

Rancang Bangun *Aeropendulum Twinmotor* dengan Kontrol *Fuzzy Logic* Berbasis Matlab-Simulink dan Arduino

Development of a Twin-Motor Aeropendulum with Fuzzy Logic Controller Based on MATLAB-Simulink and Arduino

¹Muhammad Iqbal, ¹Heri Subagiyo*), ¹Yusmar Palapa Wijaya dan ¹Amirul Huda

¹Politeknik Caltex Riau, Pekanbaru, 28265, Indonesia

*) *corresponding email: heri@pcr.ac.id*

Abstrak

Makalah ini menyajikan rancang bangun sistem *aeropendulum twin-motor (half-quadcopter)* sebagai media pembelajaran sistem kontrol berbasis *Fuzzy Logic Controller (FLC)*. Sistem dirancang menggunakan *plant* nyata berupa *half-quadcopter*, sensor sudut IMU MPU6050 dengan *complementary filter*, serta integrasi Arduino dan Matlab-Simulink untuk perancangan pengontrol dan visualisasi respon. Dibandingkan dengan pengontrol PID konvensional, FLC dipilih karena mampu menangani nonlinieritas sistem tanpa memerlukan model matematis yang presisi. Kontribusi utama penelitian ini adalah pengembangan platform pembelajaran berbiaya rendah yang mengintegrasikan *plant* nyata, sensor non-kontak yang lebih tahan lama, serta visualisasi respon sistem secara langsung. Hasil pengujian pada *setpoint* 30° menunjukkan *rise time* 0,5 s, *settling time* 5,8 s, *maximum overshoot* 21,3%, dan *steady-state error* 0,2%, serta kemampuan sistem dalam merespons gangguan dan kembali ke *setpoint*. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem yang dikembangkan efektif dan layak digunakan sebagai media pembelajaran interaktif untuk meningkatkan pemahaman konsep sistem kontrol.

Kata Kunci: aeropendulum, twin-rotor, kontrol fuzzy logic, media pembelajaran

Abstract

This paper presents the design and development of a twin-motor aeropendulum (half-quadcopter) system as a control systems learning platform using a fuzzy logic controller (FLC). The system is implemented using a real plant in the form of a half-quadcopter, an IMU MPU6050 sensor combined with a complementary filter for angle estimation, and an integration of Arduino and Matlab-Simulink for controller design and response visualization. Compared to conventional PID controllers, the FLC is selected due to its ability to handle system nonlinearities without requiring an accurate mathematical model. The main contribution of this work lies in the development of a low-cost educational platform that integrates a real plant, a non-contact sensor with improved durability, and real-time system response visualization. Experimental results at a 30° setpoint show a rise time of 0.5 s, a settling time of 5.8 s, a maximum overshoot of 21.3%, and a steady-state error of 0.2%, along with good disturbance rejection capability. These results demonstrate that the proposed system is effective and suitable as an interactive learning platform to enhance students' understanding of control system concepts.

Keywords: aeropendulum, twin-rotor, fuzzy logic control, learning tool

Makalah diterima 30 Desember 2025– makalah direvisi 29 Maret 2026– disetujui 14 April 2026

Karya ini adalah naskah akses terbuka dengan lisensi [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).



1 Pendahuluan

Alat bantu media pembelajaran digunakan untuk membantu mahasiswa memahami konsep dengan menggunakan bentuk terapan yang nyata. Media pembelajaran merupakan wahana penyalur pesan dan informasi belajar untuk membantu mahasiswa mencapai tujuan pembelajaran [1]. Dalam konteks sistem kontrol, keberadaan platform eksperimen sangat penting karena memungkinkan mahasiswa tidak hanya memahami teori, tetapi juga mengamati langsung respon sistem secara nyata. Namun demikian, platform pembelajaran sistem kontrol komersial umumnya memiliki biaya yang tinggi dan kurang fleksibel untuk digunakan secara luas dalam kegiatan praktikum.

Beberapa pendekatan telah dikembangkan untuk mengatasi keterbatasan tersebut, antara lain melalui penggunaan simulator, laboratorium jarak jauh, dan pengembangan perangkat keras berbiaya rendah [2]. Simulator seperti Matlab-Simulink atau LabVIEW merupakan perangkat lunak yang sangat baik untuk analisis dan perancangan sistem kontrol, namun kurang memberikan pengalaman langsung terhadap sistem nyata. Alternatif lain adalah laboratorium jarak jauh (*remote laboratory*), yang memungkinkan akses sistem nyata secara daring, tetapi memerlukan pengaturan jadwal akses dan interaksi langsung pengguna. Pendekatan

ketiga adalah pengembangan platform laboratorium berbasis perangkat keras berbiaya rendah, yang menjadi solusi menarik meskipun memiliki keterbatasan kinerja perangkat. Pengembangan media pembelajaran sistem kontrol berbiaya rendah secara mandiri dapat menjadi pilihan realistis, karena selain rendah biaya, juga memudahkan dalam perawatan dan perbaikan.

Berbagai penelitian telah mengembangkan media pembelajaran sistem kontrol dengan pendekatan yang berbeda. Penggunaan perangkat lunak berbasis GUI untuk analisis sistem kontrol PID telah dikembangkan pada [3], yang mampu meningkatkan pemahaman mahasiswa terhadap parameter dan tuning PID. Selain itu, platform pembelajaran berbasis animasi komputer juga dikembangkan pada [4], yang memungkinkan interaksi dengan model sistem secara visual. Namun demikian, kedua pendekatan tersebut belum melibatkan interaksi langsung dengan *plant* nyata.

Pengembangan platform berbasis *plant* nyata telah dilakukan, misalnya menggunakan motor DC untuk kontrol kecepatan dan posisi [2]. Sistem ini telah dilengkapi panduan pembelajaran yang sistematis, namun belum menyediakan visualisasi respon sistem secara langsung selama eksperimen berlangsung. Padahal, visualisasi ini penting untuk meningkatkan pemahaman mahasiswa terhadap dinamika sistem kontrol.

Aeropendulum merupakan salah satu *plant* yang efektif untuk pembelajaran sistem kontrol karena memungkinkan pengamatan langsung parameter kinerja seperti *risetime*, *settling time*, dan *overshoot* [5], [6], dan [7]. Sistem ini juga memungkinkan pemberian gangguan dengan menambahkan beban pada ujung pendulum (gangguan tetap) atau mendorong ujung pendulum (gangguan sementara), sehingga cocok untuk mempelajari *disturbance rejection*.

Aeropendulum yang sering digunakan adalah jenis pendulum yang mempunyai satu motor dengan baling-baling di salah satu ujung pendulumnya, sehingga pendulum dapat berayun akibat adanya gaya aerodinamik dari putaran baling-baling [8]. Jenis *aeropendulum* lain adalah *balanced aeropendulum*, yaitu *aeropendulum* yang memiliki dua motor dengan baling-baling pada kedua ujung pendulum, sehingga terkadang disebut juga *aeropendulum twin-rotor*. Dengan mengontrol gaya aerodinamik pada kedua baling-baling, maka sudut pendulum dapat dikontrol. Prinsip ini menjadi dasar pengontrolan *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) jenis *Quadcopter*. Bedanya, *quad-copter* memiliki empat baling-baling, sedangkan *aeropendulum twin-rotor* hanya dua baling-baling. Sehingga perangkat ini disebut juga dengan istilah *half-quadcopter*.

Aeropendulum satu motor sebagai *plant* nyata untuk pembelajaran sistem kontrol telah digunakan di beberapa penelitian [5],[6],[7], dan [9]. Namun demikian, mahasiswa tidak mudah mencari contoh aplikasi dalam kehidupan yang sesuai dengan *aeropendulum* tersebut. Berbeda halnya apabila digunakan *aeropendulum twin-rotor* (*half-quadcopter*) yang mudah diasosiasikan sebagai dasar kontrol UAV *quadcopter*. Selain itu, penggunaan sensor berbasis potensiometer memiliki keterbatasan akibat gesekan mekanik yang dapat mengurangi keawetan sensor.

Terkait pengontrol untuk sistem *aeropendulum*, beberapa literatur menggunakan metode kontrol yang beragam. Misalnya, pada [9],[10],[11], dan [12] menggunakan pengontrol PID, sedangkan pada [8],[13], [14] digunakan pengontrol *fuzzy-PID*. Sementara itu, pada [15] diterapkan *fuzzy logic controller*. Selain itu, penerapan Takagi-Sugeno *fuzzy controller* terdapat pada [16], serta *adaptif fuzzy controller* pada [17] dan [18].

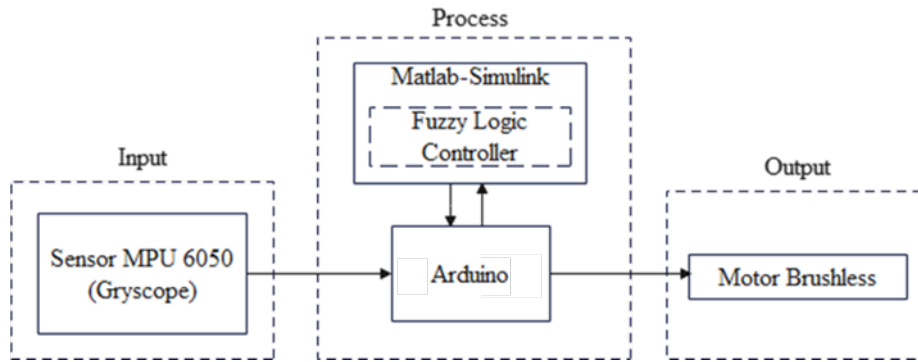
Berdasarkan tinjauan tersebut, terdapat beberapa permasalahan pada platform pembelajaran sistem kontrol yang ada, yaitu: (1) kurangnya integrasi antara *plant* nyata dan visualisasi respon sistem, (2) keterbatasan representasi sistem terhadap aplikasi nyata seperti UAV, dan (3) keterbatasan keawetan sensor akibat penggunaan komponen mekanik. Selain itu, metode pengendalian yang digunakan umumnya berbasis PID, yang memerlukan model matematis yang cukup akurat dan kurang fleksibel dalam menangani nonlinieritas sistem. Di sisi lain, beberapa penelitian menunjukkan bahwa metode kontrol alternatif seperti *fuzzy logic controller* (FLC) mampu memberikan kinerja yang baik dalam menangani sistem nonlinier.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengembangkan sistem *aeropendulum twin-rotor* berbasis *half-quadcopter* sebagai media pembelajaran sistem kontrol yang terintegrasi dengan *fuzzy logic controller* serta dilengkapi dengan visualisasi respon sistem. Sistem yang dikembangkan diharapkan dapat menjadi alternatif platform pembelajaran yang interaktif, ekonomis, dan representatif terhadap aplikasi nyata sistem kontrol. Selanjutnya, makalah ini disusun dengan memaparkan metode perancangan sistem, implementasi, serta hasil pengujian dan analisis kinerja sistem.

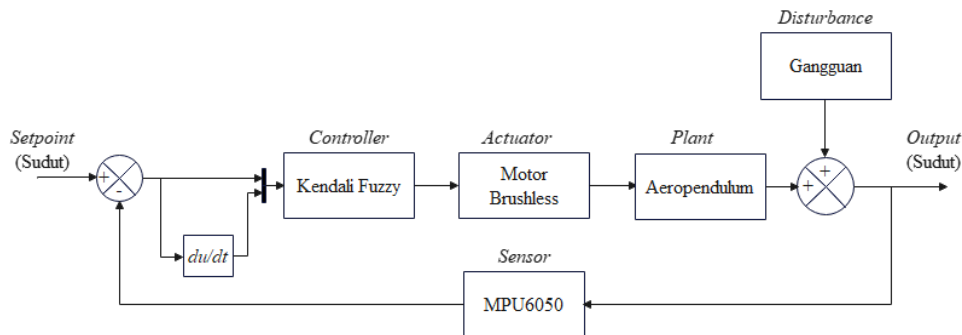
2 Metode

2.1 Perancangan Sistem

Dalam perancangan suatu sistem dibutuhkan suatu blok diagram yang dapat menjelaskan kerja sistem secara keseluruhan. Gambar 1 menunjukkan diagram blok fungsional sistem *aeropendulum half-quadcopter*. Diagram blok sistem kontrol dengan metode pengontrol *fuzzy logic* ditunjukkan oleh Gambar 2.

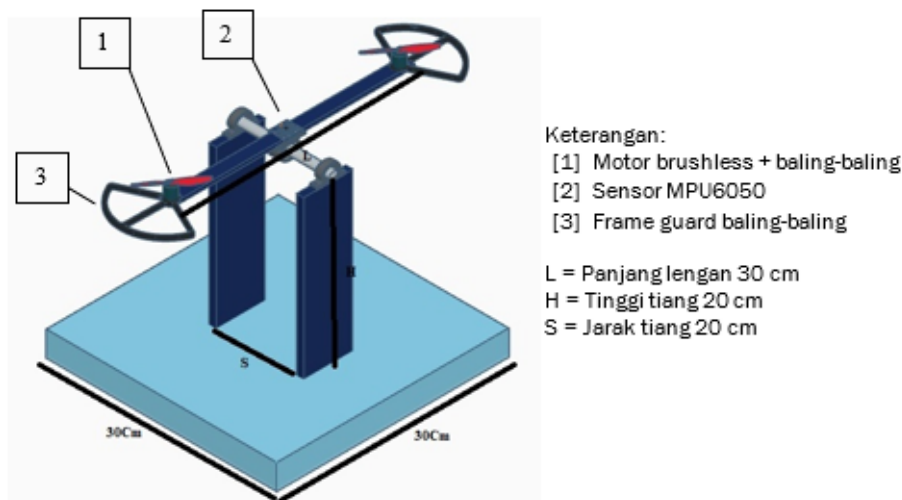


Gambar 1. Diagram blok fungsional sistem *aeropendulum half-quadcopter*.



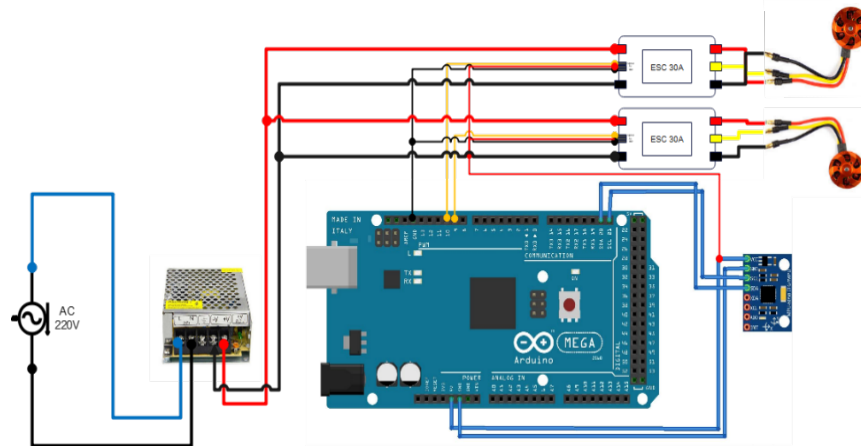
Gambar 2. Diagram blok sistem kontrol *fuzzy logic* pada *aeropendulum half-quadcopter*.

Rancangan mekanik *aeropendulum half-quadcopter* dengan *fuzzy logic* ini ditunjukkan pada Gambar 3.



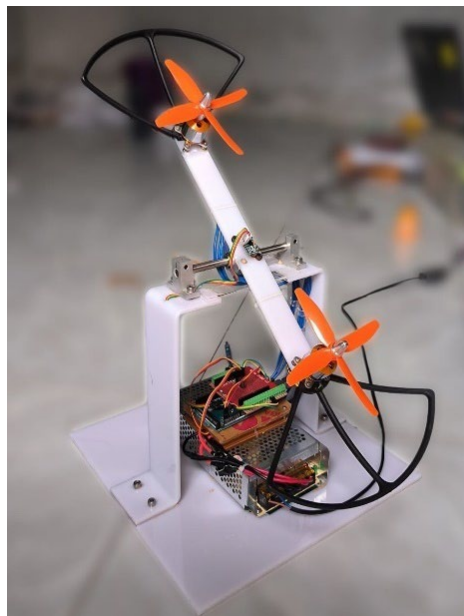
Gambar 3. Rancangan mekanik.

Komponen/modul elektronika pada sistem ini terdiri dari mikrokontroler Arduino, sensor IMU MPU6050 yang terhubung dengan Arduino melalui *interface I2C*. Aktuator yang digunakan adalah 2 buah motor *brushless* jenis A2212 1000KV dilengkapi dengan *Electronic Speed Controller (ESC) 30A*. Pada motor dipasang baling-baling dengan ukuran diameter 5". Sumber daya sistem menggunakan modul *switching power supply 12V 20A* untuk motor *brushless* dan daya *port USB* untuk modul Arduino. Diagram pengkabelan ditunjukkan oleh Gambar 4.



Gambar 4. Diagram pengkabelan komponen/modul elektronik.

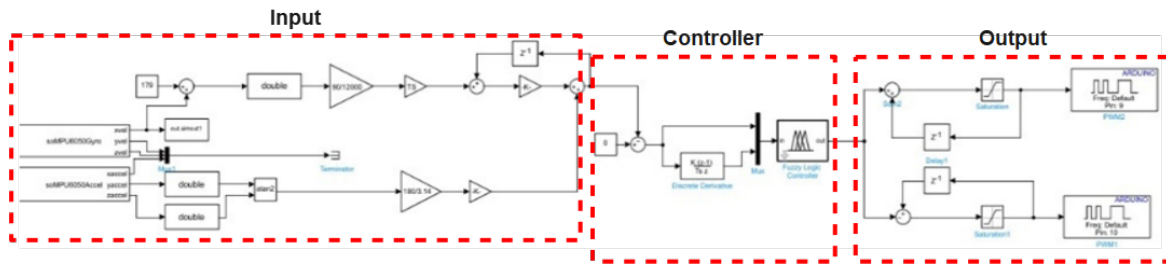
Hasil perancangan mekanik dan elektronik di atas kemudian diwujudkan menjadi sebuah prototipe *aeropendulum twin-rotor* ditunjukkan pada Gambar 5. Komponen-komponen yang digunakan diletakkan di tengah alat untuk meminimalisir gangguan terhadap kerja pendulum dan baling-baling. Sebagai komponen mekanik digunakan akrilik sebagai case (*base*), dan tambahan lainnya untuk meletakkan komponen sistem seperti batang as, *linear bearing*, lengan pendulum dan lain-lain.



Gambar 5. Prototipe Aero Pendulum Twin-Rotor (*Half-Quadcopter*).

2.2 Perancangan Diagram Blok Simulink

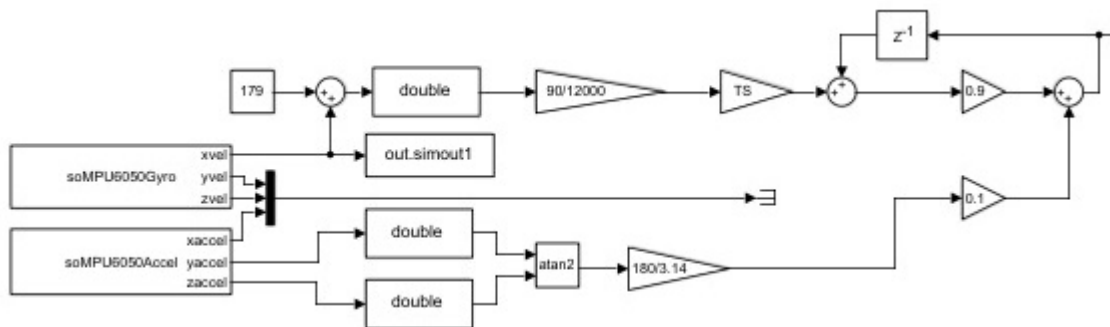
Diagram blok Simulink terdiri dari tiga bagian utama, yaitu bagian *Input*, *Controller*, dan *Output*. Masing-masing bagian memiliki fungsi spesifik yang saling mendukung untuk mencapai tujuan sistem secara keseluruhan. Program blok Simulink sistem secara keseluruhan diperlihatkan pada Gambar 6. Blok *input* dapat dilihat lebih jelas pada Gambar 7, blok *controller* pada Gambar 8 sedangkan blok *output* ditunjukkan pada Gambar 12.



Gambar 6. Diagram blok Simulink.

Pada bagian *Input*, terdapat blok untuk membaca data sudut dari sensor MPU6050. Data dari sensor MPU6050 diambil melalui dua *input* yaitu kecepatan sudut (*gyroscope*) dan percepatan linear (*accelerometer*). Data *gyroscope* diintegrasikan terhadap waktu untuk menghitung perubahan sudut, namun sebelum itu perlu dilakukan menghilangkan bias pada sensor untuk memastikan data *gyroscope* yang akurat dengan cara melihat nilai rata-rata yang didapatkan dari sensor MPU6050 selama diam dengan sumbu x dari *gyroscope* (*x_velocity*). Maka dari hasil rata-rata tersebut ditambahkan pada output blok *x_velocity*. pada sensor MPU6050 yang digunakan pada sistem ini nilai konstanta yang diperoleh yaitu 179 yang ditambahkan dengan hasil *x_velocity*.

Setelah data diperoleh dari sensor, blok *double* digunakan untuk memastikan bahwa data memberikan akurasi yang lebih tinggi maka diolah dalam tipe data *double*. Kemudian dilakukan perhitungan dikalikan dengan $90/12000$ yang berfungsi untuk *scaling* pembacaan sensor dengan perbandingan antara sudut sistem yaitu 90° dan hasil pembacaan *x_velocity* ketika digerakkan ke 90° yaitu 12000. Dan pada data *accelerometer* diubah tipe data *double* digunakan dalam fungsi *atan2* untuk menghitung sudut berdasarkan percepatan pada sumbu y dan z, kemudian hasilnya dikonversi dari radian ke derajat dengan mengalikan $180/\pi(3.14)$.

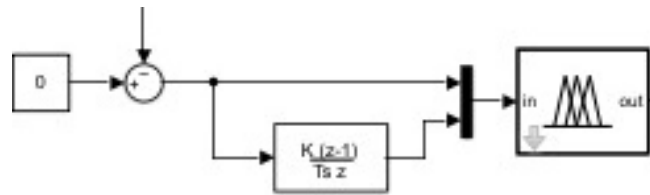


Gambar 7. Blok Simulink *input* dan *complementary filter*.

Hasil dari *gyroscope* dan *accelerometer* digabungkan menggunakan *complementary filter* (lihat Gambar 7), dengan bobot yang lebih besar diberikan pada data *gyroscope* (0.9) dan bobot yang lebih kecil pada data *accelerometer* (0.1), untuk menghasilkan sudut akhir yang lebih stabil dan akurat. Blok memori z^{-1} ditambahkan untuk mengurangi *noise* dan menjaga stabilitas hasil akhir. Kombinasi ini memungkinkan pengukuran sudut yang lebih andal dengan memanfaatkan kelebihan masing-masing sensor yaitu *gyroscope* memberikan respons cepat terhadap perubahan orientasi tanpa terpengaruh oleh getaran, sedangkan *accelerometer* memberikan informasi yang lebih handal dalam jangka panjang karena tidak mengalami *drift*.

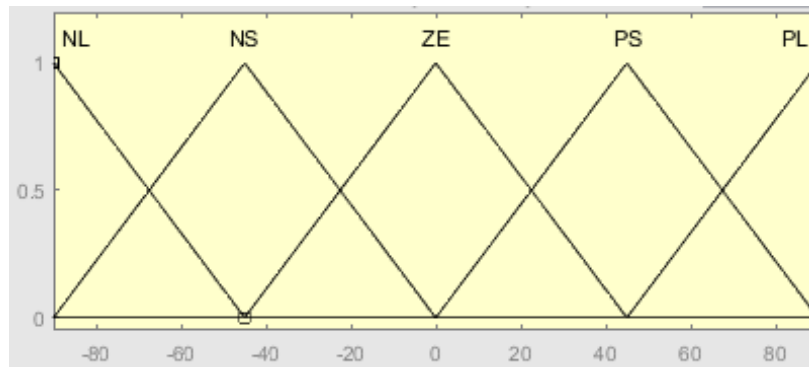
Sistem diimplementasikan dengan waktu *sampling* sebesar 10 ms (100 Hz), yang digunakan sebagai periode pembacaan sensor dan pembaruan sinyal kontrol pada mikrokontroler. Pemilihan waktu *sampling* ini mempertimbangkan keseimbangan antara kecepatan respon sistem dan keterbatasan komputasi pada mikrokontroler.

Data yang dihasilkan oleh sensor ini kemudian akan diproses lebih lanjut pada bagian berikutnya, yaitu *Controller* ditunjukkan pada Gambar 8. Pada bagian *Controller*, terdapat blok *Fuzzy Logic Controller* (FLC), yang berfungsi sebagai pengendali utama dalam sistem. *Fuzzy Logic Controller* menggunakan prinsip-prinsip logika *fuzzy* untuk menangani ketidakpastian dan variasi dalam data sensor, sehingga mampu menghasilkan respons yang lebih adaptif dan akurat. Dalam konteks ini, pengendali ini akan mengambil data error dan delta error dari sensor MPU6050 dan nilai setpoint kemudian memprosesnya untuk menghasilkan keputusan pengendalian yang sesuai.

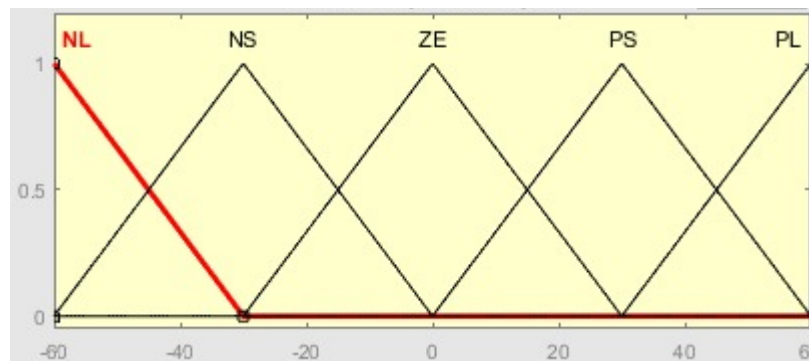


Gambar 8. Blok Simulink controller.

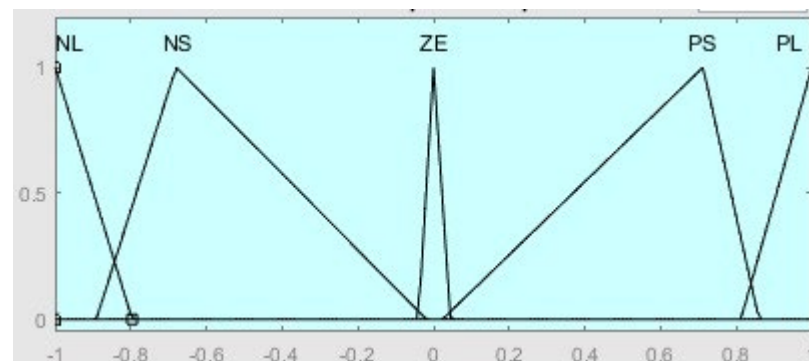
Parameter FLC ditentukan berdasarkan karakteristik sistem *aeropendulum* dan referensi pada penelitian sebelumnya [19]. Fungsi keanggotaan (*membership function*) pada FLC yang diterapkan dalam sistem ini berbentuk segitiga (*triangular*), ditunjukkan pada Gambar 9, Gambar 10, dan Gambar 11. Terdapat 3 variabel, yaitu 2 variabel input *Error* dan *Delta Error* (ΔE), sedangkan untuk output terdapat 1 variabel yaitu *pwm*. Jumlah fungsi keanggotaan pada setiap variabel dipilih sebanyak 5, yaitu *NL* (*negative long*), *NS* (*negative small*), *ZE* (*zero*), *PS* (*positive small*), dan *PL* (*positive long*) untuk memberikan keseimbangan antara kompleksitas sistem dan sensitivitas respon. Rentang variabel input *Error* ditetapkan antara -90° hingga 90° dan *Delta Error* antara -60° hingga 60° sesuai dengan batas operasional sudut sistem pendulum. Output FLC yaitu variabel *pwm*, memiliki rentang -1 hingga 1 yang merepresentasikan perubahan relatif terhadap sinyal kontrol (*pwm*) sebelumnya.



Gambar 9. Membership function input Error.



Gambar 10. Membership function input Delta Error.



Gambar 11. Membership function output.

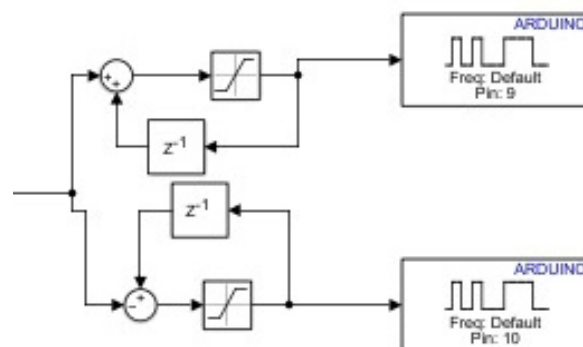
Dengan menggunakan *rule base* atau basis aturan IF-THEN metode implikasi MIN yang kemudian hasil dari setiap aturan *fuzzy* diagregasikan menggunakan metode MAX, maka matriks *rule base* dirancang berdasarkan prinsip dasar pengendalian *fuzzy* yang dijelaskan pada [19] vxcb, dengan beberapa penyesuaian untuk mengakomodasi dinamika sistem *aeropendulum twin-rotor*, ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Matriks *Rule Base*

$\begin{matrix} E \\ \Delta E \end{matrix}$	NL	NS	ZE	PS	PL
PL	ZE	PS	PL	PL	PL
PS	NS	ZE	PS	PL	PL
ZE	NL	NS	ZE	PL	PL
NS	NL	NS	NS	PS	PS
NL	NL	NL	NL	ZE	ZE

Proses tuning FLC dilakukan secara *trial-and-error* dengan mempertimbangkan respon sistem terhadap perubahan setpoint dan gangguan. Parameter yang disesuaikan meliputi bentuk dan rentang fungsi keanggotaan serta aturan pada *rule base*, sehingga diperoleh kompromi terbaik antara kecepatan respon dan kestabilan sistem.

Selanjutnya, pada bagian *Output*, terdapat blok yang digunakan untuk mengimplementasikan hasil dari controller tersebut, yaitu blok PWM (*Pulse Width Modulation*) motor, sesuai Gambar 12. Blok ini digunakan untuk mengatur kecepatan motor berdasarkan keputusan yang dihasilkan oleh *Controller*. Adapun blok saturation berfungsi untuk membatasi kecepatan motor dan dengan *men-delay* (menyimpan) nilai PWM motor untuk ditambahkan atau dikurangi dari *controller* untuk mengatur kecepatan motor.

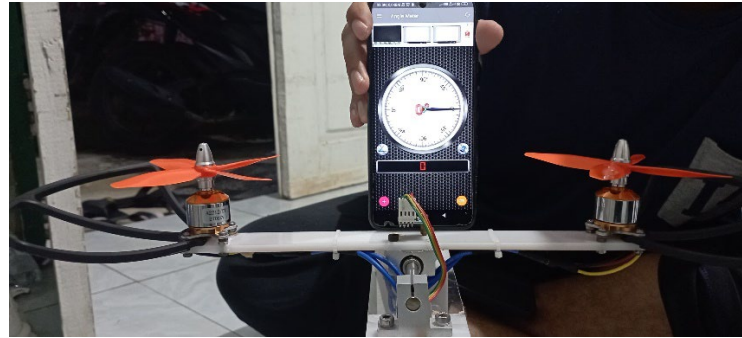


Gambar 12. Blok Simulink *output*.

3 Hasil dan Diskusi

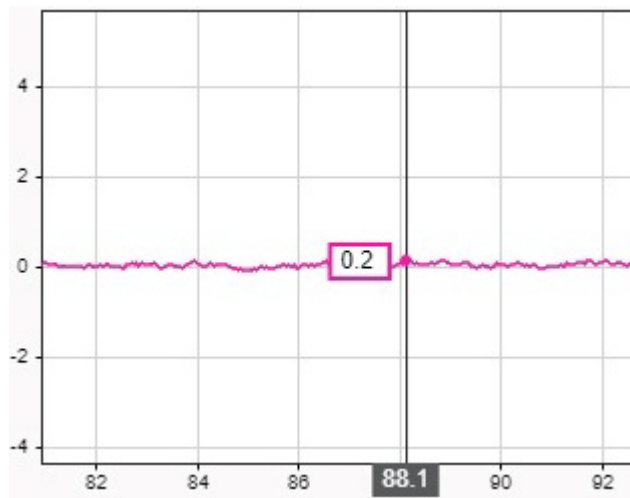
3.1 Pengujian Sensor MPU6050

Pengujian dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan dari sensor MPU6050 dengan hasil pengukuran sudut yang diukur menggunakan busur derajat. Untuk meningkatkan akurasi dan kemudahan, pengukuran sudut manual dengan busur derajat digantikan dengan aplikasi pengukuran sudut di Android ditunjukkan pada Gambar 13. Langkah ini bertujuan untuk memastikan bahwa data yang diperoleh dari sensor MPU6050 sesuai dengan pengukuran sudut yang lebih stabil dan akurat. Gambar 14 menunjukkan salah satu pembacaan data sensor MPU6050.



Gambar 13. Pembacaan sudut dengan busur derajat.

Tampak pada Gambar 13 *aeropendulum* diatur posisinya menuju ke 0° atau posisi seimbang oleh aplikasi Android sebagai pengganti busur derajat untuk pengukuran sudut di *hardware*. Grafik hasil pembacaan sudut dari *hardware* pada tampilan Matlab ditunjukkan oleh Gambar 14.



Gambar 14. Grafik hasil pembacaan MPU6050.

Hasil pembacaan sensor MPU6050 pada Gambar 14 menunjukkan posisi 0° yaitu $0,2^\circ$ dalam hal ini pembacaan sensor stabil dan akurat dengan pembacaan sudut secara langsung dari sistem. Tabel 2 menunjukkan hasil pengujian sensor MPU6050 terhadap sudut *actual* menggunakan busur derajat (aplikasi Android).

Tabel 2. Data pengujian sensor MPU6050

Busur derajat	Sensor MPU6050	Error
45°	$45,32^\circ$	0,71%
15°	$14,96^\circ$	0,27%
10°	$10,06^\circ$	0,6%
0°	$0,3^\circ$	0,2%
-10°	$-9,96^\circ$	0,4%
-15°	$-15,13^\circ$	0,87%
-45°	$-45,06^\circ$	0,13%

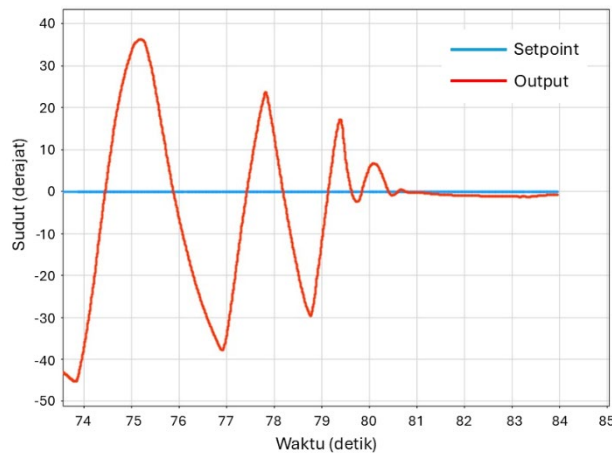
Pengujian pembacaan sudut oleh sensor MPU6050 pada Tabel 2 dengan rata-rata *error* 0,45% menunjukkan bahwa sensor memiliki tingkat akurasi yang baik, sehingga sensor dapat diandalkan untuk pembacaan sudut pada sistem.

3.2 Pengujian Sistem Kontrol

Pengujian dilakukan dengan cara menggerakkan *aeropendulum* untuk melihat respon sistem melalui pembacaan sudut oleh MPU6050 dan dibandingkan dengan *setpoint*.

3.2.1 Pengujian dengan *Setpoint* Tetap

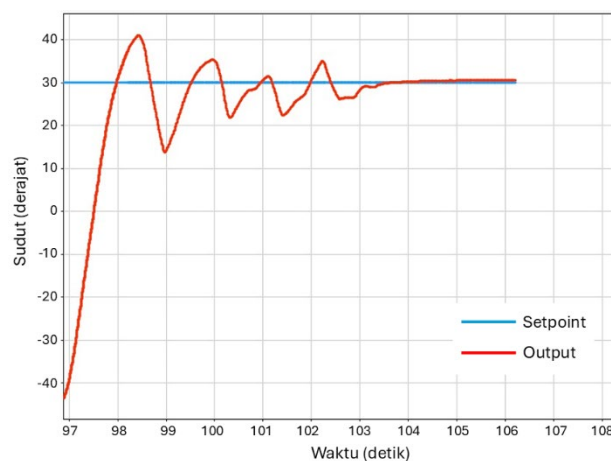
Hasil pengujian sistem *aeropendulum* dengan *setpoint* tetap pada 0° ditunjukkan pada Gambar 15. Pada grafik ini, terdapat dua kurva yang menggambarkan respons sistem. Garis biru, yang hampir datar, mewakili *setpoint* yang tetap pada nilai 0° , menunjukkan bahwa target posisi dari *aeropendulum* adalah nol atau posisi stabil tanpa penyimpangan.



Gambar 15. Respon sistem terhadap *setpoint* 0° .

Sementara itu, kurva merah menggambarkan respon sistem terhadap *setpoint* tersebut setelah melewati *complementary filter*. Pada awal grafik, terlihat bahwa sistem mengalami osilasi yang cukup signifikan dengan amplitudo yang besar sebelum akhirnya meredam secara bertahap mendekati *setpoint* yang diinginkan. Osilasi ini mengindikasikan bahwa sistem membutuhkan waktu untuk menstabilkan diri, di mana respon terhadap perubahan posisi membutuhkan beberapa siklus osilasi sebelum mencapai keadaan stabil. Pada akhirnya, kurva mendekati nol, yang menunjukkan bahwa sistem berhasil mencapai stabilitas dan sesuai dengan *setpoint* yang diinginkan setelah waktu tertentu.

Pada Gambar 16, hasil pengujian lainnya sistem *aeropendulum* dengan *setpoint* tetap pada 30° . Pada grafik ini, dua kurva juga terlihat, di mana garis biru yang datar menunjukkan *setpoint* sistem yang diatur pada nilai 30° , yang berarti target posisi *aeropendulum* adalah pada nilai tersebut.



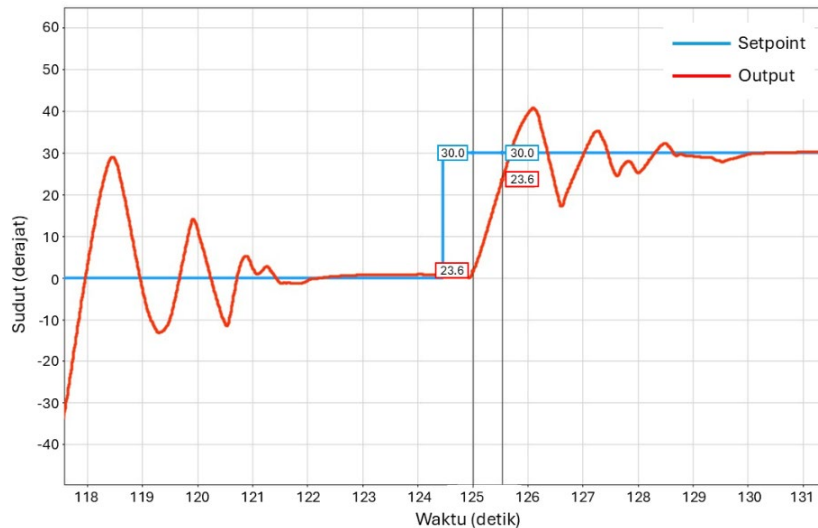
Gambar 16. Respon sistem terhadap *setpoint* 30° .

Kurva merah menunjukkan respons sistem setelah melewati *complementary filter*. Pada awal grafik, terlihat bahwa sistem mengalami osilasi besar yang cukup signifikan dengan amplitudo tinggi dan rendah, menandakan bahwa sistem mencoba mencapai *setpoint* yang ditentukan. Osilasi ini menurun secara bertahap seiring waktu, tetapi masih menunjukkan beberapa variasi sebelum akhirnya mulai mendekati stabilitas di sekitar nilai *setpoint* yang diinginkan.

Pada bagian akhir kurva, respons sistem mulai lebih stabil dengan fluktuasi yang semakin kecil, yang menandakan bahwa sistem telah mulai mencapai posisi yang mendekati *setpoint* 30° meskipun masih terdapat sedikit osilasi. Ini menunjukkan bahwa *aeropendulum* pada kondisi ini memerlukan waktu untuk menstabilkan diri di sekitar *setpoint* yang diinginkan, dan meskipun berhasil mendekati target, masih terdapat beberapa *overshoot* dan *undershoot* dalam prosesnya.

3.2.2 Pengujian dengan *Setpoint* Berubah

Hasil pengujian dengan *setpoint* berubah diperlihatkan pada Gambar 17. Pada grafik ini terlihat respon sistem *aeropendulum* terhadap perubahan *setpoint* yang signifikan. Garis biru menunjukkan *setpoint*, yang awalnya berada pada 0°, kemudian meningkat secara tiba-tiba ke nilai yang lebih tinggi sekitar 30° karena adanya perubahan *setpoint* yang digunakan. Sistem, yang diwakili oleh garis merah, merespons perubahan *setpoint* ini dengan pola osilasi yang cukup signifikan.



Gambar 17. Respon sistem terhadap *setpoint* yang berubah dari 0° ke 30°.

Setelah *setpoint* berubah, sistem mengalami *overshoot* yang cukup besar, di mana respons melonjak di atas *setpoint* yang baru, diikuti dengan serangkaian osilasi yang terjadi sebelum sistem akhirnya mulai mendekati stabilitas. Fluktuasi atau osilasi ini menunjukkan bahwa sistem membutuhkan waktu untuk menyesuaikan diri terhadap perubahan *setpoint* dan untuk mengatasi dampak dari perubahan mendadak ini.

Pada akhirnya, sistem mulai stabil dan mengikuti nilai *setpoint* yang baru dengan osilasi kecil yang terus berkurang seiring waktu. Pola ini menunjukkan bahwa sistem *aeropendulum* memiliki sifat yang cenderung *over-responsive* terhadap perubahan *setpoint*, yang bisa menjadi fokus penting dalam pengaturan parameter kontrol untuk meminimalkan *overshoot* dan mempercepat waktu pemulihan.

Berdasarkan grafik respon sistem pada Gambar 17, dapat diperoleh parameter respon waktu sistem sebagai hasil pengujian, yaitu *rise time*, *settling time*, *maximum overshoot*, dan *error steady state*. Parameter respon sistem hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Parameter respon sistem

Parameter	Nilai
<i>Rise time</i> , t_r	0.5 s
<i>Settling time</i> , t_s	5.8 s
<i>Maximum overshoot</i> , M_p	21.3 %
<i>Error steady-state</i> , e_{ss}	0.2 %

Nilai *overshoot* sebesar 21,3% dan *settling time* 5,8 detik menunjukkan bahwa sistem masih memiliki respon transien yang relatif besar. Hal ini dipengaruhi oleh parameter pengendali *fuzzy*, khususnya pada proses pemetaan output FLC ke sinyal PWM yang menentukan tingkat agresivitas sistem. Meskipun demikian, sistem tetap menunjukkan kestabilan yang baik dengan *error steady-state* yang kecil. Optimalisasi lebih lanjut terhadap parameter FLC, seperti penyesuaian fungsi keanggotaan, berpotensi meningkatkan performa sistem.

Dibandingkan dengan metode PID yang umum digunakan pada sistem *aeropendulum*, pendekatan *Fuzzy Logic Controller* (FLC) memiliki keunggulan dalam menangani nonlinieritas sistem tanpa memerlukan model matematis yang presisi. Namun demikian, pengendali PID dapat memberikan performa yang lebih optimal apabila dilakukan proses tuning yang tepat, seperti yang telah dilakukan pada [12]. Oleh karena itu, perbandingan eksperimental antara FLC dan PID menjadi menarik untuk dikaji lebih lanjut pada penelitian berikutnya.

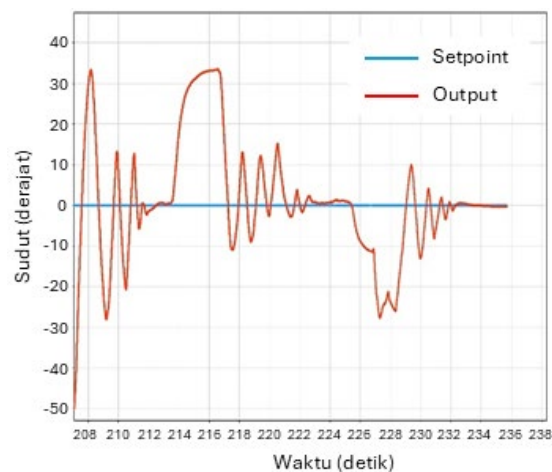
3.2.3 Pengujian Terhadap Gangguan

Pengujian gangguan dilakukan dengan memberikan gangguan eksternal secara manual pada sistem untuk mengamati kemampuan *disturbance rejection*. Meskipun metode ini menunjukkan respons sistem secara kualitatif, pendekatan ini memiliki keterbatasan dalam hal kuantifikasi dan repetibilitas. Oleh karena itu, penggunaan beban eksternal yang terukur direkomendasikan pada penelitian selanjutnya untuk memperoleh hasil pengujian yang lebih konsisten.

Hasil pengujian sistem *aeropendulum* dengan *setpoint* tetap dan adanya gangguan yang diberikan ke sistem ditunjukkan pada Gambar 18. Garis biru yang datar menggambarkan *setpoint* sistem yang diatur pada nilai 0° , yang menunjukkan bahwa target posisi *aeropendulum* adalah nol, atau dalam keadaan stabil tanpa penyimpangan. Kurva merah menggambarkan respons sistem terhadap *setpoint* ini setelah melewati *complementary filter*. Pada awal grafik, terdapat beberapa osilasi yang menunjukkan respons awal sistem terhadap gangguan yang muncul. Setelah itu, sistem tampaknya berusaha kembali ke *setpoint* dengan beberapa kali perbaikan yang diindikasikan oleh puncak-puncak osilasi yang lebih kecil, namun masih terdapat osilasi besar yang menunjukkan bahwa gangguan tersebut mengakibatkan fluktuasi signifikan dalam respons sistem.



(a)



(b)

Gambar 18. Respon sistem ketika diberikan gangguan.

Pada bagian tengah grafik, respons sistem menunjukkan perubahan yang lebih besar akibat adanya gangguan eksternal, dengan puncak osilasi yang sangat tinggi diikuti oleh penurunan tajam, yang mungkin mencerminkan adanya gangguan besar yang menyebabkan sistem menyimpang jauh dari *setpoint*. Sistem mencoba untuk mengembalikan posisi ke *setpoint*, tetapi masih menunjukkan beberapa osilasi besar. Di bagian akhir grafik, respons sistem mulai stabil mendekati *setpoint*, meskipun masih terdapat beberapa fluktuasi kecil. Hal ini menunjukkan bahwa sistem memerlukan waktu dan beberapa kali penyesuaian untuk dapat kembali mendekati posisi *setpoint* setelah terganggu, meskipun gangguan menyebabkan penyimpangan yang cukup besar.

Secara keseluruhan, grafik ini menunjukkan bagaimana sistem *aeropendulum* bereaksi terhadap gangguan. Sistem menunjukkan karakteristik dinamis yang kuat di mana ia berusaha untuk mengoreksi dirinya sendiri setelah mengalami gangguan, meskipun proses ini melibatkan sejumlah osilasi sebelum mencapai stabilitas relatif di sekitar nilai *setpoint* yang diinginkan.

Meskipun respon sistem masih menunjukkan *overshoot* yang relatif besar, hasil penelitian ini tetap menunjukkan kontribusi dalam pengembangan media pembelajaran sistem kontrol. Platform yang dikembangkan tidak hanya mampu merepresentasikan sistem nyata melalui *aeropendulum twin-rotor*, tetapi juga mengintegrasikan sensor non-mekanik, pemrosesan sinyal berbasis *complementary filter*, serta visualisasi respon sistem. Selain itu, penggunaan *fuzzy logic controller* memungkinkan implementasi pengendalian tanpa memerlukan model matematis yang kompleks. Hal ini menunjukkan bahwa tujuan utama

penelitian, yaitu pengembangan platform pembelajaran sistem kontrol berbasis *plant* nyata, telah tercapai dengan baik, meskipun masih terdapat ruang untuk peningkatan performa kendali melalui optimasi parameter lebih lanjut.

4 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian, sensor MPU6050 metode *complementary filter* untuk pengukuran sudut dari sistem *aeropendulum* menunjukkan akurasi dengan rata-rata error sebesar 0.45%. Implementasi *Fuzzy Logic Controller* (FLC) pada sistem dengan pengujian *setpoint* sudut 30° menunjukkan nilai parameter respon waktu sistem sebagai berikut: *rise time* (tr) 0.5s, *settling time* (ts) 5.8s, *maximum overshoot* (Mp) 21.3% dan *Error Steady State* (ESS) 0.2%. Sistem ini juga efektif dalam merespons gangguan, dengan karakteristik dinamis yang memungkinkan koreksi otomatis kembali ke nilai *setpoint*. Dengan menggunakan Matlab/Simulink maka perubahan rancangan *controller* dan visualisasi respon sistem kontrol dapat dilakukan dengan mudah. Hasil ini tidak hanya menunjukkan implementasi sistem kontrol pada platform *aeropendulum*, tetapi juga memberikan kontribusi dalam pengembangan media pembelajaran sistem kontrol.

Ucapan Terima kasih

Ucapan terimakasih ditujukan kepada Politeknik Caltex Riau yang telah memberi dukungan finansial terhadap penelitian ini.

Referensi

- [1] N. Supriyana, E. Permata, and M. Fatkhurrohman, "Pengembangan media pembelajaran trainer Mikrokontroler Atmega 16 di Program Studi Pendidikan Vokasional Teknik Elektro," *Taman Vokasi*, vol. 7, no. 2, p. 150, Dec. 2019. <https://doi.org/10.30738/jtv.v7i2.6316>
- [2] T. P. Cabré, A. S. Vela, M. T. Ribes, J. M. Blanc, J. R. Pablo, and F. C. Sancho, "Didactic platform for DC motor speed and position control in Z-plane," *ISA Trans*, vol. 118, pp. 116–132, Dec. 2021. <https://doi.org/10.1016/J.ISATRA.2021.02.020>.
- [3] A. Abdulameer, M. Sulaiman, M. S. M. Aras, and D. Saleem, "GUI based control system analysis using PID Controller for Education," *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 3, no. 1, pp. 91–101, Jul. 2016. <https://doi.org/10.11591/IJEECS.V3.I1.PP91-101>
- [4] A. Patete and R. Marquez, "Computer animation education online: A tool to teach Control Systems Engineering throughout the COVID-19 Pandemic," *Educ Sci (Basel)*, vol. 12, no. 4, p. 253, Apr. 2022. <https://doi.org/10.3390/educsci12040253>
- [5] "Engaging Students in Hands-on control system design at University of Arizona - MATLAB & Simulink." Accessed: May 28, 2024. [Online]. Available: <https://assets-bc-dev1.mathworks.com/company/technical-articles/engaging-students-in-hands-on-control-system-design-at-university-of-arizona.html>
- [6] R. C. Neto, F. L. A. Trindade, B. R. A. Marques, G. M. S. Azevedo, E. J. Barbosa, and E. A. O. Barbosa, "An aeropendulum-based didactic platform for the learning of Control Engineering," *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, vol. 34, no. 3, pp. 566–577, Jun. 2023. <https://doi.org/10.1007/s40313-022-00981-4>
- [7] A. Vargová, J. Boldocký, M. Gulan, P. Tibenský, E. Mikuláš, and G. Takács, "AeroShield: An open-source propeller-driven pendulum device for control engineering education*," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 56, no. 2, pp. 9600–9605, Jan. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.10.264>
- [8] Y. Taskin, "Fuzzy PID controller for propeller pendulum," *IU-Journal of Electrical & Electronics Engineering*, vol. 17, no. 1, pp. 3175–3180, Mar. 2017, Accessed: Jan. 08, 2026. [Online]. Available: <https://electricajournal.org/article/651>
- [9] J. P. de Souza Xavier Evangelista, A. L. Carvalho Mendes, and A. S. Brandão, "PID- based stabilization of a one- DOF educational aero-pendulum," *2025 Brazilian Symposium on Robotics (SBR) and 2025 Workshop on Robotics in Education (WRE)*, IEEE, pp. 291–296, 2025 <https://doi.org/10.1109/SBR/WRE66973.2025.11249598>
- [10] F. Baskoro, A. W. Habibi, M. S. Zuhrie, and B. Suprianto, "Desain sistem kontroler PID Tyreus-Luyben pada kendali sudut *aeropendulum* berbasis Labview," *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 10, no. 1, pp. 145–151, 2021. <https://ejournal.unesa.ac.id/index.php/JTE/article/view/36920/32857>
- [11] A. Jayadi, F. D. Adhinata, J. P. Sembiring, N. U. Putri, E. Pranita, and A. Setiawan, "Implementation of PID control as a one axis balancing control system on the bicopter vehicle," *Proceedings - ICCTEIE 2023: 2023 International Conference on Converging Technology in Electrical and Information Engineering*, pp. 113–117, 2023. <https://doi.org/10.1109/ICCTEIE60099.2023.10366534>

- [12] F. Baskoro, P. A. Guntoro, M. S. Zuhrie, B. Suprianto, and I. G. P. A. Buditjahjanto, "Sistem kendali dual motor propeller pada alat *self balancing* menggunakan kontroler PID dengan tuning CHR," *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 10, no. 1, pp. 19–27, 2021. <https://ejournal.unesa.ac.id/index.php/JTE/article/view/35757>
- [13] J.-R. Alvarado-Hernandez et al., "Fuzzy-PID control with state estimation for the regulation of an aeropendulum system," *2025 11th International Conference on Mechatronics and Robotics Engineering (ICMRE)*, IEEE, Feb. 2025, pp. 187–192. <https://doi.org/10.1109/ICMRE64970.2025.10976289>
- [14] E. Andila Putri Khusnul Khotimah and P. Sistem Kendali Self, "Perancangan sistem kendali *self balancing* pada *twin rotor propeller* berbasis hybrid PD-fuzzy controller," *Indonesian Journal of Engineering and Technology (INAJET)*, vol. 3, no. 1, pp. 28–37, Sep. 2020. <https://doi.org/10.26740/INAJET.V3N1.P28-37>
- [15] F. Baskoro and F. A. Kurniawan, "Desain sistem pengaturan posisi sudut aeropendulum berbasis Fuzzy Logic Controller dengan software Labview," *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 9, no. 3, Aug. 2020, Accessed: Jan. 08, 2026. [Online]. Available: <https://ejournal.unesa.ac.id/index.php/JTE/article/view/35627>
- [16] J. R. Rivera-Ruiz et al., "Takagi–Sugeno–Kang Fuzzy inference tracking controller for UAV bicopter," *Symmetry (Basel)*, vol. 17, no. 5, p. 759, May 2025. <https://doi.org/10.3390/sym17050759>
- [17] A. T. Prasetyo, . E., B. Suprianto, and P. W. Rusimamto, "Desain sistem pengaturan sudut aeropendulum menggunakan Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS) berbasis MATLAB," *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 10, no. 2, pp. 387–395, Jun. 2021. <https://doi.org/10.26740/jte.v10n2.p387-395>
- [18] R. Rojas-Galván, J. R. García-Martínez, E. E. Cruz-Miguel, O. A. Barra-Vázquez, L. F. Olmedo-García, and J. Rodríguez-Reséndiz, "Hunting search algorithm-based adaptive Fuzzy Tracking Controller for an aeropendulum," *Technologies (Basel)*, vol. 12, no. 5, p. 63, May 2024. <https://doi.org/10.3390/technologies12050063>
- [19] Q. A. Tarbosh et al., "Review and investigation of simplified rules Fuzzy Logic Speed Controller of high performance induction motor drives," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 49377–49394, 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2977115>