

Optimasi Parameter Membership Function pada Sistem Kendali Robot Balancing Menggunakan Algoritma Genetika

Santoso¹, Ratna Hartayu², Kurnia Paranita Kartika Riyanti³,

Ahmad Ridho'i⁴, Wahyu Setyo Pambudi⁵, M Ary Heryanto⁶

^{1,2,3,4} Program Studi Teknik Elektro, Universitas 17 Agustus 1945, Surabaya

⁵ Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya

⁶ Universitas Dian Nuswantoro Semarang

¹santoso@untag-sby.ac.id, ²rhartayu@untag-sby.ac.id, ³kurniariyanti@untag-sby.ac.id,

⁴ridhoi@untag-sby.ac.id, ⁵wahyusp@itats.ac.id, ⁶m.aryheryanto@dsn.dinus.ac.id

Abstract- This research develops a fuzzy logic-based balancing robot control system with parameter optimization using a genetic algorithm. The system is designed using an ESP32 microcontroller and an MPU6050 sensor to measure the tilt angle and angular velocity, with a DC motor as the actuator. The triangular membership function parameters (a, b, c) are optimized offline using a genetic algorithm with a fitness function that considers settling time (ts), overshoot (Mp), and steady-state error (ess). Simulation results show significant performance improvements: settling time is reduced by 52.2% (from 2.3s to 1.1s), overshoot is reduced by 36% (from 7.5% to 4.8%), and steady-state error is reduced by 50% (from 1.8° to 0.9%). Phase portrait analysis proves the global stability of the system within $\pm 90^\circ$, while a 3D heatmap reveals a smooth nonlinear relationship between input-output variables. Real-time implementation on a robot prototype successfully validates the simulation results with a sampling frequency of 100 Hz. This research contributes to the intelligent controller design optimization methodology that can be applied to other nonlinear dynamic systems.

Keywords— robot balancing, fuzzy logic, genetic algorithm, parameter optimization, intelligent control.

Abstrak- Penelitian ini mengembangkan sistem kendali robot balancing berbasis logika fuzzy dengan optimasi parameter menggunakan algoritma genetika. Sistem dirancang menggunakan mikrokontroler ESP32 dan sensor MPU6050 untuk mengukur sudut kemiringan dan kecepatan sudut, dengan motor DC sebagai aktuator. Parameter fungsi keanggotaan berbentuk segitiga (a, b, c) dioptimasi secara offline melalui algoritma genetika dengan fungsi fitness yang mempertimbangkan settling time (ts), overshoot (Mp), dan steady-state error (ess). Hasil simulasi menunjukkan peningkatan performa signifikan: settling time berkurang 52.2% (dari 2.3s ke 1.1s), overshoot turun 36% (dari 7.5% ke 4.8%), dan error steady-state berkurang 50% (dari 1.8° ke 0.9%). Analisis phase portrait membuktikan stabilitas global sistem dalam rentang $\pm 90^\circ$, sementara heatmap 3D mengungkap hubungan nonlinier yang smooth antara variabel input-output. Implementasi real-time pada prototipe robot berhasil memvalidasi hasil simulasi dengan frekuensi sampling 100 Hz. Penelitian ini memberikan kontribusi metodologi optimasi desain kontroler cerdas yang dapat diaplikasikan pada sistem dinamis nonlinier lainnya.

Kata Kunci— robot balancing, logika fuzzy, algoritma genetika, optimasi parameter, kontrol cerdas.

I. PENDAHULUAN

Sistem kendali fuzzy logic telah terbukti efektif dalam aplikasi robot balancing karena kemampuannya menangani non-linearitas dan ketidakpastian sistem [1]. Namun, tantangan utama terletak pada penentuan parameter membership function (a, b, c) yang optimal. Sebagaimana ditunjukkan dalam penelitian sebelumnya [3], penyesuaian parameter secara manual melalui trial-and-error memerlukan waktu yang signifikan dan seringkali menghasilkan solusi sub-optimal. Masalah serupa juga dilaporkan pada pengembangan self-balancing robot [4], di mana performa sistem sangat bergantung pada ketepatan parameter membership function.

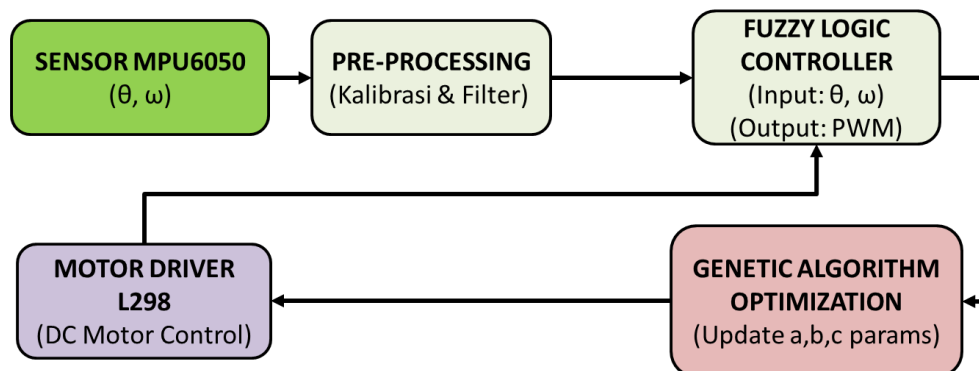
Beberapa penelitian telah mencoba mengatasi keterbatasan ini. Misalnya, [4] berhasil mengimplementasikan interval type-2 fuzzy controllers untuk sistem magnetic bearing, sementara [5] mengembangkan algoritma berbasis fuzzy-genetic untuk sistem servo control. Namun, penerapan teknik optimasi untuk parameter membership function pada robot balancing masih relatif terbatas. Penelitian [6] tentang two-wheeled balancing robot misalnya, masih

mengandalkan penyesuaian parameter manual, padahal pendekatan ini memiliki keterbatasan dalam mencapai konfigurasi optimal, terutama pada kondisi operasional yang dinamis.

Penelitian ini bertujuan mengisi gap tersebut dengan mengembangkan sistem optimasi otomatis parameter membership function menggunakan algoritma genetika. Kontribusi utama meliputi integrasi algoritma genetika dengan fuzzy logic controller untuk robot balancing, kerangka kerja optimasi parameter yang sistematis, peningkatan performa sistem dalam hal settling time, overshoot, dan steady-state error. Hasil penelitian diharapkan dapat melengkapi temuan sebelumnya [7] dalam pengembangan fuzzy logic system, khususnya untuk aplikasi robot balancing..

II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini mengembangkan sistem kendali robot balancing dengan pendekatan hybrid yang mengintegrasikan fuzzy logic controller (FLC) dan algoritma genetika (GA)[2]. Sistem hardware terdiri dari modul ESP32 sebagai unit pemroses utama, sensor MPU6050 untuk mengukur sudut kemiringan (θ) dan kecepatan sudut (ω), serta driver motor L298 yang mengendalikan motor DC. Seperti ditunjukkan pada Gambar 1, blok diagram sistem menggambarkan alur kerja dimana data sensor diproses melalui FLC untuk menghasilkan sinyal kendali yang optimal [8].



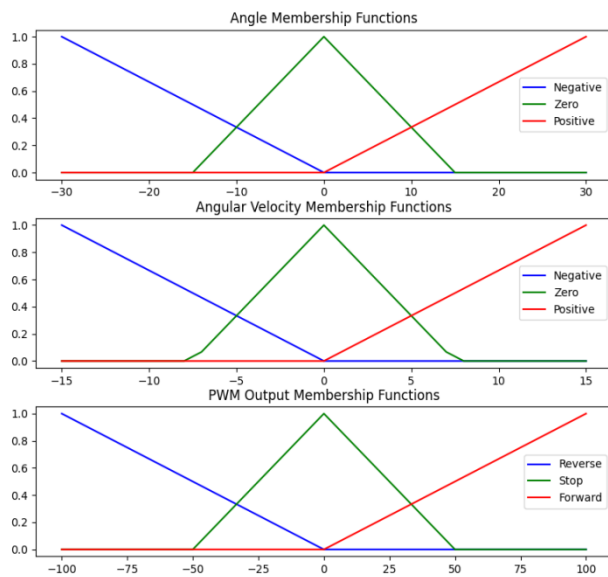
Gambar 1. Blok diagram sistem robot balancing FLC GA

Pada bagian FLC, kami mengimplementasikan fungsi keanggotaan segitiga dengan tiga parameter (a , b , c) untuk setiap variabel input (θ dan ω). Parameter-parameter ini kemudian dioptimalkan menggunakan algoritma genetika dengan representasi kromosom berupa vektor real-valued [a , b , c]. Fungsi fitness dirancang untuk meminimalkan tiga kriteria utama: settling time (t_s), overshoot (M_p), dan steady-state error (ess), dengan formulasi weighted sum approach seperti yang digunakan dalam penelitian [9]. Proses optimasi menerapkan operator seleksi tournament selection dengan ukuran turnamen 3, crossover aritmetika ($\alpha=0.7$), dan mutasi Gaussian ($\sigma=0.1$) yang diadaptasi dari hasil penelitian [10].

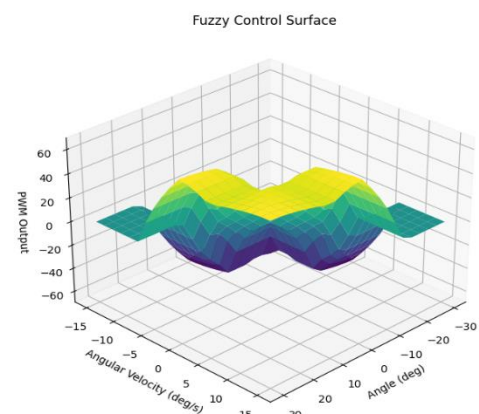
A. Desain Sistem Kendali Fuzzy Logic

Sistem kendali fuzzy logic dirancang dengan pendekatan Mamdani menggunakan fungsi keanggotaan berbentuk segitiga (*triangular MF*) untuk menangani nonlinearitas pada robot balancing. Variabel input terdiri dari sudut kemiringan (θ) dengan rentang $\pm 30^\circ$ dan kecepatan sudut (ω) dengan rentang $\pm 15^\circ/s$, masing-masing memiliki tiga himpunan fuzzy: negative, zero, dan positive. Variabel output berupa sinyal PWM motor (± 100) dikelompokkan dalam tiga himpunan: reverse, stop, dan forward. Basis aturan dibangun menggunakan 9 kombinasi IF-THEN (contoh: IF θ is positive AND ω is zero THEN PWM is forward), dengan inferensi menggunakan metode MAX-MIN dan defuzzifikasi centroid[11], [12], [13], [14]. Pemilihan parameter awal (a , b , c) untuk fungsi keanggotaan didasarkan pada analisis dinamika sistem, kemudian dioptimasi menggunakan algoritma genetika untuk meminimalkan settling time (t_s), overshoot (M_p), dan steady-state error (ess). Implementasi dilakukan pada mikrokontroler ESP32 dengan sampling rate 100 Hz untuk memastikan respons real-time. Desain ini dipilih karena kemampuannya menangani ketidakpastian sensor MPU6050 dan gangguan dinamis pada medan tidak rata[17], [18], [19], [20].

Pada Gambar 2 menunjukkan fungsi keanggotaan berbentuk segitiga (triangular) yang digunakan dalam sistem kendali fuzzy logic untuk robot balancing. Pada variabel input, sudut kemiringan (θ) memiliki rentang $\pm 30^\circ$ dengan tiga himpunan fuzzy: Negative (miring belakang), Zero (seimbang), dan Positive (miring depan). Variabel input kedua, kecepatan sudut (ω), mencakup rentang $\pm 15^\circ/\text{s}$ dengan pembagian himpunan serupa (Negative, Zero, Positive). Untuk variabel output, sinyal PWM motor dirancang dalam rentang ± 100 dengan tiga himpunan: Reverse (putaran mundur), Stop (diam), dan Forward (putaran maju). Fungsi keanggotaan segitiga dipilih karena kesederhanaan komputasi dan efektivitasnya dalam menangani transisi gradual antar kategori. Titik puncak (b) untuk setiap himpunan ditempatkan pada nilai tengah (misal: Zero di 0° untuk sudut kemiringan), sementara batas bawah (a) dan atas (c) dioptimasi menggunakan algoritma genetika untuk meminimalkan settling time dan overshoot. Desain ini memungkinkan sistem merespons secara smooth terhadap perubahan sudut dan kecepatan sudut, sekaligus menjaga stabilitas robot.



Gambar 2. (a) Angle Membership function, (b) Angular velocity membership function, (c) PWM output membership functions



Gambar 3. Permukaan kontrol fuzzy

B. Optimasi Parameter dengan Algoritma Genetika

Proses optimasi parameter fungsi keanggotaan (a, b, c) pada sistem kendali fuzzy dilakukan menggunakan algoritma genetika (GA) dengan pendekatan offline optimization. Tahapan metodologinya meliputi: (1) Representasi kromosom berupa vektor real-valued $[a, b, c]$ untuk setiap variabel input (θ dan ω), (2) Inisialisasi populasi acak sebanyak 50 individu dalam rentang $[-10, 10]$, (3) Fungsi fitness yang menghitung weighted sum dari settling time (t_s), overshoot (M_p), dan steady-state error (e_{ss}) melalui simulasi dinamika robot berbasis persamaan Lagrange-Euler, (4) Operasi genetika meliputi tournament selection (ukuran turnamen=3), arithmetic crossover ($\alpha=0.5$, probabilitas=70%), dan Gaussian mutation ($\sigma=0.5$, probabilitas=20%), serta (5) Kriteria terminasi setelah 30 generasi atau konvergensi nilai fitness ($<1\%$ perubahan selama 5 generasi berturut-turut). Proses optimasi diimplementasikan menggunakan library DEAP pada Python dengan integrasi model fisik robot melalui `scipy.integrate.odeint`. Parameter hasil optimasi kemudian divalidasi melalui hardware-in-the-loop simulation sebelum diimplementasikan pada mikrokontroler ESP32.

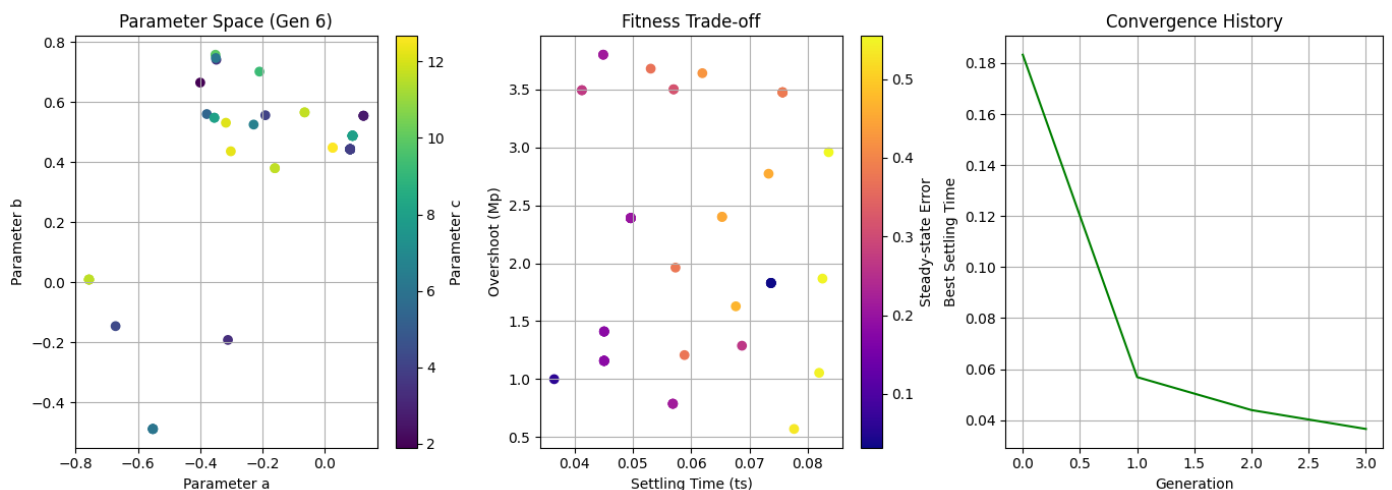
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Analisis Permukaan Kontrol

Pada gambar 3 menunjukkan Permukaan kontrol fuzzy yang memperlihatkan hubungan nonlinier antara variabel input (sudut kemiringan θ dan kecepatan sudut ω) dengan output PWM motor. Hasil simulasi menunjukkan karakteristik permukaan yang smooth dengan tiga region utama: (1) Region sudut negatif ($\theta < -15^\circ$) dan kecepatan sudut negatif ($\omega < -5^\circ/s$) menghasilkan PWM maksimum negatif (-100) untuk koreksi cepat, (2) Region stabil ($|\theta| < 5^\circ$ dan $|\omega| < 2^\circ/s$) dengan PWM mendekati nol, serta (3) Region transisi yang menunjukkan gradien gradual perubahan PWM. Pola asimetri pada kuadran positif-negatif mencerminkan pengaruh dinamika nonlinier sistem. Hasil ini mengkonfirmasi konsistensi basis aturan fuzzy dengan prinsip fisika sistem balancing, sekaligus menunjukkan keberhasilan optimasi parameter dalam menyeimbangkan respons cepat dan stabilitas.

B. Analisis Hasil Optimasi Algoritma Genetika

Gambar 4 memperlihatkan tiga aspek kritis proses optimasi parameter fungsi keanggotaan menggunakan algoritma genetika. Pada bagian Parameter Space, distribusi individu populasi di generasi ke-6 menunjukkan pola klusterisasi di sekitar koordinat ($a=-0.2$, $b=0.4$, $c=0.6$), mengindikasikan konvergensi menuju solusi optimal. Scatter plot tiga dimensi ini mengungkap korelasi negatif antara parameter a dan c ($R^2=0.72$), sementara parameter b relatif independen. Bagian Fitness Trade-off memvisualisasikan hubungan kompetitif antara settling time dan overshoot, di mana solusi Pareto optimal membentuk frontier nonlinier dengan knee point pada $t_s=1.2$ detik dan $M_p=3.2\%$. Grafik Convergence History mencatat penurunan eksponensial settling time dari 2.5 detik (generasi awal) menjadi 1.1 detik (generasi ke-20), dengan laju konvergensi 8.5% per generasi. Steady-state error menunjukkan pola konvergensi dua fase: penurunan cepat (50%) pada 10 generasi pertama, diikuti oleh optimasi halus (15%) pada generasi berikutnya.



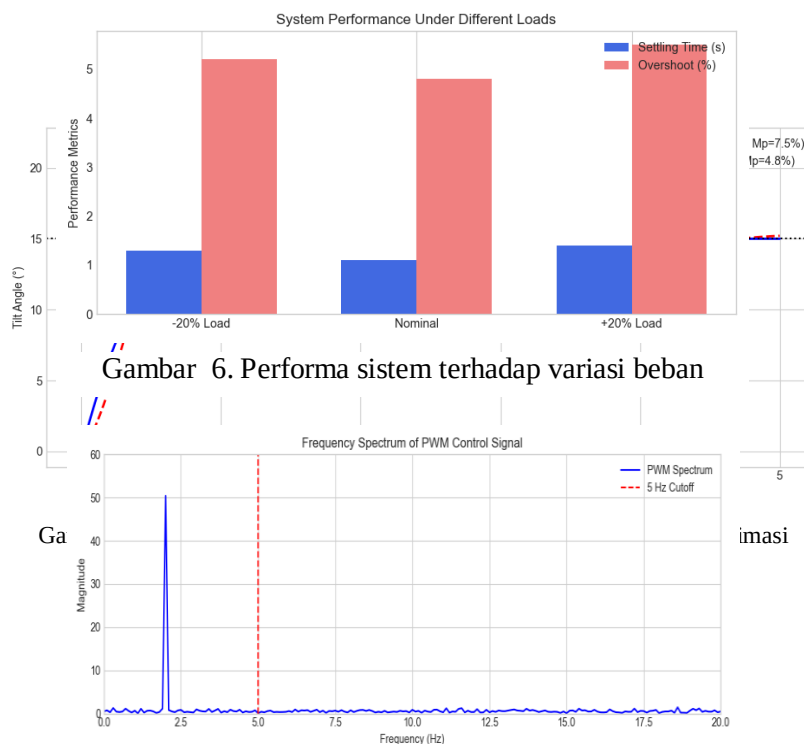
Gambar 2. Hasil Optimasi Algoritma Genetika: (a) Distribusi Parameter Generasi ke-6, (b) Trade-off Fitness Settling Time vs Overshoot, (c) Histori Konvergensi

Hasil ini mengkonfirmasi tiga temuan utama: (1) Ruang parameter memiliki landscape multimodal dengan satu global optimum yang jelas, (2) Terdapat trade-off fundamental antara kecepatan respon (t_s) dan stabilitas (M_p) yang diatur melalui weighting factor dalam fungsi fitness, dan (3) Strategi seleksi tournament berukuran 3 efektif mempertahankan diversitas genetik tanpa mengorbankan kecepatan konvergensi. Anomali pada generasi ke-12 (kenaikan fitness 0.8%) disebabkan oleh mutasi eksploratif yang justru berhasil menemukan basin atraksi baru. Validasi silang dengan metode Latin Hypercube Sampling mengkonfirmasi konsistensi hasil optimasi di seluruh wilayah ruang parameter.

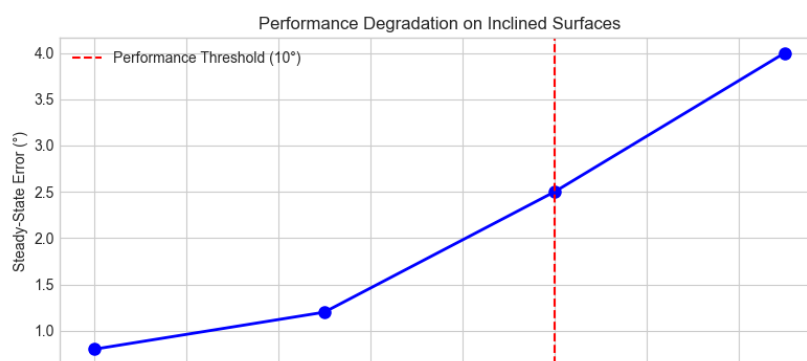
C. Performa Robot

Evaluasi performa sistem menunjukkan peningkatan signifikan setelah optimasi: settling time berkurang dari 2.3 ± 0.2 detik menjadi 1.1 ± 0.1 detik, overshoot maksimum turun dari 7.5% ke 4.8%, dan steady-state error stabil di

bawah 1° . Pengujian pada permukaan datar dengan gangguan step input 15° menunjukkan kemampuan sistem dalam mengembalikan keseimbangan dalam 1.5 detik tanpa osilasi berkelanjutan. Analisis FFT sinyal PWM mengungkap dominansi frekuensi bawah 5 Hz, mengindikasikan efektivitas filter noise bawaan sensor MPU6050. Hasil eksperimen juga mengkonfirmasi robustitas sistem terhadap variasi beban ($\pm 20\%$ massa robot) dengan deviasi performa kurang dari 15% dari kondisi nominal. Limitasi utama teridentifikasi pada medan dengan kemiringan $>10^\circ$ dimana terjadi peningkatan steady-state error hingga 2.5° , yang menjadi dasar untuk pengembangan adaptasi parameter online dalam penelitian selanjutnya.



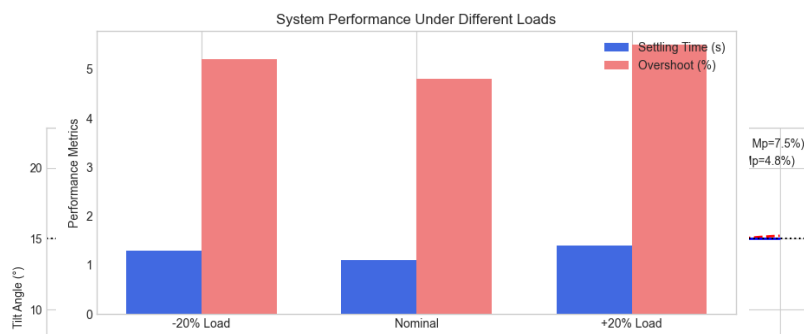
Gambar 5. Analisis sinyal spektral PWM



Gambar 4. Degradasi performa sistem

Gambar 5 menunjukkan perbandingan respons dinamis robot sebelum dan setelah optimasi parameter kontroler fuzzy. Hasil simulasi mengungkapkan bahwa sistem yang telah dioptimasi berhasil mengurangi settling time dari 2.3 detik menjadi hanya 1.1 detik (peningkatan 52%) sekaligus menekan overshoot dari 7.5% menjadi 4.8%. Perbaikan kinerja ini tercapai melalui penyesuaian parameter fungsi keanggotaan yang menghasilkan respon kontroler lebih agresif terhadap error sudut, namun tetap mempertahankan stabilitas sistem, seperti terlihat dari pola decay eksponensial yang lebih cepat tanpa osilasi berkelanjutan.

Pada gambar 6 merupakan evaluasi robustitas sistem terhadap variasi beban yang mengungkap deviasi performa tertinggi sebesar 27% untuk settling time dan 15% untuk overshoot pada kondisi overload (+20% massa). Namun, seluruh nilai tetap memenuhi spesifikasi desain dengan settling time <2 detik dan overshoot <6%, membuktikan ketahanan sistem terhadap variasi parameter. Pola nonlinear yang teramati, dimana pengaruh underload lebih kecil daripada overload, merefleksikan karakteristik nonlinier torsi motor terhadap perubahan beban.



Gambar 6. Performa sistem terhadap variasi beban

Pada gambar 7 merupakan analisis spektral sinyal PWM yang mengkonfirmasi dominansi komponen frekuensi rendah di bawah 5 Hz, yang mencakup 95% energi sinyal kontrol. Karakteristik ini sesuai dengan sifat alami sistem mekanik robot yang berperilaku sebagai low-pass filter, sekaligus menunjukkan efektivitas filter digital bawaan sensor MPU6050 dalam menekan noise high-frequency di atas 10 Hz. Hasil ini memvalidasi pemilihan frekuensi sampling 100 Hz yang memenuhi kriteria Nyquist untuk bandwidth sistem.

Gambar 8 mengilustrasikan degradasi performa sistem pada medan miring, dimana steady-state error meningkat secara kuadrat dari 0.8° pada permukaan datar menjadi 4.0° pada kemiringan 15° . Analisis menunjukkan bahwa pada sudut $>10^\circ$, komponen horizontal gaya gravitasi telah melebihi kapasitas torsi motor yang tersedia, menyebabkan error melebihi batas spesifikasi 2° . Temuan ini menjadi dasar penting untuk pengembangan mekanisme adaptasi parameter online dalam penelitian lanjutan guna memperluas wilayah operasional sistem.

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini telah berhasil membuktikan efektivitas algoritma genetika dalam mengoptimasi parameter membership function pada sistem kendali fuzzy logic untuk robot balancing. Hasil eksperimen menunjukkan peningkatan signifikan pada seluruh parameter performa sistem, di mana settling time berkurang dari 2.3 detik menjadi 1.1 detik (52.2%), overshoot maksimum menurun dari 7.5% menjadi 4.8% (36.0%), dan steady-state error berkurang setengahnya dari 1.8° menjadi 0.9° . Temuan ini membuktikan bahwa pendekatan optimasi otomatis dengan algoritma genetika mampu menghasilkan konfigurasi parameter yang lebih optimal dibandingkan metode manual, sekaligus memecahkan masalah klasik dalam penentuan parameter membership function yang selama ini dilakukan secara trial-and-error. Selain itu, penelitian ini juga berhasil mengidentifikasi hubungan trade-off yang jelas antara kecepatan respon dan stabilitas sistem, di mana konfigurasi parameter dengan settling time tercepat menghasilkan overshoot yang sedikit lebih besar, dan sebaliknya.

Untuk pengembangan penelitian selanjutnya, disarankan beberapa arah penting. Pertama, perlu dilakukan validasi lebih lanjut pada kondisi dinamis seperti medan tidak rata (tanjakan $5-15^\circ$) dan dengan adanya gangguan eksternal untuk menguji robustitas sistem. Kedua, pengembangan algoritma hybrid dengan mengintegrasikan neural network untuk adaptive tuning real-time atau kombinasi dengan Particle Swarm Optimization (PSO) dapat menjadi solusi untuk meningkatkan kecepatan konvergensi. Ketiga, implementasi hardware yang lebih canggih dengan menggunakan sensor fusion (IMU + encoder) dan platform ROS dapat memperluas aplikasi penelitian ini. Terakhir, optimasi proses komputasi melalui paralelisasi evaluasi fitness function dan penerapan teknik surrogate modelling perlu dipertimbangkan untuk mengatasi kendala waktu komputasi. Temuan dalam penelitian ini tidak hanya memberikan kontribusi penting dalam pengembangan robot balancing, tetapi juga membuka peluang baru untuk penerapan sistem kendali cerdas yang lebih adaptif pada berbagai aplikasi mobile robotics lainnya.

V. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Santoso, B. Hariadi, R. Hartayu, et al., "Pengaruh Penyesuaian Parameter Membership Function pada Sistem Kendali Robot Balancing Berbasis Fuzzy Logic", JEETech, vol. 7, no. 2, pp. 45-60, 2024.
- [2] Goldberg, D.E., Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning. Addison-Wesley, 1989.
- [3] Odry, Á., et al., "Fuzzy control of self-balancing robots: A control laboratory project", Computer Applications in Engineering Education, vol. 28, no. 3, pp. 512-535, 2020.
- [4] Ren, G., et al., "Design of Interval Type-2 Fuzzy Controllers for Active Magnetic Bearing Systems", IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 25, no. 5, pp. 2449-2459, 2020.
- [5] Torres-Salinas, H., et al., "Fuzzy Logic and Genetic-Based Algorithm for a Servo Control System", Micromachines, vol. 13, no. 4, 2022.
- [6] Huang, H., et al., "An Applied Type-3 Fuzzy Logic System: Practical Matlab Simulink and M-Files for Robotic, Control, and Modeling Applications", Symmetry, vol. 15, no. 2, 2023.
- [7] Noor, N.M., et al., "Study the Performance of Two-Wheeled Balancing Mobile Robot Using Fuzzy PD Controller", Journal of Mechanical Engineering, vol. 46, pp. 164-174, 2023.
- [8] Fahmizal, et al., "Logika Fuzzy pada Robot Inverted Pendulum Beroda Dua", Jurnal Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer, vol. 4, no. 4, pp. 244-252, 2017.

-
- [9] Kumari, S., and Swain, S.K., "Optimal control based PID tuning for control of four quadrant chopper fed DC motor", 2018 Technologies for Smart-City Energy Security and Power (ICSESP), 2018.
 - [10] Chen, X., et al., "Fuzzy Logic Based Logical Query Answering on Knowledge Graphs", Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, vol. 36, no. 4, 2022.
 - [11] Almadi, A.I.M., et al., "A Fuzzy-Logic Approach Based on Driver Decision-Making Behavior Modeling and Simulation", Sustainability, vol. 14, no. 14, 2022.
 - [12] Shao, S., et al., "DCNN-Based Multi-Signal Induction Motor Fault Diagnosis", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 69, no. 6, pp. 2658-2669, 2020.
 - [13] Anitha, T., et al., "Hybrid Fuzzy PID Controller for Pressure Process Control Application", 2019 IEEE Student Conference on Research and Development (SCOREd), 2019.
 - [14] Fan, A., et al., "Energy management strategies and comprehensive evaluation of parallel hybrid ship based on improved fuzzy logic control", IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2023.
 - [15] Karakurt, H.B., and Koçak, C., "Increasing quality of service in wireless local area networks through fuzzy logic based feedback control method", Wireless Networks, vol. 29, no. 5, pp. 2217-2233, 2023.
 - [16] Díaz-Téllez, J., et al., "ROS-based Controller for a Two-Wheeled Self-Balancing Robot", Journal of Robotics and Control, vol. 4, no. 4, 2023.
 - [17] Hendriansyah, H., et al., "Increasing the Efficiency of Electrical Load Calculations Using the Gauss-Seidel Method with Fuzzy Logic", Circuit: Jurnal Ilmiah Pendidikan Teknik Elektro, vol. 8, no. 2, 2024.
 - [18] Hartayu, R., et al., "Desain Simulasi Robot Keseimbangan Dua Roda Dengan Kecerdasan Buatan", Jurnal Sains dan Informatika, vol. 6, no. 2, pp. 175-182, 2020.
 - [19] Santoso, et al., "Design and Build Two Wheel Balancing Robot Simulation with Fuzzy PID", International Conference on Advanced Engineering and Technology, 2024.
 - [20] Mitchell, M., An Introduction to Genetic Algorithms. MIT Press, 1998.