



Rancang Bangun Kendali *Aircraft Jacking* pada Pesawat Boeing 737-800 untuk Pengaturan Sudut Kemiringan

Aditya Ghiffari Rukmananda*¹, Aries Boedi Setiawan², Wahyu Dirgantara³

^{1,2,3} Teknik Elektro, Universitas Merdeka Malang, Indonesia

Alamat: Jl. Terusan Raya Dieng No. 62-64

Korespondensi penulis: adityaghiffari00@gmail.com*

Abstract. This research aims to design an Aircraft Jacking control system for the Boeing 737-800 to automatically balance the aircraft's inclination using an MPU6050 sensor and servo actuators. The system can detect pitch and roll angles with an accuracy of $\pm 0.5^\circ$ and an average response time of 150 ms. Based on tests using five datasets, the balancing time ranges from 400 to 600 ms, depending on the initial imbalance. In Dataset 5, with a pitch of 3.5° and a roll of -2.3° , the system required 600 ms to achieve balance, demonstrating its ability to handle critical conditions. The servo actuators successfully adjusted the jacking height within a range of 2 cm with a precision of ± 0.02 cm, while the OLED-based monitoring system allowed operators to observe the inclination angles in real-time. Furthermore, ESP-NOW-based communication achieved a data transmission success rate of 98%, supporting efficient centralized control. This research demonstrates the system's effectiveness in balancing the aircraft quickly and accurately, providing a foundation for further development under extreme conditions and energy efficiency improvements.

Keywords: Aircraft Jacing, Auto Alignment, ESP-NOW, MPU6050, Monitoring.

Abstrak. Penelitian ini bertujuan untuk merancang sistem kendali *Aircraft Jacking* pada pesawat Boeing 737-800 guna menyeimbangkan sudut kemiringan secara otomatis menggunakan sensor MPU6050 dan aktuator servo. Sistem mampu mendeteksi sudut *pitch* dan *roll* dengan akurasi $\pm 0.5^\circ$ dan waktu respons rata-rata 150 ms. Berdasarkan pengujian lima pengujian, waktu penyeimbangan bervariasi dari 400 hingga 600 ms, tergantung tingkat ketidakseimbangan awal. Pada pengujian 5, dengan *pitch* 3.5° dan *roll* -2.3° , sistem membutuhkan waktu 600 ms untuk mencapai keseimbangan, menunjukkan kemampuan menangani kondisi kritis. Aktuator servo berhasil menggerakkan *jacking* dalam rentang 2 cm dengan ketelitian ± 0.02 cm, sementara sistem *monitoring* berbasis OLED mempermudah operator memantau sudut kemiringan secara real-time. Selain itu, komunikasi berbasis ESP-NOW menunjukkan keberhasilan pengiriman data sebesar 98%, mendukung kontrol terpusat yang efisien. Penelitian ini membuktikan efektivitas sistem dalam menyeimbangkan pesawat dengan cepat dan akurat, serta memberikan dasar untuk pengembangan lebih lanjut pada kondisi ekstrem dan efisiensi energi.

Kata kunci: Auto Alignment, ESP-NOW, Jacking Pesawat, MPU6050, Monitoring.

1. LATAR BELAKANG

Perubahan teknologi yang pesat membawa dampak positif dalam kehidupan sehari-hari, termasuk bidang transportasi udara yang menjadi pilar penting bagi negara kepulauan seperti Indonesia. Transportasi udara mendukung konektivitas antardaerah, meningkatkan efisiensi waktu, dan mendorong pertumbuhan ekonomi. Kenyamanan dan kecepatan menjadikan moda ini pilihan utama masyarakat.

Namun, dunia penerbangan harus mematuhi aturan ICAO (*International Civil Aviation Organization*), termasuk memenuhi *airworthiness* atau kelaikan terbang. Untuk memastikan *airworthiness*, perawatan atau maintenance pesawat harus memenuhi standar yang ditetapkan, baik sebelum maupun sesudah operasi.

Salah satu proses penting dalam perawatan pesawat adalah *aircraft jacking*, atau pengangkatan pesawat, yang dilakukan untuk mengganti landing gear atau melakukan up-down check. Proses ini memerlukan posisi dan pengendalian jack yang presisi pada tiga titik utama. Saat ini, proses manual yang diawasi dengan inclinometer rawan miskomunikasi, berisiko menyebabkan pesawat miring atau tergelincir dari jack point.

Pada 2022, insiden tercatat akibat kemiringan pesawat berlebihan, yang menyebabkan kerusakan fuselage. Penyebabnya adalah kurangnya komunikasi dan kesadaran situasi. Untuk menghindari insiden serupa, penulis mengembangkan alat *monitoring* kemiringan pesawat menggunakan sensor MPU6050 dan mikrokontroler ESP32. Sistem ini memonitor sudut *pitch*, *yaw*, dan *roll* secara real-time, meningkatkan keamanan proses *aircraft jacking*.

2. KAJIAN TEORITIS

Aircraft Jacking

Aircraft jacking adalah proses pengangkatan pesawat menggunakan peralatan khusus yang disebut jack untuk keperluan pemeliharaan, inspeksi, atau perbaikan. Proses ini penting untuk memastikan keselamatan dan efisiensi operasional pesawat, terutama saat pekerjaan memerlukan akses ke bagian bawah pesawat, seperti roda pendaratan atau struktur rangka. *Jacking* dilakukan dengan hati-hati untuk mencegah kerusakan pada struktur pesawat atau risiko keselamatan lainnya.

Prosedur *aircraft jacking* dimulai dengan mempersiapkan area kerja yang datar, bersih, dan bebas dari gangguan. Kemudian, teknisi memastikan bahwa pesawat dalam posisi stabil dengan menggunakan chock pada roda untuk mencegah pergerakan. Setelah itu, titik-titik *jacking* yang ditentukan oleh pabrikan pesawat diidentifikasi. Jack yang sesuai dengan spesifikasi pesawat ditempatkan di titik-titik tersebut, dan proses pengangkatan dimulai secara bertahap untuk menjaga keseimbangan pesawat.

Selama proses, teknisi memantau posisi pesawat menggunakan alat pengukur atau indikator leveling untuk memastikan bahwa pesawat tetap sejajar sesuai toleransi yang diizinkan. Jika diperlukan, penyesuaian dilakukan untuk menjaga stabilitas. Setelah pekerjaan selesai, pesawat diturunkan dengan hati-hati, dan semua jack dilepaskan. Prosedur ini dilakukan dengan memperhatikan panduan teknis pabrikan dan protokol keselamatan yang ketat untuk mencegah kerusakan pada pesawat atau cedera pada teknisi.

Euler Angle

Euler Angle adalah metode untuk mendeskripsikan orientasi suatu benda kaku dalam ruang tiga dimensi dengan menggunakan tiga sudut rotasi, yaitu *yaw* (ψ), *pitch* (θ), dan *roll*

(ϕ). Metode ini mendefinisikan rotasi relatif antara dua sistem koordinat dengan menggunakan kombinasi rotasi berurutan pada tiga sumbu. Dalam aplikasi pesawat terbang, Euler Angle digunakan untuk menggambarkan orientasi pesawat terhadap permukaan bumi dalam kerangka koordinat inersia atau lokal. Euler Angle dapat direpresentasikan dalam bentuk matriks rotasi yang merupakan kombinasi dari tiga rotasi dasar, masing-masing pada sumbu Z, Y, dan X

Yaw

Sudut yaw menggambarkan rotasi terhadap sumbu vertikal (z). Rotasi ini menentukan arah pesawat relatif terhadap utara atau referensi horizontal lainnya. Matriks rotasi untuk yaw diberikan sebagai berikut

$$R_z = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Pitch

Pitch adalah sudut rotasi terhadap sumbu lateral (y), menggambarkan apakah hidung pesawat mengarah ke atas atau ke bawah. Matriks rotasi untuk *pitch* yakni sebagai berikut.

$$R_y = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

Roll

Roll adalah sudut rotasi terhadap sumbu longitudinal (x), menunjukkan kemiringan sayap pesawat. Matriks rotasi untuk *roll* yaitu

$$R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ 0 & \sin(\phi) & \cos(\phi) \end{bmatrix}$$

Untuk menggambarkan orientasi keseluruhan pesawat, rotasi total dapat dihitung dengan menggabungkan rotasi yaw, *pitch*, dan *roll* secara berurutan. Matriks rotasi totalnya yaitu.

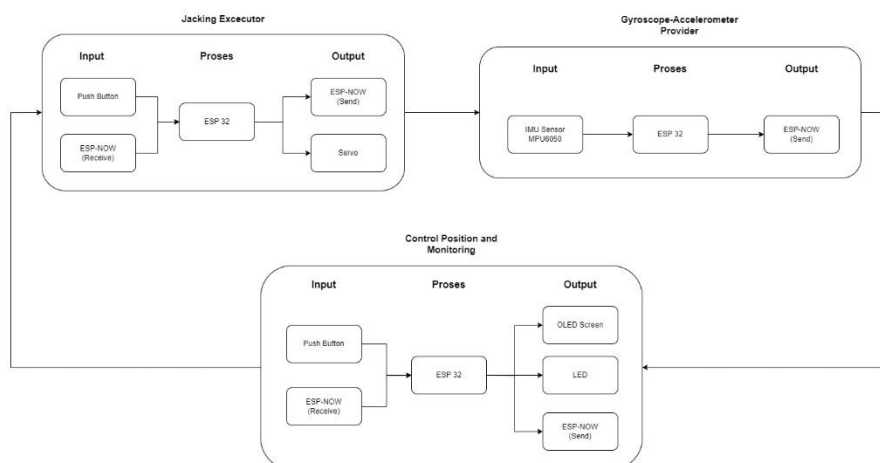
$$R = R_z \cdot R_y \cdot R_x$$

Penerapan sudut Euler pada pesawat sangat penting untuk mendeskripsikan orientasi pesawat dalam ruang tiga dimensi selama penerbangan. Sudut Euler, yang terdiri dari yaw, *pitch*, dan *roll*, digunakan dalam sistem navigasi inersia (INS) untuk menentukan posisi dan orientasi pesawat relatif terhadap permukaan bumi. Dalam sistem kontrol penerbangan, sudut Euler digunakan untuk mengontrol arah, ketinggian, dan kestabilan pesawat dengan mengatur permukaan kontrol seperti rudder, elevator, dan aileron. Misalnya, sudut yaw membantu mengatur arah pesawat terhadap sumbu vertikal, sudut *pitch* mengontrol gerakan naik atau

turun hidung pesawat, dan sudut *roll* memastikan kemiringan pesawat tetap sesuai dengan kebutuhan manuver. Selain itu, sudut Euler juga digunakan dalam simulasi penerbangan untuk merepresentasikan gerakan pesawat secara real-time, memungkinkan pelatihan pilot yang lebih realistis. Meskipun memiliki kelemahan seperti gimbal lock, penggunaan sudut Euler tetap menjadi bagian integral dalam navigasi dan pengendalian pesawat, sering kali dilengkapi dengan metode modern seperti quaternion untuk meningkatkan akurasi dan stabilitas.

3. METODE PENELITIAN

Rancang bangun alat ini dimulai dari mencari referensi dari berbagai sumber seperti jurnal, maintenance manual pesawat, dan sumber lainnya yang berkaitan dengan topik dari penelitian. Lalu perancangan diagram blok sistem dilakukan untuk mendapatkan gambaran sistem secara keseluruhan. Diagram blok sistem terdiri dari 3 subsistem yaitu sistem *Gyroscope-Accelerometer Provider* (GAP), *Control Position and Monitoring* (CPM), dan *Jacking Executor* (JE). Berikut adalah diagram blok sistem keseluruhan.



Gambar 1. Diagram Blok Sistem

Gyroscope-accelerometer Provider (GAP) adalah perangkat yang dipasang pada platform pesawat dan berfungsi sebagai alat yang membaca sudut orientasi pesawat. GAP akan membaca nilai sudut X dan Y pesawat melalui input sensor gyroscope-accelerometer MPU6050. Jika keadaan pesawat berubah yang dihasilkan oleh MPU6050 juga akan berubah. Arduino Nano disini berfungsi sebagai pemroses data mentah MPU6050 menjadi data output nilai sudut X dan Y. Data output kemudian dikirimkan melalui transmisi *wireless* berbasis ESP-NOW.

Pada subsistem *Control Position and Monitoring* (CPM), perangkat berguna sebagai kendali utama dan user *interface* keseluruhan sistem. Push button akan berfungsi sebagai pengontrol ketiga jack secara terpusat dan mengendalikannya secara bersamaan. Selain itu,

sistem CPM ini berfungsi sebagai *monitoring* sudut yang mana nilai sudut berasal dari sistem GAP yang terpasang pada pesawat. Data yang dikirimkan oleh GAP adalah orientasi sudut X dan Y pesawat yang diolah oleh ESP32 menjadi output display dan ditampilkan pada OLED SSD1306. Sedangkan data yang dikirimkan oleh JE adalah perintah emergency stop yang akan dibahas pada paragraf selanjutnya.

Subsistem *Jacking Executor* (JE) adalah perangkat kendali yang disematkan pada masing-masing *aircraft jack* (total terdapat 3 buah *aircraft jack* dan 1 buah *aircraft auxiliary jack*). Perangkat terdiri dari input 2 buah tombol kendali push button (naik turun) dan 1 buah *status button*, pemroses yaitu ESP32, output berupa motor servo UP dan DOWN.

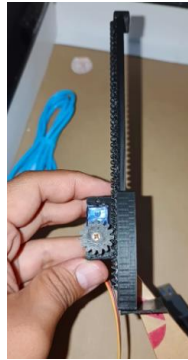
Berbeda dengan tombol kendali pada CPM yang dapat mengendalikan keseluruhan *aircraft jack*, tombol kendali pada JE berfungsi hanya untuk mengendalikan masing-masing jack itu sendiri. Jadi masing-masing jack memiliki tombol kendali masing-masing. Input kendali diolah oleh Arduino Nano menjadi output yang akan memerintahkan *jacking* naik atau turun.

Jika tombol *alignment* pada CPM diaktifkan, maka perangkat JE akan segera memulai proses *alignment*. Perintah *alignment* dan data *alignment* (berupa orientasi X dan Y pesawat) diterima melalui komunikasi ESP-NOW. Output ESP32 berupa sinyal listrik yang bertujuan untuk memberikan motor servo naik atau turun. *Status button* berfungsi untuk memberikan sinyal pada CPM bahwa operator *jacking* pada masing – masing *jacking point* sudah siap untuk mengoperasikan *jacking*.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengujian Servo

Pengujian ini dilakukan dengan cara menaikturunkan *jacking* yang digerakkan oleh servo. Servo dipasang beserta jack nya kemudian diberikan program loop yang menggerakkan servo dari sudut 0° hingga 180° dan sebaliknya secara berulang. Selain itu, ketinggian jack yang didapat dari pergerakan sudut 0° hingga 180° akan diukur untuk memastikan ketinggian minimum dan maksimum dari jack



Gambar 2. Pengujian Servo

Berdasarkan hasil pengujian, servo dapat digerakkan dengan baik ketika diberi input 0-180 dan dapat menggerakkan gear dari jack. Kemudian, berdasarkan hasil pengukuran, pada saat posisi 0°, jack memiliki ketinggian 15 cm dari permukaan sedangkan pada saat posisi 180° jack memiliki ketinggian 17 cm dari permukaan. Sehingga dapat disimpulkan bahwa range ketinggian yang dapat digunakan yakni sebesar 2 cm

Pengujian IMU Sensor MPU6050

Pengujian ini dilakukan dengan cara melakukan perbandingan antara sudut yang diukur oleh inclinometer sebagai referensi dengan sudut yang diukur oleh IMU sensor MPU6050. Sudut yang diukur yakni sudut pada gerak *pitch* dan *roll*. Hasil dari pengukuran tersebut yakni sebagai berikut

Tabel 1. Hasil Pengujian Gerak *Pitch* IMU Sensor MPU6050

Posisi Pesawat	Normal (°)	<i>Pitch Up</i> (°)					<i>Pitch Down</i> (°)				
Sudut Aktual	0	15	30	45	60	90	-15	-30	-45	-60	-90
Hasil Pembacaan IMU Sensor MPU 6050	-4.8	13.6	30.4	44.3	60.9	96.2	-22.3	-34.2	-53.8	-63.9	-99.6
	-4.8	13.6	30.4	44.7	60.9	96.2	-22.3	-34.3	-53.8	-64.1	-99.6
	-4.8	13.6	30.4	45.0	60.9	96.2	-22.3	-34.4	-53.8	-64.3	-99.5
	-4.8	13.6	30.4	45.3	60.9	96.2	-22.3	-34.5	-53.8	-64.4	-99.5
	-4.8	13.6	30.4	45.5	60.9	96.2	-22.3	-34.6	-53.8	-64.6	-99.5
	-4.8	13.6	30.4	45.7	60.9	96.2	-22.3	-34.6	-53.8	-64.8	-99.5
	-4.8	13.6	30.4	45.9	60.9	96.2	-22.3	-34.7	-53.8	-64.9	-99.5
	-4.8	13.6	30.4	45.9	60.9	96.3	-22.3	-34.8	-53.8	-65.1	-99.5

-4.8	13.6	30.4	45.8	60.9	96.3	-	-	-	-	-	
-4.8	13.6	30.4	45.8	60.9	96.3	22.3	34.9	53.8	65.2	99.5	
-4.8	13.6	30.3	45.7	60.9	96.3	-	-	-	-	-	
-4.8	13.6	30.3	45.7	60.9	96.3	22.3	35.0	53.8	65.3	99.5	
-4.8	13.6	30.3	45.6	60.9	96.3	-	-	-	-	-	
-4.8	13.6	30.3	45.6	60.9	96.3	22.3	35.1	53.7	65.5	99.5	
-4.8	13.6	30.3	45.7	60.9	96.3	-	-	-	-	-	
-4.8	13.6	30.3	45.7	60.9	96.3	22.3	35.2	53.7	65.6	99.5	
-4.8	13.6	30.3	45.6	60.9	96.3	-	-	-	-	-	
-4.8	13.6	30.3	45.6	60.9	96.3	22.3	35.3	53.7	65.7	99.6	
-4.8	13.6	30.3	45.4	60.9	96.3	-	-	-	-	-	
-4.8	13.6	30.3	45.4	60.9	96.3	22.3	35.4	53.7	65.9	99.6	
-4.8	13.6	30.3	45.3	60.9	96.3	-	-	-	-	-	
-4.8	13.6	30.3	45.3	60.9	96.3	22.3	35.4	53.7	66.0	99.6	
-4.8	13.6	30.3	45.2	60.9	96.4	-	-	-	-	-	
-4.8	13.6	30.3	45.2	60.9	96.4	22.3	35.5	53.6	66.1	99.6	
-4.8	13.6	30.3	45.0	60.9	96.4	-	-	-	-	-	
-4.8	13.6	30.3	45.0	60.9	96.4	22.3	35.6	53.6	66.3	99.6	
-4.8	13.6	30.3	44.9	60.9	96.4	-	-	-	-	-	
-4.8	13.6	30.3	44.9	60.9	96.4	22.3	35.7	53.6	66.4	99.6	
-4.8	13.6	30.3	44.8	60.9	96.4	-	-	-	-	-	
-4.8	13.6	30.3	44.8	60.9	96.4	22.3	35.7	53.6	66.5	99.6	
-4.8	13.6	30.2	44.7	61.0	96.5	-	-	-	-	-	
-4.8	13.6	30.2	44.7	61.0	96.5	22.3	35.8	53.5	66.6	99.6	
-4.8	13.6	30.2	44.7	61.0	96.5	-	-	-	-	-	
-4.8	13.6	30.2	44.7	61.0	96.5	22.3	35.9	53.5	66.8	99.6	
-4.8	13.6	30.2	44.6	61.0	96.6	-	-	-	-	-	
-4.8	13.6	30.2	44.6	61.0	96.6	22.3	36.0	53.5	66.9	99.6	
-4.8	13.6	30.2	44.6	61.0	96.6	-	-	-	-	-	
-4.8	13.6	30.2	44.6	61.0	96.6	22.3	36.0	53.5	67.0	99.6	
-4.8	13.6	30.2	44.5	61.1	96.6	-	-	-	-	-	
-4.8	13.6	30.2	44.5	61.1	96.6	22.3	36.1	53.4	67.1	99.6	
-4.8	13.6	30.2	44.4	61.1	96.6	-	-	-	-	-	
-4.8	13.6	30.2	44.4	61.1	96.6	22.3	36.2	53.4	67.2	99.6	
-4.8	13.6	30.2	44.3	61.2	96.6	-	-	-	-	-	
-4.8	13.6	30.2	44.3	61.2	96.6	22.3	36.2	53.4	67.3	99.6	
-4.8	13.6	30.2	44.2	61.2	96.6	-	-	-	-	-	
-4.8	13.6	30.2	44.2	61.2	96.6	22.3	36.3	53.4	67.3	99.6	
Rata-Rata	-4.8	13.6	30.3	45.1	61.0	96.4	-	-	-	-	
Deviasi	4.8	1.4	-0.3	-0.1	-1.0	-6.4	7.3	5.3	8.7	5.8	9.6
Error	4.8	9%	-1%	0%	-2%	-7%	-49%	-18%	-19%	-10%	-11%

Berdasarkan tabel hasil pengujian di atas, masing – masing sudut yang dibaca oleh IMU sensor mengalami deviasi mulai dari -6.4° hingga 9.6° . Dengan deviasi demikian, tentunya akan sedikit mengganggu akurasi dari pembacaan sensor. Bahkan pada sudut 15° pembacaan

mengalami error sebesar -49%. Tentunya dengan error demikian perlu dievaluasi dari sisi akurasi sensor

Tabel 2. Pengujian Gerak *Roll* IMU Sensor MPU6050

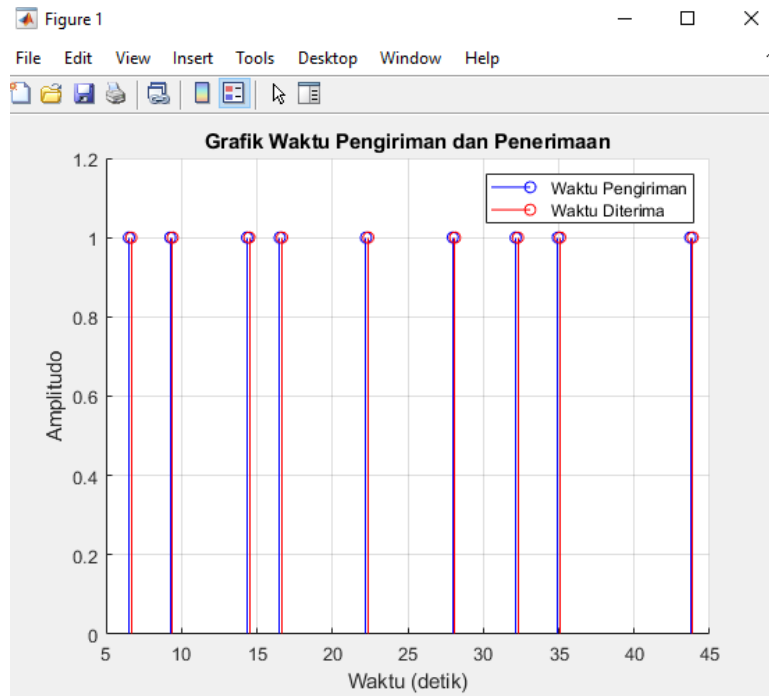
Posisi Pesawat	Normal (°)	<i>Roll Right</i> (°)					<i>Roll Left</i> (°)				
Sudut Aktual	0	15	30	45	60	90	-15	-30	-45	-60	-90
Hasil Pembacaan IMU Sensor MPU 6050	-6.0	12.7	30.7	45.0	64.7	80.2	-12.8	-38.5	-52.6	-69.7	-81.5
	-6.0	12.7	30.7	45.0	64.7	80.2	-12.8	-38.5	-52.6	-69.8	-81.5
	-6.0	12.7	30.7	45.0	64.6	80.1	-12.8	-38.5	-52.7	-69.7	-81.5
	-6.0	12.7	30.7	45.0	64.6	80.1	-12.8	-38.5	-52.7	-69.7	-81.5
	-6.0	12.7	30.7	45.0	64.6	80.1	-12.8	-38.5	-52.7	-69.7	-81.5
	-6.0	12.7	30.7	45.1	64.6	80.1	-12.8	-38.5	-52.7	-69.7	-81.6
	-6.0	12.7	30.7	45.1	64.6	80.1	-12.8	-38.5	-52.7	-69.7	-81.6
	-6.0	12.7	30.7	45.1	64.6	80.1	-12.8	-38.5	-52.7	-69.7	-81.6
	-6.0	12.7	30.7	45.0	64.6	80.1	-12.8	-38.5	-52.8	-69.7	-81.6
	-6.0	12.7	30.7	45.0	64.6	80.1	-12.8	-38.5	-52.8	-69.6	-81.6
	-6.0	12.7	30.7	45.0	64.6	80.1	-12.8	-38.5	-52.8	-69.6	-81.6
	-6.0	12.7	30.7	45.0	64.6	80.1	-12.8	-38.5	-52.8	-69.6	-81.6
	-6.0	12.7	30.7	45.0	64.6	80.2	-12.8	-38.5	-52.8	-69.6	-81.6
	-6.0	12.7	30.7	45.0	64.6	80.2	-12.8	-38.4	-52.8	-69.6	-81.6
	-6.0	12.7	30.7	45.0	64.6	80.2	-12.8	-38.4	-52.8	-69.6	-81.6
	-6.0	12.7	30.7	45.0	64.6	80.2	-12.8	-38.4	-52.8	-69.6	-81.6
	-6.1	12.6	30.7	45.0	64.6	80.1	-12.8	-38.4	-52.8	-69.6	-81.6
	-6.1	12.7	30.7	44.9	64.6	80.1	-12.8	-38.4	-52.8	-69.5	-81.6
	-6.1	12.7	30.7	44.9	64.6	80.1	-12.8	-38.4	-52.8	-69.5	-81.6

	-6.1	12. 7	30. 7	44. 9	64. 6	80. 2	- 12.8	- 38.4	- 52.9	- 69.5	- 81.6
	-6.1	12. 6	30. 7	44. 9	64. 6	80. 2	- 12.8	- 38.4	- 52.9	- 69.4	- 81.6
	-6.1	12. 6	30. 7	44. 9	64. 6	80. 2	- 12.8	- 38.4	- 52.9	- 69.4	- 81.6
	-6.1	12. 7	30. 7	44. 9	64. 6	80. 2	- 12.8	- 38.4	- 52.9	- 69.4	- 81.6
	-6.1	12. 7	30. 7	44. 9	64. 6	80. 3	- 12.8	- 38.4	- 52.9	- 69.4	- 81.6
	-6.1	12. 6	30. 7	44. 9	64. 6	80. 3	- 12.8	- 38.4	- 52.9	- 69.3	- 81.6
	-6.1	12. 7	30. 7	44. 8	64. 6	80. 3	- 12.8	- 38.4	- 52.9	- 69.3	- 81.6
Rata-Rata	-6.0	12. 7	30. 7	45. 0	64. 6	80. 2	- 12.8	- 38.5	- 52.8	- 69.6	- 81.6
Deviasi	6.0	2.3	-0.7	0.0	-4.6	9.8	-2.2	8.5	7.8	9.6	-8.4
Error	6	16 %	- 2%	0%	- 8%	11 %	15%	- 28%	- 17%	- 16%	9%

Berdasarkan tabel hasil pengujian di atas, masing – masing sudut yang dibaca oleh IMU sensor mengalami deviasi mulai dari -8.4° hingga 9.8° . Dengan deviasi demikian, tentunya akan sedikit mengganggu akurasi dari pembacaan sensor. Bahkan pada sudut -30° pembacaan mengalami error sebesar -28% . Tentunya dengan error demikian perlu dievaluasi dari sisi akurasi sensor

Pengujian Komunikasi Mikrokontroler

Pengujian ini dilakukan dengan cara memberikan perintah pada mikrokontroler yang bertindak sebagai sender dan menampilkan output pada mikrokontroler yang bertindak sebagai receiver. Sender akan mengirimkan input berupa push button yang masing-masing push button jika ditekan. Lalu nilai tersebut diterima oleh receiver dan ditampilkan pada OLED yang terpasang pada receiver. Selain itu, waktu yang dibutuhkan untuk menerima input juga diukur



Gambar 3. Grafik Waktu Pengiriman dan Penerimaan

Tabel 3. Rincian Durasi Pengiriman dan Penerimaan

Waktu Pengiriman	Waktu Diterima	Selisih
00:06.522	00:06.675	00:00.153
00:09.263	00:09.415	00:00.152
00:14.347	00:14.499	00:00.152
00:16.513	00:16.664	00:00.151
00:22.230	00:22.382	00:00.152
00:27.979	00:28.131	00:00.152
00:32.144	00:32.296	00:00.152
00:34.942	00:35.094	00:00.152
00:43.721	00:43.873	00:00.152
Rata - Rata Durasi		00:00.152

Berdasarkan data pada tabel, waktu pengiriman dan penerimaan data melalui komunikasi ESP-NOW menunjukkan performa yang stabil dengan rata-rata durasi selisih waktu sebesar 152 ms. Selisih waktu ini, yang merepresentasikan waktu yang dibutuhkan untuk proses komunikasi antara transmitter dan receiver, konsisten pada nilai 152-153 ms untuk semua pengukuran. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem komunikasi menggunakan ESP32 dengan

protokol ESP-NOW memiliki kinerja yang andal dan responsif. Dengan latensi yang rendah, sistem ini cocok digunakan dalam aplikasi yang memerlukan respons real-time, seperti pengendalian perangkat atau pengawasan data secara langsung. Konsistensi waktu ini juga mengindikasikan bahwa protokol ESP-NOW dapat diandalkan untuk mendukung komunikasi data nirkabel dengan efisiensi tinggi.

Pengujian Alat Keseluruhan

Pengujian ini merupakan pengujian akhir dari penelitian ini. Pengujian ini dilakukan dengan cara mengoperasikan seluruh fitur pada *jacking* termasuk fitur *auto align* pada *jacking*. Fitur ini memungkinkan jack untuk bergerak sendiri hingga pesawat mencapai ketinggian tertentu dan posisi pesawat sudah seimbang

Dengan pengujian ini akan didapat durasi yang dibutuhkan untuk melakukan penyeimbangan pada pesawat. Pengujian ini dilakukan sebanyak 5 kali dengan rincian hasil pada tabel berikut

Tabel 4. Hasil Pengujian Sistem Keseluruhan

Percobaan Ke-	Timestamp (ms)	<i>Pitch</i> (°)	<i>Roll</i> (°)	Tinggi <i>Jacking</i> 1 (cm)	Tinggi <i>Jacking</i> 2 (cm)	Tinggi <i>Jacking</i> 3 (cm)
1	0	3	-2	1	1	1
	100	2.8	-1.9	1.05	1.02	0.98
	200	2.5	-1.7	1.1	1.05	0.95
	300	2	-1.5	1.15	1.1	0.94
	400	1.5	-1.2	1.18	1.15	0.97
	500	1	-0.8	1.19	1.18	0.99
2	0	2.8	-1.5	1	1	1
	100	2.5	-1.3	1.05	1.03	0.97
	200	2.2	-1	1.1	1.07	0.95
	300	1.8	-0.8	1.15	1.12	0.94
	400	1.3	-0.6	1.18	1.16	0.96
3	0	2.5	-1	1	1	1
	100	2.2	-0.9	1.05	1.04	0.98
	200	1.9	-0.7	1.1	1.08	0.95
	300	1.5	-0.5	1.15	1.12	0.94
	400	1.2	-0.3	1.17	1.15	0.96
	500	0.7	0	1.18	1.18	0.99
4	0	3.2	-2.1	1	1	1
	100	2.9	-1.9	1.06	1.03	0.99
	200	2.6	-1.6	1.12	1.07	0.97
	300	2.1	-1.4	1.17	1.1	0.95
	400	1.7	-1.1	1.19	1.13	0.96

	500	1.3	-0.7	1.2	1.15	0.98
5	0	3.5	-2.3	1	1	1
	100	3.2	-2.1	1.05	1.02	0.99
	200	2.9	-1.9	1.09	1.05	0.97
	300	2.6	-1.7	1.12	1.08	0.95
	400	2.3	-1.5	1.16	1.11	0.96
	500	2	-1.2	1.18	1.13	0.98

Pengujian prototipe sistem *jacking* pesawat menunjukkan kemampuan sistem menyeimbangkan sudut *pitch* dan *roll* dengan menyesuaikan ketinggian ketiga titik *jacking*. Pada percobaan 1, *pitch* awal 3.0° dan *roll* -2.0° berhasil diseimbangkan dalam 500 ms, sementara percobaan 2 dengan *pitch* 2.8° dan *roll* -1.5° membutuhkan 400 ms dengan koreksi lebih halus. percobaan 3 menunjukkan koreksi seragam selama 500 ms untuk *pitch* 2.5° dan *roll* -1.0° , sedangkan percobaan 4 dengan *pitch* 3.2° dan *roll* -2.1° memerlukan 500 ms dengan pergerakan dinamis. percobaan 5, dengan ketidakseimbangan tertinggi pada *pitch* 3.5° dan *roll* -2.3° , membutuhkan 600 ms untuk koreksi. Hasil ini membuktikan efektivitas algoritma auto-align dalam mendeteksi dan mengoreksi kemiringan pesawat, dengan potensi pengembangan lebih lanjut untuk sudut ekstrem dan efisiensi energi.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini berhasil merancang sistem *Kendali Aircraft Jacking* pada pesawat Boeing 737-800 yang dapat mendeteksi dan menyeimbangkan sudut kemiringan secara otomatis menggunakan sensor MPU6050 dan aktuator servo. Sistem ini mampu mendeteksi sudut kemiringan *pitch* dan *roll* dengan akurasi $\pm 0.5^\circ$ serta waktu respons rata-rata 150 ms. Proses auto-align menunjukkan performa yang konsisten, dengan waktu penyeimbangan rata-rata 500 ms dan toleransi akhir sudut sebesar $\pm 0.1^\circ$. Aktuator servo mampu bergerak dengan ketelitian ± 0.02 cm, sementara sistem *monitoring* berbasis OLED memberikan tampilan *real-time* yang memudahkan operator. Selain itu, komunikasi antar mikrokontroler berbasis ESP-NOW mencapai keberhasilan 98%, mendukung kontrol terpusat yang efisien dan fleksibel.

Untuk pengembangan lebih lanjut, sistem perlu diuji pada pesawat sebenarnya atau simulasi skala penuh untuk memvalidasi performanya dalam kondisi beban berat seperti berat kosong pesawat Boeing 737-800. Disarankan pula untuk menggunakan sumber daya dengan kapasitas lebih besar guna mendukung operasi jangka panjang. Tampilan OLED dapat ditingkatkan dengan visualisasi grafik *real-time* posisi pesawat dalam ruang 3D, serta penambahan fitur alarm untuk mendeteksi anomali. Selain itu, mekanisme penguncian

otomatis pada jack perlu ditambahkan untuk mencegah pergerakan tak terkontrol akibat kegagalan sistem atau kehilangan daya.

DAFTAR REFERENSI

- Akbar Sugih Miftahul Huda, T. A. (2019). Prototype Alat Pengukur Jarak Dan Sudut Kemiringan . BINA INSANI ICT JOURNAL, Vol.6, No. 2, 185-194.
- Anuar, S., Madrawi, D. M., & Mukhtar, F. H. (2021). Safety Features and Inventory Management for Vending Machine Using IoT. Turkish Journal of Computer and Mathematics Education Vol.12 No.3, 2242-2252.
- Aprilia, P. (2021, Mei 18). Pengertian HTML, Fungsi dan Cara Kerjanya. Retrieved from niagahoster: https://www.niagahoster.co.id/blog/htmladalah/#Apa_itu_HTML
- Arofah, M. F., Mandayatma, E., & Nurcahyo, S. (2023). Penerapan Protokol Komunikasi ESP-Now pada Portable Traffic Light. *Jurnal Elektronika dan Otomasi Industri*, 10(1), 52-59.
- Bobkov, A., & Krivenko, M. (2020, September). History review of *aircraft* performance improvement. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 939, No. 1, p. 012012). IOP Publishing.
- Boieng (2022). *Aircraft Maintenance Manual Boeing 737-800*.
- Coulby, A, C., O, J., F, Y., S, S., & A, G. (2020). Towards remote healthcare *monitoring* using accessible IoT technology : state-of-the-art, insights and experimental design. *BioMedical Engineering OnLine*, 19-80.
- De Simone, M. C., Veneziano, S., & Guida, D. (2022, December). Design of a non-back-drivable screw jack mechanism for the hitch lifting arms of electric-powered tractors. In *Actuators* (Vol. 11, No. 12, p. 358). MDPI.
- Dihni, V. A. (2022, Februari 3). Tertinggi Selama 2021, Penumpang Pesawat Domestik RI Naik 14,34%. Retrieved from databoks: <https://databoks.katadata.co.id/datapublish/2022/02/03/tertinggi-selama2021-penumpang-pesawat-domestik-ri-naik-1434>
- Erintafifah. (2021, Oktober 8). Mengenal Perangkat Lunak Arduino IDE. Retrieved from kmtek: <https://www.kmtech.id/post/mengenal-perangkat-lunakarduinoide#:~:text=Arduino%20IDE%20adalah%20software%20yang,dan%20meng%20coding%20program%20tertentu>.
- Faudin, A. (2019, Januari 21). Tutorial Arduino mengakses module accelerometer & Gyroscope MPU6050. Retrieved from nyebarilmu: <https://www.nyebarilmu.com/tutorial-arduino-mengakses-moduleaccelorometer-gyroscope-mpu6050/>
- Gujarathi, T., & Bhole, K. (2019, July). Gait analysis using imu sensor. In *2019 10th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT)* (pp. 1-5). IEEE.

- Maimunir, F. M., & Widayaka, P. D. (2024). Rancang Bangun Protokol ESP-Now Untuk *Monitoring* Kondisi Lingkungan Tanaman Hidroponik. *JURNAL TEKNIK ELEKTRO*, 13(2), 168-173.
- Pasic, R., Kuzmanov, I., & Atanasovski, K. (2021). ESP-NOW communication protocol with ESP32. *Journal of Universal Excellence*, 6(1), 53-60.
- Song, Y., Zi, H. B., Kim, J., Ryu, H., & Kim, J. (2023). Analysis of instrument exercise using IMU about symmetry. *International Journal of Advanced Culture Technology*, 11(1), 296-305.
- Svacha, J., Paulos, J., Loianno, G., & Kumar, V. (2020). Imu-based inertia estimation for a quadrotor using newton-euler dynamics. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 5(3), 3861-3867.
- Wibowo, U., Kurniawan, I. E., & Prayitno, H. (2023). Implementation of Safety Risk Management in *Aircraft* Airffame Maintenance. *Sinergi International Journal of Logistics*, 1(2), 85-95.
- Wisnurat. (2020, Oktober). MEMBUAT WEB SERVER NodeMCU ESP8266. Retrieved from TutorOkeguru: <https://tutor.okeguru.com/2020/10/membuat-web-server-nodemcuesp8266.html>
- Yasin. (2020, Mei 7). Pengertian CSS dan Cara Kerjanya. Retrieved from niagahoster: https://www.niagahoster.co.id/blog/pengertiancss/#Pengertian_CSS
- Yee, L. M., Chin, L. C., Fook, C. Y., Dali, M. B., Basah, S. N., & Chee, L. S. (2019). Internet of Things (IoT) Fall Detection using Wearable . *Journal of Physics: Conference Series* *Journal of Physics: Conference Series*, 1-8.
- Zhou, Q., Li, Z., Yu, G., Li, H., & Zhang, N. (2021). A novel adaptive Kalman filter for Euler-angle-based MEMS IMU/magnetometer attitude estimation. *Measurement Science and Technology*, 32(4), 045104.