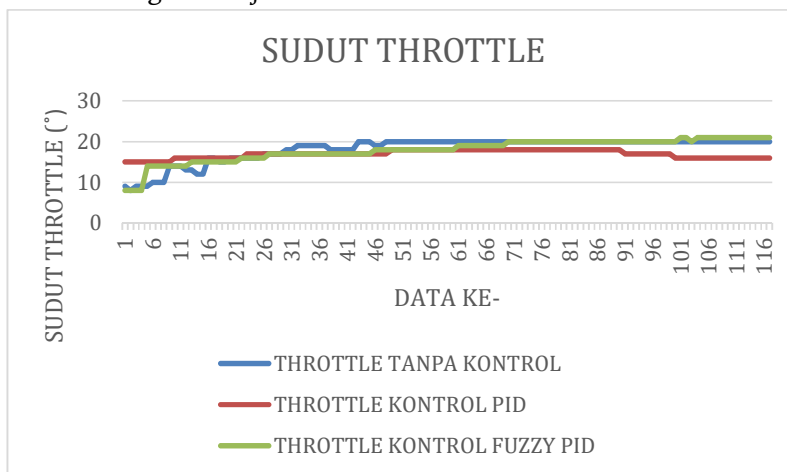
Pada pengujian dengan *setpoint* 3,78 knot, sistem tanpa kontrol menghasilkan nilai error sebesar 32%, sedangkan dengan kontrol PID menghasilkan nilai error sebesar 33%. Sementara itu kontrol fuzzy PID memberikan hasil yang lebih baik dengan menurunkan error menjadi 18%, menunjukkan kemampuan metode kontrol dalam menjaga kestabilan kecepatan.



Gambar 16. Perbandingan RPM Engine Setpoint 3,78 Knot

Gambar 16 menunjukkan grafik perbandingan RPM mesin ICE dalam tiga kondisi pengujian, yaitu tanpa kontrol, dengan kontrol PID dan kontrol fuzzy PID. Pada percobaan tanpa kontrol, RPM mesin meningkat secara lambat dan tidak stabil dengan fluktuasi yang cukup besar. RPM sempat mencapai sekitar 10.000 RPM namun tidak konsisten, hal ini menandakan bahwa tanpa adanya sistem kendali, mesin tidak mampu menjaga putaran secara stabil terhadap kebutuhan kecepatan kapal.

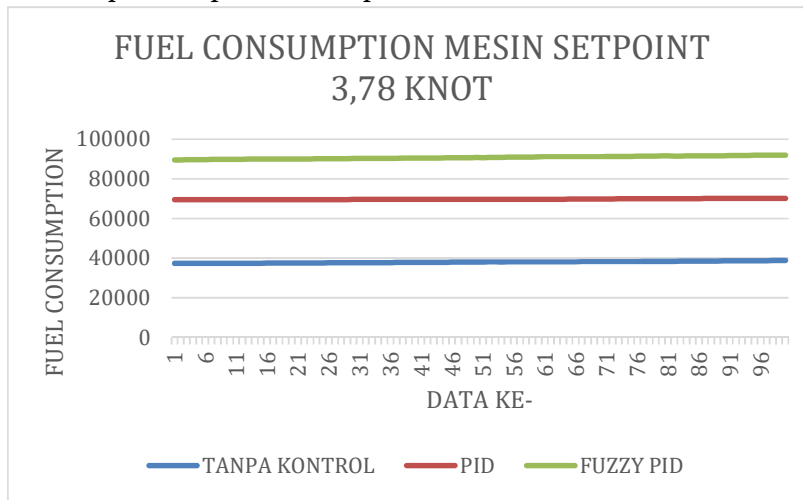
Kontrol PID menunjukkan peningkatan performa dengan kenaikan RPM yang lebih terarah. Walaupun masih terjadi fluktuasi dan RPM yang belum stabil, hal ini menunjukkan PID mampu memperbaiki respons sistem namun belum sepenuhnya adaptif. Sementara itu sistem kontrol fuzzy PID memperlihatkan performa terbaik. RPM mesin meningkat dengan cepat dan mampu mempertahankan kestabilan di sekitar 9.000-11.000 RPM. Fluktuasi yang ditimbulkan lebih kecil dan respons lebih halus dibanding percobaan sebelumnya. Hal ini mengindikasikan bahwa fuzzy PID lebih adaptif dalam mengatur kerja mesin.



Gambar 17 Sudut Throttle Setpoint 3,78 Knot

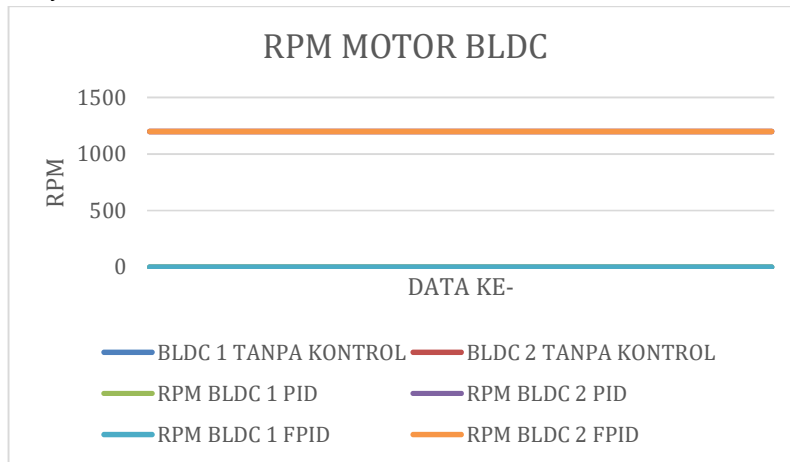
Gambar 17 memperlihatkan sudut throttle pada saat *setpoint* kecepatan 3,78 knot. Pada saat percobaan tanpa kontrol, sudut bukaan pada throttle terlihat tidak stabil. Sedangkan pada saat percobaan dengan kontrol PID, bukaan throttle naik dengan signifikan dan dapat

mempertahankan posisi throttle. Pada saat percobaan dengan kontrol fuzzy PID, throttle naik dengan signifikan dan dapat mempertahankan posisi throttle.



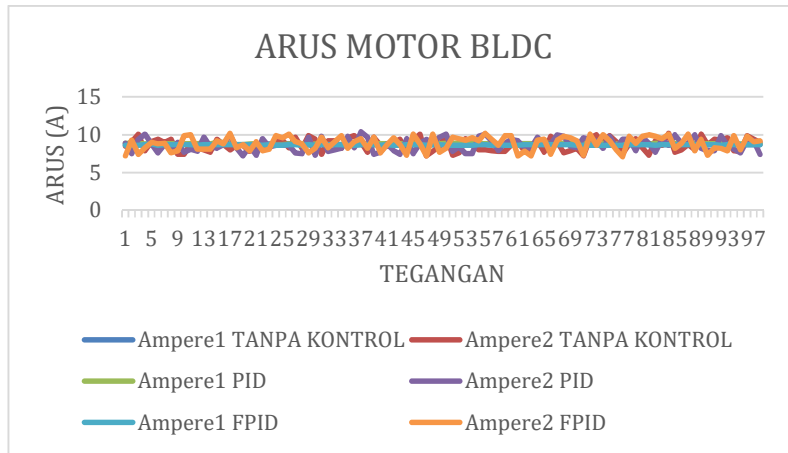
Gambar 18 Penggunaan Bahan Bakar Mesin ICE pada Setpoint 3,78 Knot

Gambar 18 menunjukkan grafik penggunaan bahan bakar pada mesin ICE selama percobaan dengan setpoint kecepatan 3,78 knot. Terlihat penggunaan bahan bakar pada saat percobaan di masing-masing kontrol. Saat percobaan tanpa kontrol, bahan bakar yang digunakan sebanyak 14,49 mL, sedangkan pada saat percobaan dengan menggunakan kontrol PID digunakan sebanyak 6,44 mL, dan pada saat melakukan percobaan dengan kontrol fuzzy PID menggunakan sebanyak 23,39 mL.



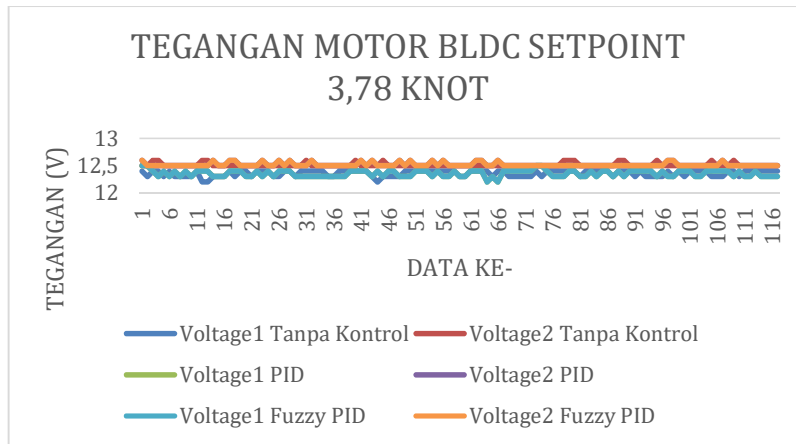
Gambar 19 RPM Motor BLDC Setpoint 3,78 Knot

Gambar 19 memperlihatkan grafik RPM motor BLDC pada saat setpoint kecepatan 3,78 knot. Pada saat dilakukan percobaan, tidak ada perubahan kenaikan RPM pada motor BLDC, yang menandakan bahwa motor BLDC tetap dalam keadaan *stanby*.



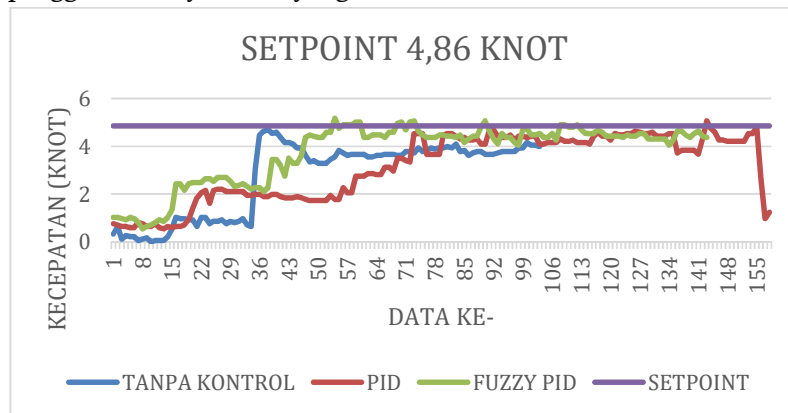
Gambar 20 Arus Motor BLDC Setpoint 3,78 Knot

Gambar 20 memperlihatkan grafik arus motor BLDC pada saat *setpoint* kecepatan 3,78 knot. Grafik arus menunjukkan bahwa meskipun motor BLDC tidak aktif bekerja, masih terdapat aliran arus yang masuk ke motor BLDC.



Gambar 21 Tegangan Motor BLDC Setpoint 3,78 Knot

Gambar 21 memperlihatkan grafik tegangan motor BLDC pada *setpoint* kecepatan 3,78 knot. Grafik menunjukkan bahwa tegangan pada motor BLDC pada saat melakukan percobaan tanpa kontrol maupun dengan kontrol berada pada tegangan sekitar 12 volt. Hal ini mengindikasikan bahwa tidak ada penggunaan daya listrik yang diberikan ke motor.

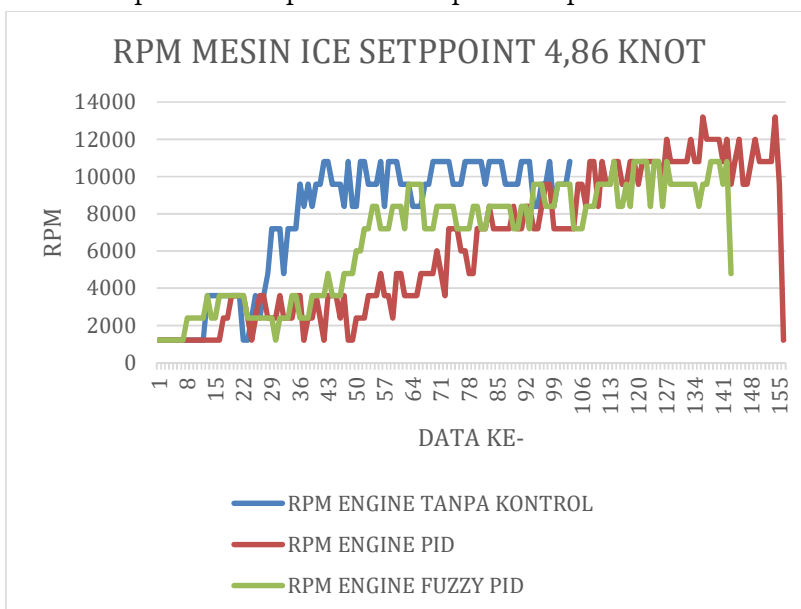


Gambar 22. Perbandingan Setpoint Kecepatan 4,86 Knot

Gambar 22 menunjukkan grafik perbandingan kecepatan sistem terhadap *setpoint* 4,86 knot dalam tiga kondisi pengujian, yaitu kondisi tanpa kontrol, dengan kontrol PID dan dengan kontrol fuzzy PID. Pada kondisi tanpa kontrol, kecepatan mengalami fluktuasi dan tidak mampu mencapai *setpoint* yang diinginkan. Hal ini menunjukkan bahwa tanpa sistem kendali, mesin tidak mampu mempertahankan kecepatan mendekati *setpoint*.

Pengujian dengan kontrol PID menunjukkan respons yang baik, dengan kenaikan kecepatan yang lebih terarah menuju *setpoint* dan masih terdapat sedikit fluktuasi pada saat percobaan. Percobaan dengan menggunakan sistem kontrol fuzzy PID menunjukkan hasil yang paling optimal. Sistem dengan cepat dapat mencapai *setpoint* dan dapat mempertahankan kestabilan di sekitar *setpoint* dan dengan fluktuasi yang kecil. Pada grafik juga terlihat kemampuan adaptasi kontrol yang lebih baik dalam mengatur kecepatan, sehingga respon sistem lebih halus dan kecepatan tetap berada di sekitar *setpoint*.

Pada pengujian dengan *setpoint* kecepatan 4,86 knot, sistem tanpa kontrol menunjukkan nilai error tertinggi sebesar 43%. Penerapan kontrol PID menghasilkan nilai error sebesar 36%. Sedangkan kontrol fuzzy PID menghasilkan nilai error 23%, yang membuktikan bahwa metode ini lebih efektif dalam mempertahankan performa kecepatan tetap stabil.

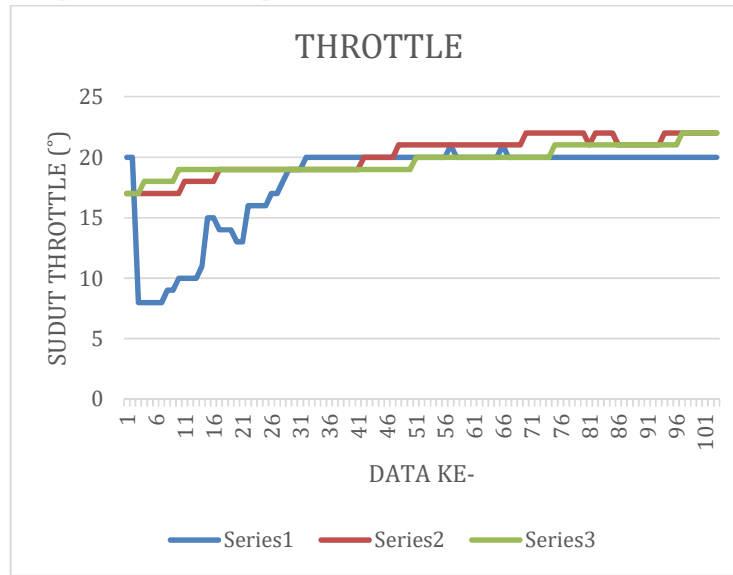


Gambar 23 Perbandingan RPM Kecepatan 4,86 Knot

Gambar 23 menunjukkan grafik RPM mesin hasil percobaan dengan *setpoint* kecepatan 4,86 knot yang dilakukan dalam tiga kondisi berbeda, yaitu kondisi tanpa kontrol, dengan kontrol PID dan dengan kontrol fuzzy PID. Pengujian tanpa kontrol menunjukkan kenaikan yang cukup cepat namun tidak terkontrol dengan baik, yang ditunjukkan dengan fluktuasi di sekitar angka tersebut. Kondisi ini mengindikasikan bahwa tanpa sistem pengendali, mesin bekerja tidak stabil dan tidak mampu menyesuaikan dengan kebutuhan daya untuk mencapai target.

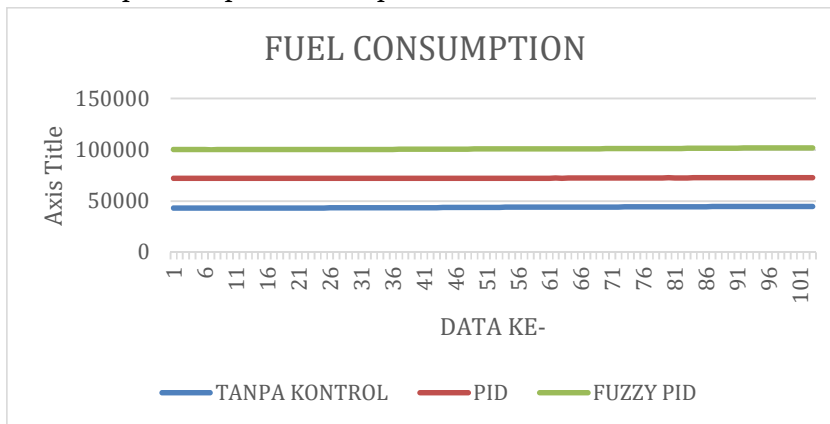
Percobaan dengan menggunakan kontrol PID memperlihatkan respons mesin yang lebih teratur, dengan peningkatan RPM yang bertahap dan masih terdapat fluktuasi yang cukup signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa PID memberikan perbaikan dibanding pengujian tanpa kontrol. Percobaan dengan kontrol fuzzy PID memberikan hasil paling stabil diantara percobaan sebelumnya. RPM mesin naik secara bertahap dengan fluktuasi yang lebih kecil. Kontrol fuzzy PID ini mampu mengadaptasi perubahan beban dengan lebih baik sehingga

menghasilkan kinerja mesin yang lebih konsisten dalam menjaga RPM mendekati nilai yang dibutuhkan untuk mempertahankan kecepatan mendekati *setpoint*.



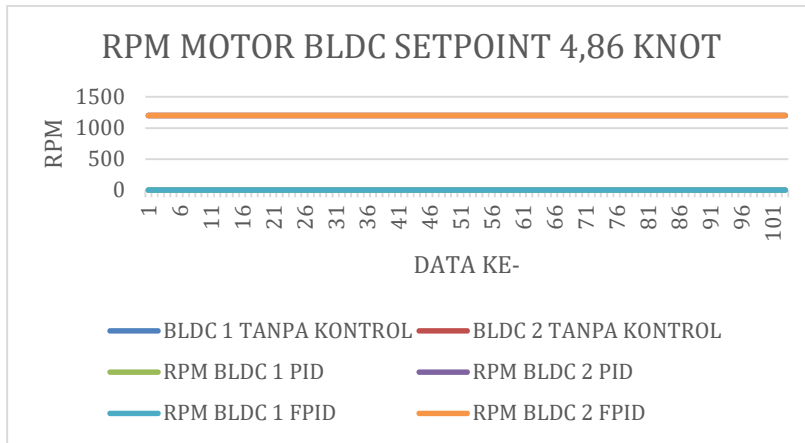
Gambar 24 Sudut Throttle *Setpoint* 4,86 Knot

Gambar 24 memperlihatkan sudut throttle pada saat *setpoint* kecepatan 3,78 knot. Pada saat percobaan tanpa kontrol, sudut bukaan pada throttle terlihat tidak stabil. Sedangkan pada saat percobaan dengan kontrol PID, bukaan throttle naik dengan signifikan dan dapat mempertahankan posisi throttle. Pada saat percobaan dengan kontrol fuzzy PID, throttle naik dengan signifikan dan dapat mempertahankan posisi throttle.



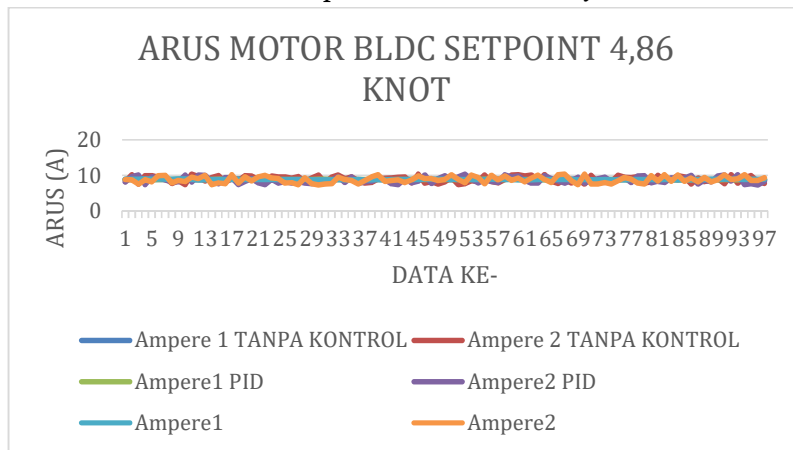
Gambar 25 Penggunaan Bahan Bakar Mesin ICE *Setpoint* 4,86 Knot

Gambar 25 menunjukkan grafik penggunaan bahan bakar selama proses percobaan dengan *setpoint* kecepatan 4,86 knot. Terlihat penggunaan bahan bakar pada saat percobaan di masing-masing kontrol. Saat percobaan tanpa kontrol, bahan bakar yang digunakan sebanyak 16,1 mL, saat percobaan dengan kontrol PID bahan bakar yang digunakan sebanyak 7,05 mL, dan saat percobaan dengan menggunakan kontrol fuzzy PID bahan bakar yang digunakan sebanyak 15,92 mL.



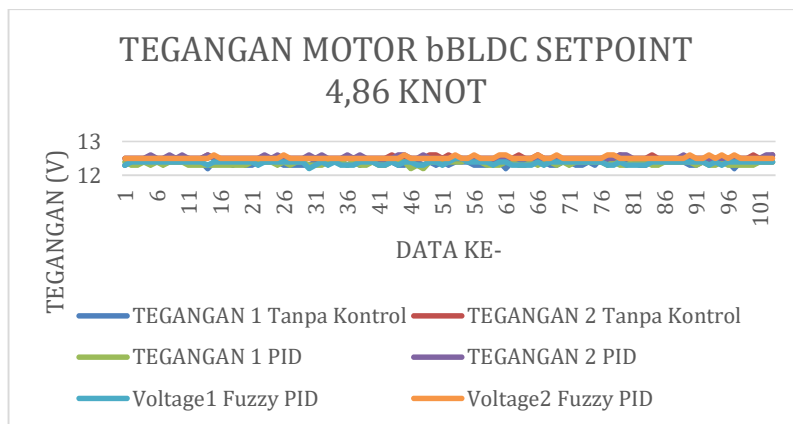
Gambar 26 RPM Motor BLDC *Setpoint* 4,86 Knot

Gambar 26 memperlihatkan grafik RPM motor BLDC pada saat *setpoint* kecepatan 4,86 knot. Pada saat dilakukan percobaan, tidak ada perubahan kenaikan RPM pada motor BLDC, yang menandakan bahwa motor BLDC tetap dalam keadaan *stanby*.



Gambar 27. Arus Motor BLDC *Setpoint* 4,86 Knot

Gambar 27 memperlihatkan grafik arus motor BLDC pada saat *setpoint* kecepatan 4,86 knot. Grafik arus menunjukkan bahwa meskipun motor BLDC tidak aktif bekerja, masih terdapat aliran arus yang masuk ke motor BLDC.

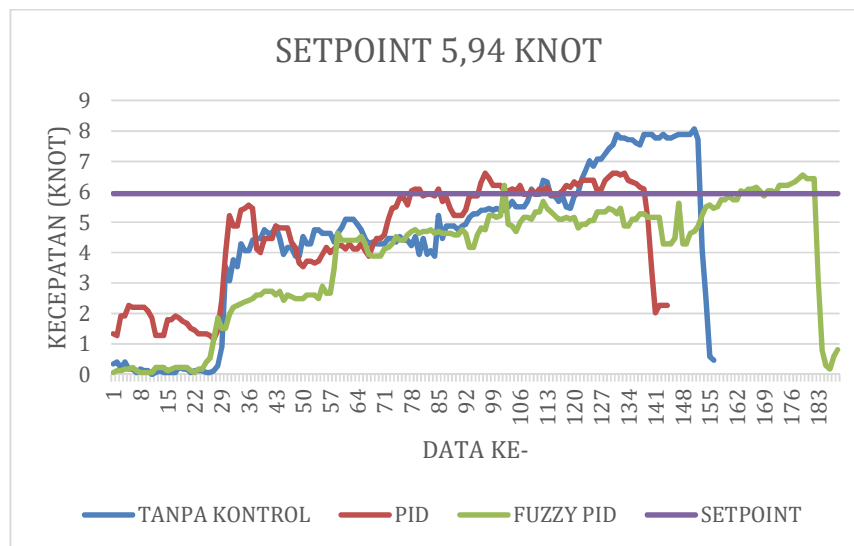


Gambar 28. Tegangan Motor BLDC *Setpoint* 4,86 Knot

Gambar 28 memperlihatkan grafik tegangan motor BLDC pada *setpoint* kecepatan 4,86 knot. Grafik menunjukkan bahwa tegangan pada motor BLDC pada saat melakukan percobaan tanpa kontrol maupun dengan kontrol berada pada tegangan sekitar 12 volt. Hal ini mengindikasikan bahwa tidak terpakainya daya listrik yang diberikan ke motor.

Analisis Pengujian Kecepatan Cepat

Pada saat pengujian kecepatan tinggi tanpa kontrol, sistem menunjukkan respons yang tidak optimal.



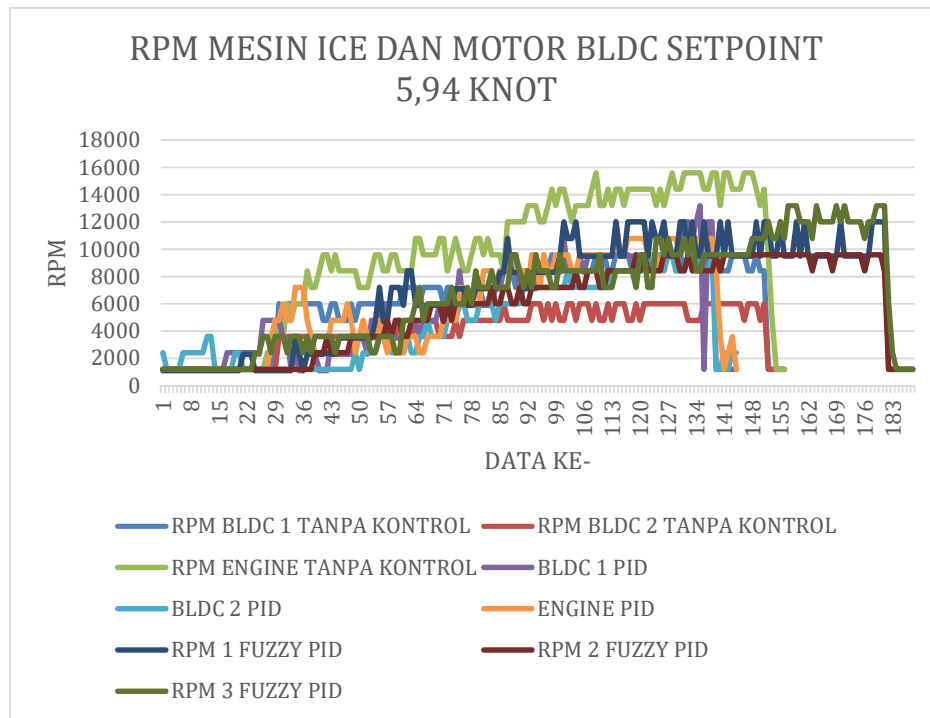
Gambar 29. Perbandingan Kecepatan *Setpoint* 5,94 Knot

Gambar 29 menunjukkan grafik perbandingan kecepatan kapal dengan *setpoint* 5,94 knot pada tiga kondisi pengujian, yaitu tanpa kontrol, dengan kontrol PID dan dengan kontrol fuzzy PID. Pada pengujian tanpa kontrol kecepatan kapal mengalami kenaikan namun tidak stabil dan cenderung mengalami fluktuasi yang besar. Hal ini mengindikasikan bahwa tanpa adanya sistem kendali, kapal sulit mempertahankan kecepatan mendekati *setpoint*.

Pengujian dengan kontrol PID menunjukkan performa yang lebih baik dengan kenaikan kecepatan yang lebih halus dibandingkan tanpa kontrol. Namun masih terdapat overshoot dan fluktuasi di sekitar *setpoint*, hal ini menandakan keterbatasan dalam menjaga kestabilan di kondisi tertentu. Sementara itu, percobaan dengan menggunakan kontrol fuzzy PID menunjukkan respons yang paling mendekati *setpoint* dengan laju kapal yang lebih terkendali dan fluktuasi yang kecil. Meskipun masih terdapat adanya deviasi, sistem fuzzy PID mampu mengadaptasi perubahan kondisi dengan baik, dengan menjaga kecepatan kapal lebih dekat pada *setpoint* secara lebih stabil dibandingkan percobaan sebelumnya.

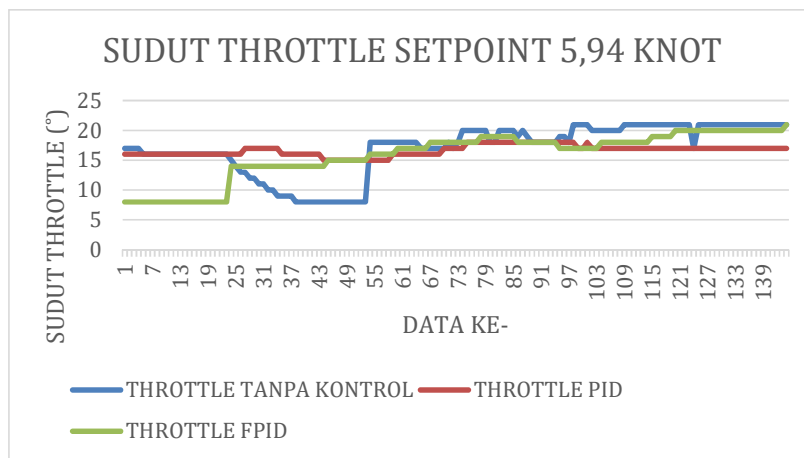
Pada pengujian dengan *setpoint* kecepatan 5,94 knot, sistem tanpa kontrol menghasilkan error sebesar 31%, sedangkan penerapan kontrol PID menghasilkan error sebesar 29%. Namun, penerapan kontrol fuzzy PID justru menghasilkan error yang paling tinggi yaitu 40%, hal ini mengindikasikan bahwa penerapan fuzzy pada parameter ini masih belum optimal, sehingga sistem belum mampu menjaga kecepatan dengan baik.

Gambar 4.152 menunjukkan grafik perbandingan RPM mesin ICE dan motor BLDC pada saat *setpoint* kecepatan 5,94 knot pada tiga kondisi pengujian, yaitu tanpa kontrol, dengan kontrol PID dan dengan kontrol fuzzy PID. Pada kondisi tanpa kontrol, RPM mengalami kenaikan yang cukup signifikan namun tidak stabil dan menunjukkan adanya fluktuasi. Hal ini menunjukkan bahwa ketika percobaan tanpa kontrol, mesin ICE dan motor BLDC sulit mencapai kestabilan pada RPM yang diinginkan.



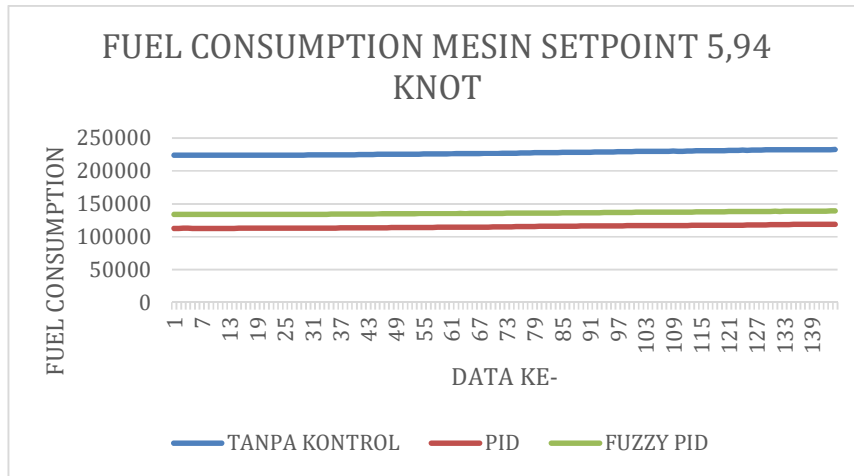
Gambar 30. Perbandingan RPM Setpoint Kecepatan 5,94 Knot

Ketika pengujian dengan kontrol PID, respons RPM menjadi lebih terarah walaupun masih terdapat overshoot dan sedikit osilasi. Pengujian dengan kontrol PID menunjukkan performa sistem yang baik. RPM meningkat dengan pola yang lebih halus dan cepat mencapai *setpoint* dan dapat bertahan mendekati *setpoint* dengan fluktuasi yang lebih kecil. Hal ini menandakan bahwa fuzzy PID mampu mengadaptasi perubahan beban dengan lebih baik, menjaga RPM mesin ICE dan motor BLDC lebih stabil.



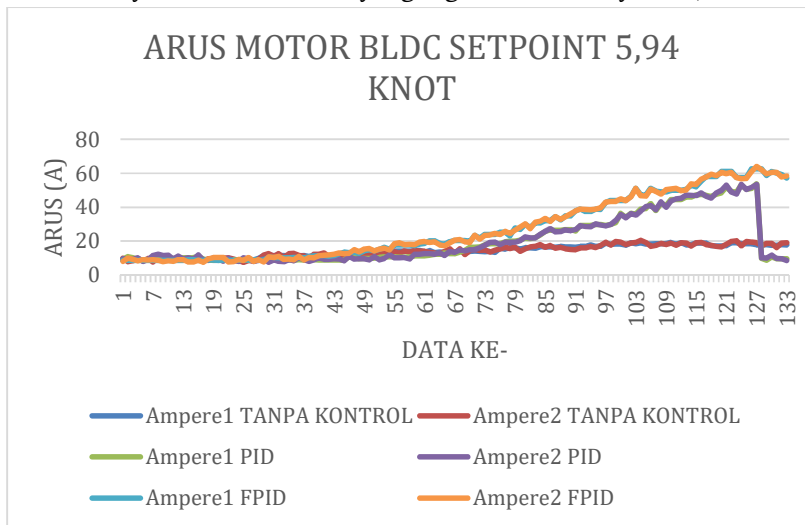
Gambar 31. Sudut Throttle Setpoint 5,94 Knot

Gambar 31 memperlihatkan sudut throttle pada saat *setpoint* kecepatan 5,94 knot. Pada saat percobaan tanpa kontrol, sudut bukaan pada throttle terlihat tidak stabil. Sedangkan pada saat percobaan dengan kontrol PID, bukaan throttle naik dengan signifikan dan dapat mempertahankan posisi throttle. Pada saat percobaan dengan kontrol fuzzy PID, throttle naik dengan signifikan dan dapat mempertahankan posisi throttle.



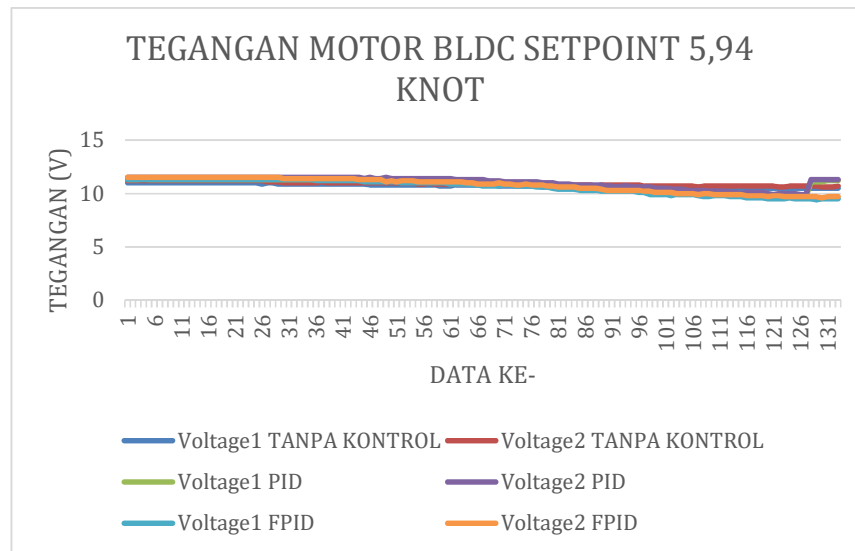
Gambar 32. Bahan Bakar Mesin ICE *Setpoint* 5,94 Knot

Gambar 32 menunjukkan grafik penggunaan bahan bakar selama pengujian pada *setpoint* 5,94 knot. Dari hasil pengujian terlihat bahwa jumlah bahan bakar yang terpakai berbeda pada setiap kontrol. Pada percobaan tanpa kontrol, konsumsi bahan bakar mencapai 86,52 mL. Pada percobaan dengan kontrol PID, konsumsi bahan bakar 59,69 mL. Sedangkan percobaan dengan menggunakan kontrol fuzzy PID bahan bakar yang digunakan sebanyak 54,97 mL.



Gambar 33. Arus Motor BLDC *Setpoint* 5,94 Knot

Gambar 33 merupakan grafik hasil dari pengujian dengan *setpoint* kecepatan 5,94 knot. Pada pengujian tanpa kontrol, nilai arus bekisar 15-20 ampere. Pada pengujian dengan kontrol PID, arus meningkat bertahap hingga 50 ampere, menandakan peningkatan kinerja motor BLDC untuk dapat mempertahankan kecepatan. Pengujian dengan kontrol fuzzy PID, arus mengalami peningkatan yang lebih cepat hingga mencapai 60 ampere, yang mengindikasikan bahwa sistem memberikan respons lebih agresif dan adaptif terhadap perubahan kecepatan.



Gambar 34 Tegangan Motor BLDC *Setpoint* 5,94 knot

Gambar 34 memperlihatkan grafik tegangan motor BLDC pada *setpoint* kecepatan 5,94 knot. Pada saat pengujian tanpa kontrol, tegangan ada di sekitar 11,5 V – 12V. Percobaan dengan kontrol PID dan Fuzzy PID mengalami penurunan yang signifikan hingga 10V, hal ini mencerminkan beban kerja motor yang lebih besar untuk mencapai kecepatan *setpoint* yang diinginkan.

Kajian Produk Akhir

Berdasarkan analisa hasil yang telah dilakukan, maka kajian dari penelitian ini adalah.

1. Komponen yang digunakan berupa mesin ICE, motor BLDC dan motor servo dapat berjalan dengan baik, dengan pemroses mikrokontroler yang digunakan berupa ESP32, STM32, *Electric Speed Controller* dan *pixhawk* juga dapat mengirimkan data dengan baik, serta sensor-sensor yang digunakan menunjukkan nilai error di bawah 5%, dimana nilai ini membuktikan bahwa sensor yang digunakan berupa sensor arus, sensor tegangan, sensor photodiode dan sensor flowmeter dalam kondisi yang baik.
2. Percobaan dilakukan dalam lima *setpoint* kecepatan, yaitu *setpoint* kecepatan 2,16 knot, 2,7 knot, 3,78 knot, 4,86 knot dan 5,94 knot. percobaan pada 5 kecepatan tersebut dilakukan dengan tiga metode kontrol percobaan, yaitu percobaan tanpa kontrol, percobaan dengan kontrol PID dan percobaan dengan kontrol fuzzy PID. Masing-masing percobaan dilakukan dengan memberikan hambatan berupa gelombang dengan ketinggian 4 cm, 10 cm dan 15 cm. Tujuan memberikan hambatan berupa gelombang adalah untuk menguji kemampuan sistem dalam mempertahankan kecepatan dan kestabilannya.
3. Hasil dari percobaan yang telah dilakukan mendapatkan hasil bahwa percobaan pada *setpoint* kecepatan 2,16 knot tanpa menggunakan kontrol menghasilkan nilai error sebesar 24%, sedangkan percobaan dengan kontrol PID menghasilkan nilai error sebesar 6% dan percobaan dengan fuzzy PID menghasilkan nilai error sebesar 26%. Pada percobaan dengan *setpoint* 2,7 knot, percobaan tanpa kontrol menghasilkan nilai error sebesar 22%, sedangkan percobaan dengan kontrol PID menghasilkan nilai error sebesar 47%, dan percobaan dengan kontrol fuzzy PID menghasilkan nilai error sebesar 5%. Percobaan dengan *setpoint* 3,78 knot, percobaan tanpa kontrol menghasilkan nilai error sebesar 32% dengan penggunaan bahan bakar sebanyak 14,49 mL, sedangkan percobaan dengan kontrol PID menghasilkan nilai error sebesar 33% dengan penggunaan bahan bakar sebanyak 6,44 mL, dan percobaan

dengan kontrol fuzzy PID menghasilkan nilai error sebesar 18% dengan penggunaan bahan bakar sebanyak 23,39 mL. Percobaan dengan *setpoint* 4,86 knot tanpa kontrol menghasilkan nilai error sebesar 43% dengan penggunaan bahan bakar sebanyak 16,1 mL, sedangkan percobaan dengan kontrol PID menghasilkan nilai error sebesar 36% dengan penggunaan bahan bakar sebanyak 7,05, dan percobaan dengan kontrol fuzzy PID menghasilkan nilai error sebesar 23% dengan penggunaan bahan 15,92 mL. Percobaan dengan *setpoint* 5,94 knot tanpa kontrol menghasilkan nilai error sebesar 31% dengan penggunaan bahan bakar sebanyak 86,52 mL, sedangkan percobaan dengan kontrol PID menghasilkan nilai error sebesar 29% dengan penggunaan bahan bakar sebanyak 59,69 mL, dan percobaan dengan kontrol fuzzy PID menghasilkan nilai error sebesar 40% dengan penggunaan bahan bakar sebanyak 54,97 mL.

4. Berdasarkan hasil percobaan yang telah dilakukan, percobaan tanpa menggunakan kontrol menghasilkan nilai rata-rata error sebesar 30,4% dengan rata-rata penggunaan bahan bakar sebanyak 23,59 mL. Percobaan dengan menggunakan kontrol PID menghasilkan nilai rata-rata error sebesar 30,2% dengan rata-rata penggunaan bahan bakar 14,76 mL. Percobaan dengan kontrol fuzzy PID menghasilkan nilai rata-rata error sebesar 22,4% dengan rata-rata penggunaan bahan bakar 18,98 mL. Hasil dari percobaan yang dilakukan, penggunaan kontrol PID lebih efektif dalam penggunaan bahan bakar, namun kurang efektif untuk mengurangi error pada kecepatan kapal. Sebaliknya penggunaan optimalisasi dengan kontrol fuzzy PID terbukti lebih efektif dalam mengurangi error kecepatan kapal namun dengan konsumsi bahan bakar yang lebih banyak.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, penerapan sistem kontrol Fuzzy-PID pada kapal dengan sistem propulsi hibrida menunjukkan peningkatan signifikan dalam menjaga kestabilan kecepatan kapal pada berbagai mode operasi dan kondisi gelombang. Temuan utama menunjukkan bahwa kontrol Fuzzy-PID mampu menurunkan rata-rata error kecepatan hingga 22,4%, lebih baik dibandingkan tanpa kontrol maupun kontrol PID konvensional. Namun, dari sisi efisiensi bahan bakar, kontrol PID masih menghasilkan konsumsi bahan bakar terendah, sedangkan kontrol Fuzzy-PID cenderung meningkatkan konsumsi bahan bakar pada beberapa *setpoint* kecepatan. Hal ini menandakan bahwa meskipun Fuzzy-PID efektif dalam mengurangi error kecepatan, optimalisasi parameter masih diperlukan agar efisiensi energi dapat tercapai secara bersamaan dengan kestabilan kecepatan kapal.

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan, di antaranya pengujian hanya dilakukan pada prototipe kapal trimaran dalam lingkungan sungai berarus tenang dan belum mengakomodasi variasi kondisi laut yang lebih kompleks. Selain itu, parameter Fuzzy-PID yang digunakan belum dioptimalkan secara menyeluruh untuk setiap mode kecepatan dan kondisi gelombang, sehingga hasil konsumsi bahan bakar belum sepenuhnya efisien. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan melakukan pengujian pada skala kapal yang lebih besar dan di lingkungan laut terbuka, serta mengembangkan metode optimasi parameter Fuzzy-PID secara adaptif. Implikasi praktis dari penelitian ini adalah sistem kontrol Fuzzy-PID dapat menjadi solusi adaptif untuk pengendalian kecepatan kapal hibrida, namun perlu penyesuaian lebih lanjut agar dapat diimplementasikan secara efisien dan ekonomis pada kapal komersial.

DAFTAR PUSTAKA

- Azmi, M., Munif, N., Teknik, D., Perkapalan, S., & Kelautan, F. T. (2020). Pengendalian kecepatan sistem propulsi hybrid pada model kapal trimaran berbasis neural network.
- Cresswell, J. W., & Creswell, J. D. (2023). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (6th ed.). SAGE Publications. <https://doi.org/10.4135/9781071878827>
- Emzir, E. (2022). *Metodologi penelitian pendidikan*. Rajawali Pers. <https://doi.org/10.2991/assehr.k.210326.002>
- Inal, O. B., Charpentier, J. F., & Deniz, C. (2022). Hybrid power and propulsion systems for ships: Current status and future challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 156, 111965. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111965>
- Kurniawan, E., Koehardono, E. S., Kurniawan, A., & Kusuma, I. R. (2024). Literature review of hybrid propulsion system on ship. In *IEEE 2nd International Conference on Electrical Engineering, Computer and Information Technology (ICEECIT)* (pp. 239–244).
- Maghfiroh, H., Ahmad, M., Ramelan, A., & Adriyanto, F. (2022). Fuzzy-PID in BLDC motor speed control using MATLAB/Simulink. *Journal of Robotics and Control (JRC)*, 3(1), 8–13. <https://doi.org/10.18196/jrc.v3i1.10964>
- Muqorrobin, I., Kristiyono, A. E., & Prawoto, A. (2024). Perancangan sistem kontrol jarak jauh berbasis PID menggunakan Blynk pada Gandrum di kapal Politeknik Pelayaran Surabaya, Indonesia. *Internet of Things (IoT)*, 3(3).
- Naramurti, R. M. R., Arswendo, B., & Santosa, A. W. B. (2016). Perancangan kapal trimaran untuk penghubung pantai-pantai wisata di Kabupaten Pacitan. *Jurnal Teknik Perkapalan*, 4(1), 237–245.
- Sudaryono, A. (2021). *Metodologi penelitian pendidikan*. Rajawali Pers. <https://doi.org/10.2991/assehr.k.210326.001>
- Sugiyono. (2022). *Metode penelitian kuantitatif, kualitatif, dan R&D*. Alfabeta. <https://doi.org/10.31227/osf.io/7xq2g>
- Yahya, S., Fauzi, A., Al Tahtawi, A. R., Ilman, S. M., Elektro, J. T., Bandung, N., Gegerkalong Hilir, J., & Barat, B. (2024). Kendali kecepatan motor induksi 3-fasa dengan metode adaptif Fuzzy-PID. *Telka*, 10(1), 1–11.