

Pengembangan Platform Gerak Simulator Pesawat Udara: Implementasi Sistem Listrik Dan Elektronika

Putera Rizki Firdaus Al Rauf¹, Muhammad Falaah Subekti¹, Muhammad Abdul Mufti¹, Singgih Satrio Wibowo^{1*}

¹Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Bandung, Bandung 40012

E-mail: putera.rizki.aer22@polban.ac.id

E-mail: muhammad.falaah.aer22@polban.ac.id

E-mail: muhammad.abdul.aer22@polban.ac.id

*E-mail (Corresponding Author): singgih.wibowo@polban.ac.id

ABSTRAK

Penelitian ini mengembangkan *platform* gerak tiga derajat kebebasan (3DOF) untuk simulasi pergerakan pesawat udara secara realistis. Sistem ini menggunakan Arduino Mega 2560 sebagai pengendali utama yang berkomunikasi dengan tiga Arduino UNO R3 sebagai penggerak motor wiper. Setiap motor dikendalikan melalui driver BTS7960 dengan umpan balik dari potensiometer untuk menentukan posisi aktual. Pergerakan *platform* meliputi sumbu roll, pitch, dan yaw, serta dapat merespons masukan secara manual maupun dari data simulasi X-Plane. Pengujian menunjukkan *platform* mampu menghasilkan pergerakan sesuai input dengan respons yang cukup stabil. Tantangan seperti kerusakan komponen dan kendala mekanis mengharuskan adanya perbaikan dan penyesuaian sistem. Meski demikian, sistem berhasil menciptakan gerakan simulasi yang menyerupai dinamika pesawat. *Platform* ini diharapkan dapat digunakan sebagai alat bantu pembelajaran bagi mahasiswa untuk memahami sistem kontrol dan dinamika gerak pesawat, serta menjadi dasar pengembangan simulator dengan kompleksitas lebih tinggi.

Kata Kunci

Simulator penerbangan, *Platform* gerak 3DOF, Motor wiper, Sistem kontrol, Dinamika pesawat.

This study develops a three-degree-of-freedom (3DOF) motion platform for simulating realistic aircraft movements. The system uses an Arduino Mega 2560 as the main controller, communicating with three Arduino UNO R3 units that control wiper motors. Each motor is driven by a BTS7960 module and uses feedback from potentiometers to determine actual position. The platform performs motion on roll, pitch, and yaw axes and responds to both manual input and simulation data from X-Plane. Testing shows that the platform can produce movements that align with input commands with relatively stable responses. Some challenges, such as component failures and mechanical issues, required system adjustments and reconfiguration. Nevertheless, the system successfully generates motion that mimics aircraft dynamics. This platform is expected to serve as an educational tool for students to understand control systems and aircraft motion dynamics, and as a foundation for developing more complex simulators in the future.

Keywords

Flight simulator, 3DOF motion platform, Wiper motor, Control system, Aircraft dynamics.

1. PENDAHULUAN

Panduan Dalam konteks pendidikan penerbangan, integrasi teknologi simulasi memegang peran krusial dalam meningkatkan pemahaman mahasiswa terhadap prinsip-prinsip dasar mekanika terbang dan dinamika pesawat. *Platform* gerak yang mampu merepresentasikan pergerakan pesawat dalam tiga sumbu utama (*roll*, *pitch*, *yaw*) memberikan pengalaman belajar yang mendekati kondisi nyata secara aman dan terkendali. Dengan pendekatan ini, mahasiswa dapat memahami respons dinamis, manuver penerbangan, serta pengaruh berbagai kondisi lingkungan terhadap performa pesawat dalam skenario simulasi realistis (1,2).

Pentingnya *platform* simulasi gerak juga terletak pada efisiensinya dalam menyediakan lingkungan pembelajaran yang aman, terkontrol, dan hemat biaya. Dalam penelitian

ini, motor wiper dipilih sebagai aktuator utama karena sifatnya yang kokoh, ekonomis, dan mudah dikendalikan, sehingga cocok untuk merepresentasikan pergerakan pesawat secara fungsional. Sistem ini dikembangkan dengan menggunakan Arduino Mega 2560 sebagai pusat kendali yang berkomunikasi dengan tiga Arduino UNO R3, masing-masing mengatur satu motor wiper melalui driver BTS7960. Kontrol gerakan *platform* dilakukan dengan pendekatan sistem umpan balik berbasis potensiometer dan logika PID (*Proportional Integral Derivative*) sederhana. Selain itu, integrasi dengan perangkat lunak X-Plane memungkinkan simulasi data posisi pesawat secara real-time. *Platform* ini tidak hanya dapat digunakan sebagai media pembelajaran interaktif, tetapi juga menjadi dasar pengembangan simulator berbiaya rendah yang dapat diintegrasikan ke dalam kurikulum pendidikan teknik penerbangan secara langsung (3,4).

2. TINJAUAN PUSTAKA

R.B. Johnson., dalam judulnya “*Innovative Applications of Wiper Motor Technology in Motion Simulation*,” Motor wiper, yang biasanya digunakan dalam kendaraan, telah menarik perhatian sebagai alternatif untuk teknologi simulasi. Keandalan dan daya tahan motor wiper menjadi nilai tambah dalam rancang bangun *platform* gerak simulasi(5).

Q. Wang., dkk., dalam judulnya “*Enhancing Realism in Motion Simulation: A Focus on 3-DOF Platforms*,” Simulasi dengan 3 derajat kebebasan (DOF) memberikan fleksibilitas gerak yang tinggi. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa penggunaan 3 DOF dapat meningkatkan realisme simulasi, terutama dalam konteks simulasi penerbangan (6).

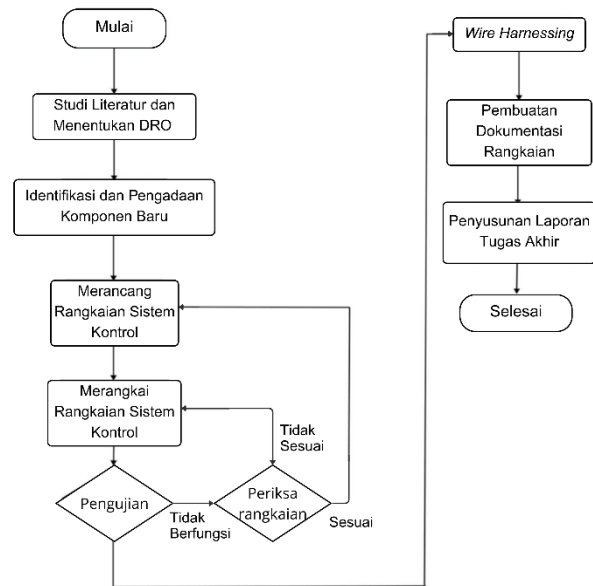
C. Lee., dkk., dalam judulnya “*Electronics and Control Strategies for Motion Simulation Systems*,” Integrasi sistem kontrol elektronika dan sensor menjadi kunci dalam merancang *platform* gerak simulasi. Penerapan potensiometer sebagai sensor umpan balik menjadi salah satu pendekatan yang umum digunakan (7).

Wibowo. Singgih Satrio., dalam judulnya “*Algoritma Kinematika Balik Platform Stewart Dengan Servo Putar*,” membahas tentang penyusunan algoritma kinematika balik dan penerapan kontrol PID pada sistem *platform* bergerak dua derajat kebebasan (2-DOF), sebagai dasar perhitungan gerakan dinamis dan akurasi arah aktuasi (8).

Abhinaya, M. A., dalam judulnya “*Rancang Bangun Platform Gerak untuk Simulator Pesawat Udara: Kajian dan Perancangan Rangkaian Listrik dan Elektronika*,” disebutkan bahwa perancangan sistem kelistrikan dan elektronika berperan besar dalam memastikan kestabilan dan keamanan sistem *platform* gerak, terutama dalam tahap pengujian dan integrasi dengan perangkat lunak simulasi (9).

3. METODE PENYELESAIAN MASALAH

Metode penyelesaian masalah dalam penelitian ini dilakukan secara sistematis dan terstruktur, dimulai dari tahap studi literatur sebagai dasar pemahaman teori, hingga proses pengujian untuk memastikan apakah program atau kode yang dibuat dapat berfungsi dengan baik sesuai kebutuhan sistem. Setiap tahapan dilakukan secara berurutan agar proses perancangan dan implementasi sistem berjalan efektif dan terarah. Rangkaian proses ini dapat dilihat pada Gambar 1 berikut:



Gambar 1. Flowchart Penyelesaian Masalah

3.1 Studi Literatur

Studi literatur dilakukan untuk memperoleh pemahaman teoritis terkait sistem kontrol, mekanisme pergerakan tiga derajat kebebasan (3DOF), serta pemrograman mikrokontroler berbasis Arduino. Sumber referensi meliputi jurnal ilmiah, buku teknis, dan dokumen terdahulu yang membahas penggunaan motor wiper sebagai aktuator, sistem kontrol PID, serta integrasi *platform* dengan *software* simulasi seperti X-Plane. Hasil dari studi ini menjadi dasar dalam menentukan pendekatan perancangan sistem dan pemilihan komponen utama yang sesuai.

3.2 Design Requirements and Objectives (DRO)

Design Requirements and Objectives (DRO) merupakan aspek fundamental dalam proses perancangan. Rincian spesifikasi yang dirumuskan dalam tahap ini menjadi dasar dalam setiap keputusan teknis selama proses perancangan. Informasi lengkap mengenai DRO ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1 Design Requirements and Objectives

Tipe	Kategori	Parameter
Functional Requirements	Must	1. Platform memiliki 3 Degree of Freedom (DoF) untuk mensimulasikan gerakan pesawat yaitu, <i>Rolling</i> (rotasi terhadap sumbu longitudinal atau x), <i>pitching</i> (rotasi terhadap sumbu lateral atau y), dan <i>yawing</i> (rotasi terhadap sumbu vertikal atau z).
		2. Platform dapat bergerak <i>Rolling</i> sejauh +10° dan -10°
		3. Platform dapat bergerak <i>pitching</i> sejauh +10° dan -5°.
		4. Platform dapat bergerak <i>yawing</i> sejauh +10° dan -10°.
		5. Platform harus kompatibel dengan <i>software</i> XPlane versi 11 yang mendukung output data posisi pesawat dalam format UDP atau Serial.

	<i>Wish</i>	<i>Platform</i> mendukung kontrol tambahan via <i>joystick</i> .
<i>Komunikasi</i>	<i>Must</i>	Sistem harus mampu menerima data gerakan dari X-Plane melalui UDP atau Serial dengan latency < 100 ms.
	<i>Wish</i>	Sistem mendukung koneksi nirkabel (Wi-Fi/Bluetooth) untuk komunikasi dengan simulator.
<i>Non-Functional Requirements</i>	<i>Must</i>	1. Konsumsi daya maksimum sistem tidak boleh melebihi batas aman dari <i>Power Supply Unit</i> (PSU) 24VDC yang digunakan. 2. Material konstruksi <i>platform</i> harus cukup kuat untuk menahan beban hingga minimum 80 kg.
	<i>Must</i>	Menggunakan komponen yang lebih ramah biaya.
<i>Economic Requirements</i>	<i>Wish</i>	Penggunaan komponen dengan harga lebih murah tanpa mengurangi performa.

3.3 Alat Yang Digunakan

Seluruh perangkat dan komponen yang digunakan dalam mendukung proses perancangan dan implementasi sistem dijelaskan secara rinci pada Tabel 2. Tabel tersebut mencakup daftar alat dan bahan yang meliputi komponen utama sistem kontrol, elemen kelistrikan, serta berbagai perangkat pendukung lainnya yang digunakan dalam tahapan perakitan, pengujian, dan integrasi sistem secara keseluruhan.

Tabel 2 Alat yang digunakan

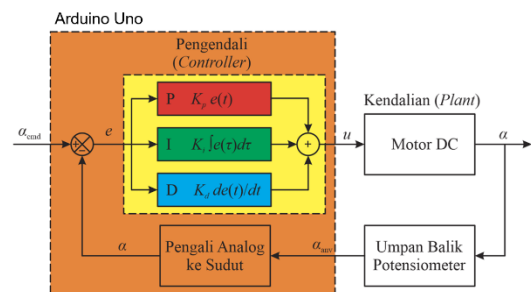
No.	Nama Alat	Jumlah
1.	Arduino UNO R3	3
2.	Arduino Mega 2560	1
3.	BTS7960 43A High Power Motor Driver Modul	3
4.	Power Supply Unit 24 VDC 20A	1
5.	Power Supply Unit 24 VDC 50A	1
6.	Potentiometer Multi-Turn	3
7.	Logitech Extreme 3D Pro Joystick	1
8.	Motor Wiper 24VDC	3
9.	Box Elektronik	1
10.	Pulley Set	3
11.	MCB (Miniature Circuit Breaker) C4	1
12.	MCB (Miniature Circuit Breaker) C16	1
13.	Fuse 4A	3

3.4 Perancangan Rangkaian Sistem Kontrol

Perancangan rangkaian sistem kontrol merupakan tahapan penting dalam membangun sistem simulator gerak, karena pada tahap inilah seluruh komponen kelistrikan dan elektronik dihubungkan serta diatur fungsinya. Rangkaian sistem kontrol terdiri dari beberapa bagian utama, mulai dari sistem kendali utama berbasis Arduino, rangkaian *driver motor*, hingga jalur distribusi daya dan sinyal antar perangkat.

3.4.1 Diagram Kendali

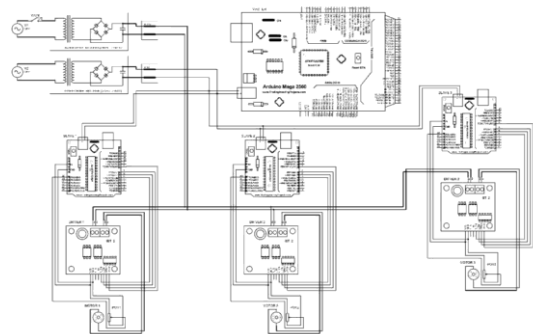
Diagram kendali sistem menunjukkan alur kerja pengendalian posisi motor menggunakan pendekatan PID (*Proportional Integral Derivative*) berbasis mikrokontroler Arduino. Sistem terdiri dari tiga unit servo motor DC yang dikendalikan secara terpisah menggunakan Arduino UNO sebagai pengolah lokal (*slave*), dengan input perintah dari Arduino Mega 2560 sebagai pengendali utama (*master*). Perintah sudut dikirim dari master kepada masing-masing slave melalui komunikasi serial. Setiap Arduino UNO menerima nilai sudut target α_{cmd} , kemudian membaca nilai aktual posisi dari potensiometer α_{anv} . Perlu diingat bahwa nilai yang dihasilkan potensiometer bukanlah nilai sudut asli, ini hanyalah nilai posisi potensiometer yang berbanding lurus dengan sudut motor. maka untuk mendapatkan sudut asli motor, diperlukan sebuah konstanta pengali nilai Analog ke Sudut ($K\alpha$) yang didapatkan dari hasil perhitungan, yang pada akhirnya menghasilkan nilai sudut sebenarnya yaitu α . Diagram kendali sistem secara umum ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 2. Diagram Kendali Sistem Kontrol Servo Menggunakan PID (8).

3.4.2 Diagram Skematik

Sistem kontrol dirancang menggunakan Arduino Mega 2560 sebagai pengendali utama (*master*) yang mengirimkan perintah sudut ke tiga Arduino UNO R3 (*slave*). Masing-masing UNO mengendalikan satu motor wiper menggunakan driver BTS7960 berdasarkan referensi sudut dari Arduino Mega. Data sudut ini berasal dari komputer (PC) yang terhubung ke X-Plane dan dikirim secara serial ke Mega.



Gambar 3 Schematic Diagram Platform Gerak

Pada Gambar 3 setiap motor membentuk satu sistem servo dengan umpan balik dari potensiometer multi-turn, sehingga pergerakan *platform* dapat merepresentasikan gerakan

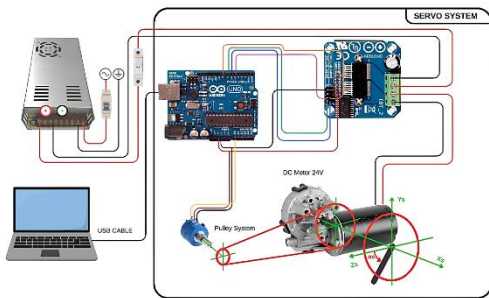
pesawat pada tiga sumbu utama. Komunikasi antara Arduino Mega dan tiga UNO dilakukan melalui serial (TX-RX) dengan konfigurasi port sebagai berikut:

- UNO 1: TX1/RX1 (pin 18/19)
- UNO 2: TX2/RX2 (pin 16/17)
- UNO 3: TX3/RX3 (pin 14/15)

Untuk koneksi driver BTS7960 ke Arduino UNO, digunakan pin R_PWM (D8), L_PWM (D7), R_EN (D6), dan L_EN (D5), dengan suplai daya 5V dan GND. Potensiometer terhubung ke pin A0, VCC, dan GND pada setiap UNO. Informasi posisi aktual motor dibaca dan dibandingkan secara real-time untuk menjaga akurasi gerakan. Dengan konfigurasi ini, sistem menghasilkan pergerakan *platform* yang stabil dan sesuai dengan sudut yang ditentukan melalui simulasi.

3.4.3 Diagram Pengawatan Sistem Servo

Diagram pengawatan sistem servo ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4 Diagram pengawatan sistem servo dengan kontrol PID

Setiap unit servo menggunakan potensiometer sebagai sensor umpan balik yang terhubung ke pin analog A0 pada Arduino UNO. Potensiometer ini dipasang pada poros motor DC melalui sistem puli untuk meningkatkan akurasi pembacaan sudut. Rasio puli motor terhadap puli potensiometer dibuat lebih besar untuk meningkatkan sensitivitas pembacaan sudut. Untuk kendali motor, pin R_PWM dihubungkan ke pin digital D8 dan L_PWM ke D7, sedangkan pin R_EN dan L_EN dihubungkan ke D6 dan D5. Sinyal PWM digunakan untuk mengatur besar tegangan, sementara logika digital pada pin enable digunakan untuk menentukan arah rotasi motor, baik searah jarum jam (*clockwise*) maupun berlawanan arah jarum jam (*counterclockwise*).

Pergerakan sudut lengan motor α_s menggunakan prinsip tangan kanan, yang mana pergerakannya dibatasi sebesar 180° , ketika lengan servo berhimpit dengan sumbu Z_s , besaran $\alpha_s = 0^\circ$, ketika lengan servo berhimpit dengan sumbu Y_s , besaran $\alpha_s = 90^\circ$, dan ketika lengan servo berhimpit dengan sumbu $-Y_s$, besaran $\alpha_s = -90^\circ$. Gerakan sudut ini diikuti oleh rotasi potensiometer, menghasilkan sinyal analog yang mewakili sudut aktual, yang kemudian dikonversi dalam sistem kontrol berbasis PID untuk menjaga presisi dan kestabilan gerak. Perbandingan ini dinyatakan dalam persamaan berikut.

$$K_{pul} = \frac{D_{srv}}{D_{pot}} = \frac{\alpha_s}{\alpha_p} \quad (1)$$

Ketika servo berputar sebesar α_s , maka potensiometer berputar sebesar α_p , maka, dipenuhi persamaan berikut.

$$\alpha_p = \alpha_s K_{pul} = \alpha_s \times \frac{D_{srv}}{D_{pot}} \quad (2)$$

$$\alpha_p = 1 \times \frac{37.45}{11}$$

$$\alpha_p = 3.40$$

Nilai keluaran dari potensiometer bukan berupa sudut aktual dalam derajat, melainkan nilai analog (α_{anv}) yang dibaca oleh Arduino. Oleh karena itu, diperlukan konstanta konversi K_{pot} , untuk mengubah nilai analog menjadi sudut aktual. Misalnya, pada potensiometer multi-turn 10 putaran, total sudut maksimum adalah 3600° . Dengan resolusi pembacaan analog Arduino sebesar 10 bit (0–1023), maka nilai $\alpha_{anv} = 1023$ dapat diperoleh dari perbandingan tersebut, seperti ditunjukkan dalam persamaan berikut.

$$K_{pot} = \frac{\alpha_{anv}}{\alpha_{pot}} = \frac{1023}{3600} \quad (3)$$

$$K_{pot} = 0.284$$

Selanjutnya, ditetapkan konstanta pengali untuk mengonversi nilai analog potensiometer menjadi sudut aktual servo, yaitu:

$$K_\alpha = \frac{\alpha_{srv}}{\alpha_{anv}} \quad (4)$$

Dengan menggunakan Persamaan (1) dan (2), di dapatkan

$$K_\alpha = \frac{\alpha_s}{\alpha_{pot} \alpha_p} = \frac{1}{K_{pot} K_{pul}} \quad (5)$$

$$K_\alpha = \frac{1}{0.284 \times 3.40}$$

$$K_\alpha = 1.035$$

Nilai – nilai konstanta yang didapatkan berdasarkan persamaan diatas, dipergunakan dalam pembuatan *software*, dimana konstanta tersebut dimasukkan kedalam *source code* yang telah dibuat, yang akan diolah oleh *microcontroller* yaitu Arduino Uno.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pengujian

Pengujian memastikan program berjalan sesuai perintah. Arduino Mega mengirim nilai sudut langsung ke slave tanpa konversi. Nilai 720 dibaca sebagai posisi awal potensiometer (5 putaran) dan digunakan untuk menggerakkan *platform* pada sumbu *roll*, *pitch*, dan *yaw* lihat Tabel 3.

Tabel 3 Nilai yang diinput dari master

	Pergerakan					
	Platform Rolling		Platform Pitching		Platform Yawing	
	+10°	-10°	+10°	-5°	+10°	-10°
Servo 1	630	810	810	630	-	-
Servo 2	810	630	810	630	-	-
Servo 3	-	-	-	-	630	810

Pada Tabel 4 Hasil Pengujian Servo 1 hingga Tabel 6 adalah nilai yang diterima pada *slave*.

Tabel 4 Hasil Pengujian Servo 1

	Pergerakan			
	Platform Rolling		Platform Pitching	
	+10°	-10°	+10°	-5°
Nilai yang diterima	630	810	810	630
Nilai pada Potentiometer	630	810	810	630

Tabel 5 Hasil Pengujian Servo 2

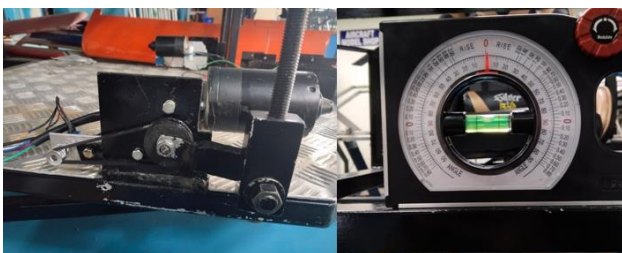
	Pergerakan			
	Platform Rolling		Platform Pitching	
	+10°	-10°	+10°	-5°
Nilai yang diterima	810	630	810	630
Nilai pada Potentiometer	810	630	810	630

Tabel 6 Hasil Pengujian Servo 3

	Pergerakan Platform Yawing	
	+10°	-10°
Nilai yang diterima	630	810
Nilai pada Potentiometer	630	810

4.2 Pembahasan

Hasil pengujian pada Tabel 3 hingga 6 menunjukkan bahwa nilai potensiometer sesuai dengan data yang dikirim dari *master* dan diterima oleh *slave*, tanpa terjadi selisih. Pada kondisi awal, potensiometer disetel pada posisi 5 putaran (setara 720) dan tanduk *motor wiper* diselaraskan dengan bidang *platform*. Kalibrasi awal dilakukan menggunakan *waterpass* untuk memastikan *platform* berada pada posisi datar sebelum pengujian dimulai. *Motor wiper* 1 dipasang di sisi kiri, *motor wiper* 2 di sisi kanan, dan *motor wiper* 3 di bagian belakang *platform*, dengan arah rotasi motor 1 dan 2 saling berlawanan. Konfigurasi ini ditunjukkan pada Gambar 5 dan Gambar 6.



Gambar 5 Posisi awal tanduk servo motor 1 dan 2 dan *waterpass*



Gambar 6 Posisi tanduk motor wiper 3

Pada pengujian pergerakan *Rolling* sebesar +10°, motor servo 1 dan servo 2 dikalibrasi terlebih dahulu menggunakan *waterpass* pada struktur bagian depan untuk memastikan posisi awal sejajar Gambar 5. Keduanya kemudian bergerak sebesar 90° searah jarum jam (*clockwise*), sehingga menghasilkan kemiringan *platform* ke arah kanan. Karena poros servo memutar potensiometer, terjadi perubahan nilai dari posisi awal 720. Servo 1 menghasilkan nilai 630, sedangkan servo 2 menjadi 810, sesuai arah pergerakan masing-masing. Proses pergerakan *platform* ditampilkan pada Gambar 7.



Gambar 7 *Platform* dalam posisi *Rolling* +10°

Pada pengujian gerakan *Rolling* sebesar -10°, motor servo 1 dan 2 bergerak masing-masing sebesar 90° berlawanan arah jarum jam (*counterclockwise*), sehingga menyebabkan *platform* miring ke kiri. Karena potensiometer terhubung langsung ke poros servo, perubahan sudut ini mengubah nilai potensiometer dari posisi awal 720 menjadi 810 pada servo 1 dan 630 pada servo 2. Proses pergerakan *platform* ditampilkan pada Gambar 8.



Gambar 8 Platform dalam posisi Rolling -10°

Pada pengujian gerakan *pitching* sebesar $+10^\circ$, motor servo 1 bergerak sebesar 90° searah jarum jam (*clockwise*), sedangkan motor servo 2 bergerak 90° berlawanan arah jarum jam (*counterclockwise*). Kombinasi pergerakan ini menghasilkan efek mengangkat bagian depan *platform*, sehingga posisi *platform* tampak mendongak ke atas. Karena poros servo terhubung dengan potensiometer melalui sistem puli, rotasi servo menyebabkan perubahan nilai potensiometer. Nilai awal sebesar 720 berubah menjadi 810 pada kedua servo, sesuai arah dan besar sudut rotasinya. Proses pengujian ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 9 Platform dalam posisi Pitching $+10^\circ$

Pada pengujian *pitching* sebesar -5° , motor servo 1 bergerak 90° berlawanan arah jarum jam, sedangkan servo 2 berputar 90° searah jarum jam. Pergerakan ini menyebabkan *platform* menunduk atau mengarah ke bawah. Karena poros servo terhubung ke potensiometer, perubahan sudut tersebut menyebabkan nilai potensiometer berubah dari 720 menjadi 630 pada kedua servo. Proses pergerakan ditampilkan pada Gambar 10.



Gambar 10 Platform dalam posisi Pitching -5°

Pada pengujian gerakan *yawing*, motor belakang mampu menggerakkan *platform* ke arah kanan dan kiri dengan baik serta mengikuti arah input secara responsif. Secara keseluruhan, pergerakan berlangsung lancar, meskipun ditemukan sedikit hambatan mekanis pada titik-titik tertentu. Hambatan ini disebabkan oleh ketidaksejajaran aksial antara ball joint dan tanduk motor, sehingga terjadi tekanan tidak merata saat tanduk bergerak dari posisi $<0^\circ$ ke $>0^\circ$. Pengujian *yawing* dengan input manual menunjukkan bahwa motor mampu menggerakkan *platform* hingga $\pm 10^\circ$, dan sudut gerak diverifikasi menggunakan busur derajat, seperti ditunjukkan pada Gambar 11.



Gambar 11 Pengukuran menggunakan busur ketika *platform yawing* $+10^\circ$ dan -10°

Nilai potensiometer pada masing-masing slave menunjukkan kesesuaian yang sangat dekat dengan sudut target (*Theta_d*) dari *master*. Deviasi kecil yang muncul disebabkan oleh beban mekanis dan inersia motor saat beradaptasi, namun tetap berada dalam batas toleransi dan tidak memengaruhi arah maupun hasil akhir pergerakan.

4.3 Integrasi Sistem dengan *Software X-Plane*

Setelah pengujian manual, sistem diintegrasikan dengan perangkat lunak simulasi X-Plane untuk menerima data gerakan secara real-time, mencakup sudut roll, pitch, dan yaw. Data ini diterjemahkan oleh Arduino Mega sebagai pengendali utama menjadi perintah gerak untuk *platform*. Tampilan saat *platform* dan X-Plane dijalankan secara bersamaan ditunjukkan pada Gambar 12.



Gambar 12 Tampilan Setelah Menjalankan X-Plane

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem berhasil terintegrasi dengan X-Plane dan mampu merespons perintah gerakan sesuai input simulator. *Platform* bergerak mengikuti arah data, namun gerakannya masih terasa kaku dan kurang halus akibat belum optimalnya tuning kontrol PID. Respon motor cenderung langsung tanpa penyesuaian bertahap terhadap perubahan sudut. Meskipun demikian, pengujian ini membuktikan bahwa sistem mampu membaca dan menanggapi data simulasi secara dinamis.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan proses perancangan, perakitan, dan pengujian yang telah dilakukan, diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Sistem motion *platform* berhasil dirancang dan diuji menggunakan komponen utama seperti motor wiper DC, driver BTS7960, potensiometer multi-turn, serta mikrokontroler Arduino yang dipilih berdasarkan kecocokan terhadap performa dan kebutuhan kontrol sistem. Rangkaian kelistrikan juga telah mampu menyuplai daya secara stabil dan aman menggunakan power supply 24VDC, MCB, fuse, dan panel distribusi, namun ke depannya disarankan penggunaan box panel yang lebih besar dengan sirkulasi udara yang baik agar

penataan komponen lebih rapi dan perawatan lebih mudah dilakukan.

2. Sistem kontrol yang dibangun berhasil mengatur motor DC agar bekerja menyerupai motor servo dengan memanfaatkan potensiometer sebagai umpan balik posisi dan mampu merespons input secara manual maupun real-time dari *software* X-Plane dengan akurasi yang cukup baik. Meski demikian, tuning PID masih perlu disempurnakan untuk mengurangi hentakan gerakan dan meningkatkan kelancaran pergerakan, serta perlu dilakukan kalibrasi ulang skala input dari X-Plane agar pergerakan tidak berlebihan meskipun filtering sinyal telah diterapkan.
3. Dari sisi mekanik, penggunaan pulley tirus direkomendasikan untuk meningkatkan daya cengkram dan mencegah slip agar gerakan *platform* lebih stabil dan presisi. Sebagai pengembangan lebih lanjut, pemanfaatan motor stepper atau aktuator hidrolik dapat menjadi solusi alternatif karena mampu menghasilkan gerakan yang lebih halus dan bertenaga, yang sangat sesuai untuk kebutuhan simulasi penerbangan dengan tingkat ketelitian dan kestabilan tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

1. Casas S, Coma I, Portalés C, Fernández M. Optimization of 3-DOF parallel motion devices for low-cost vehicle simulators. *J Adv Mech Des Syst Manuf*. 2017;11(2).
2. Pouliot NA, Nanon MA, Gosselin CM. Analysis and comparison of the motion simulation capabilities of three-degree-of-freedom flight simulators. *1996 Flight Simul Technol Conf*. 1996;37-47.
3. Bhagwatkar MSR, Dhande M. A Review on Automatic Closed Loop Speed Control of a DC Motor. *Int J Adv Res Comput Commun Eng*. 2015;137-9.
4. sahu J, Sahu S, Kumar J. Microcontroller Based Dc Motor Control. *Int J Eng Res Technol*. 2012;1.
5. Johnson RB. Innovative Applications of Wiper Motor Technology in Motion Simulation. *J Veh Simul*. 2020;22(1):45-62.
6. Wang Q, others. Enhancing Realism in Motion Simulation: A Focus on 3-DOF *Platforms*. *Aerosp Eng J*. 2019;32(4):300-15.
7. Lee C, others. Electronics and Control Strategies for Motion Simulation Systems. *IEEE Trans Control Syst*. 2017;25(3):210-25.
8. Wibowo SS. Algoritma Kinematika Balik *Platform* Stewart Dengan Servo Putar. 2023.
9. Abhinaya M, Salim Y, Firmansyah P, Wibowo S. Rancang Bangun *Platform* Gerak Untuk Simulator Pesawat Udara : Kajian Dan Perancangan Rangkaian Listrik Dan Elektronika. *Pros Ind Res Work Natl Semin*. 2024 Aug 2;15:131-8.