

DIGITALISASI DATA ANALOG INSTRUMEN ALTIMETER DAN VERTICAL SPEED INDICATOR UNTUK PENGEMBANGAN SIMULATOR KOKPIT PESAWAT TERBANG

Daniel Alonso Sitanggang
School of Applied Science
Telkom University
Bandung, Indonesia
alonso@student.telkomuniversity.ac.id

Mochammad Fahru Rizal, S.T., M.T.
School of Applied Science
Telkom University
Bandung, Indonesia
mfrizal@telkomuniversity.ac.id

Dr. Duddy Soegiarto, S.T., M.T.
School of Applied Science
Telkom University
Bandung, Indonesia
duddysu@telkomuniversity.ac.id

Abstrak — Tugas Akhir ini mengembangkan sistem digitalisasi data analog dari instrumen altimeter dan vertical speed indicator (VSI) berbasis Internet of Things (IoT) untuk mendukung simulator kokpit pesawat terbang. Sistem memanfaatkan sensor tekanan MS5803-14BA untuk membaca tekanan udara pada ruang vakum tertutup yang disimulasikan menggunakan pompa vakum dan solenoid valve, kemudian diolah oleh mikrokontroler ESP32 menjadi data ketinggian (altitude) dan kecepatan vertikal (VSI) menggunakan rumus barometrik. Data ditampilkan secara real-time pada LCD 20x4 dan dashboard Node-RED melalui protokol MQTT. Arsitektur sistem mencakup integrasi perangkat keras seperti sensor, mikrokontroler, modul relay, dan aktuator dengan perangkat lunak visualisasi berbasis cloud. Pengujian dilakukan dengan variasi target altitude antara 3000 hingga 22000 kaki, menghasilkan deviasi pembacaan dalam rentang ± 0 hingga ± 162 ft dibandingkan data acuan buku UAMTC SIL-34P. Hasil menunjukkan sistem mampu merespons perubahan tekanan dengan stabil, menampilkan data sinkron di seluruh antarmuka, dan bekerja sesuai rancangan. Sistem ini layak digunakan sebagai media edukasi dan pengujian dalam lingkungan laboratorium, sekaligus menjadi dasar pengembangan instrumen simulasi penerbangan berbasis digital.

Kata kunci— Digitalisasi Altimeter, VSI, ESP32, Sensor Tekanan, IoT, Simulator Penerbangan

I. PENDAHULUAN

Altimeter dan Vertical Speed Indicator (VSI) merupakan instrumen penting dalam dunia penerbangan yang berfungsi untuk menunjukkan ketinggian pesawat serta laju perubahan ketinggian secara vertikal [9], [10]. Instrumen ini umumnya masih menggunakan sistem analog berbasis tekanan udara. Keterbatasan instrumen analog antara lain terletak pada akurasi pembacaan, keterhubungan data, serta kesulitan dalam integrasi dengan sistem digital modern [2], [5]. Seiring dengan perkembangan teknologi, khususnya Internet of Things (IoT), muncul kebutuhan untuk melakukan digitalisasi terhadap instrumen analog agar dapat

dimanfaatkan dalam simulator kokpit maupun keperluan edukasi [3], [4], [11].

Permasalahan utama yang dihadapi adalah bagaimana merancang sistem digitalisasi altimeter dan VSI sehingga mampu membaca data tekanan udara, mengonversinya menjadi informasi ketinggian dan kecepatan vertikal, serta menampilkannya secara real-time dalam bentuk digital. Selain itu, diperlukan metode untuk memastikan bahwa data digital yang dihasilkan memiliki deviasi minimal terhadap referensi instrumen standar [6], [21].

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem digitalisasi instrumen altimeter dan VSI berbasis mikrokontroler ESP32 dan sensor tekanan MS5803-14BA [13]. Data hasil pengolahan ditampilkan melalui LCD serta dapat dipantau melalui dashboard Node-RED dengan memanfaatkan protokol komunikasi MQTT [12]. Dengan pendekatan ini, sistem diharapkan dapat memberikan kemudahan monitoring serta mendukung kebutuhan edukasi dan penelitian dalam bidang simulasi penerbangan.

Agar penelitian lebih terarah, ruang lingkup penelitian dibatasi pada implementasi perangkat keras berupa sensor tekanan, ESP32, pompa vakum, solenoid valve, LCD, serta integrasi perangkat lunak menggunakan Node-RED dan MQTT. Pengujian difokuskan pada perbandingan hasil pembacaan sistem dengan data acuan buku UAMTC SIL-34P pada rentang ketinggian 3000 hingga 22000 kaki [21].

II. KAJIAN TEORI

2.2 Dasar Teori

1. ALTIMETER TEKANAN

Altimeter tekanan adalah instrumen penerbangan yang digunakan untuk mengukur ketinggian berdasarkan tekanan atmosfer. Tekanan udara berkurang seiring bertambahnya ketinggian, sehingga nilai tersebut dapat dikonversi menjadi

altitude dengan menggunakan rumus barometrik. Prinsip ini banyak digunakan dalam penerbangan maupun simulasi berbasis tekanan udara [10].

2. Vertical Speed Indicator (VSI)

VSI adalah instrumen yang menunjukkan laju perubahan ketinggian pesawat dalam satuan kaki per menit (ft/min). Alat ini bekerja dengan mendeteksi perubahan tekanan udara dari waktu ke waktu. Dalam implementasi digital, perhitungan dilakukan dengan membandingkan selisih tekanan antar waktu sehingga menghasilkan estimasi kecepatan vertikal [11].

3. Mikrokontroler ESP32

ESP32 adalah mikrokontroler yang dilengkapi dengan modul Wi-Fi dan Bluetooth, mendukung komunikasi data berbasis IoT. ESP32 mampu membaca data sensor melalui antarmuka I2C atau SPI, melakukan komputasi, serta mengirimkan hasil pengolahan data ke platform visualisasi secara real-time [12].

4. Platform Visualisasi Node-RED

Node-RED merupakan perangkat lunak berbasis cloud yang digunakan untuk membuat antarmuka monitoring interaktif. Dengan dashboard yang fleksibel, data sensor dapat ditampilkan dalam bentuk grafik, gauge, maupun indikator numerik. Node-RED sangat mendukung sistem IoT karena ringan dan mudah dikonfigurasi [13].

5. Internet of Things (IoT)

IoT adalah konsep teknologi yang memungkinkan berbagai perangkat fisik saling terhubung dan bertukar data melalui jaringan internet. Dalam sistem monitoring, IoT berperan penting untuk mengintegrasikan sensor, mikrokontroler, dan platform cloud, sehingga pemantauan data dapat dilakukan secara jarak jauh dan real-time [14].

6. Sistem Vakum

Sistem vakum digunakan untuk mensimulasikan kondisi tekanan udara sesuai ketinggian tertentu dalam ruang tertutup. Perubahan tekanan ini menghasilkan variasi pembacaan pada sensor, yang kemudian dikonversi menjadi data ketinggian atau kecepatan vertikal. Prinsip ini digunakan dalam pengujian instrumen berbasis tekanan [15].

7. Sensor Tekanan MS5803-14BA

Sensor MS5803-14BA adalah sensor tekanan presisi tinggi yang mampu mendeteksi tekanan absolut dan memberikan keluaran digital melalui I2C. Sensor ini banyak digunakan dalam aplikasi altimeter karena memiliki rentang pengukuran yang luas serta akurasi tinggi [16].

8. Modul Relay

Relay adalah komponen elektronika yang berfungsi sebagai saklar otomatis, memungkinkan mikrokontroler mengendalikan perangkat bertegangan tinggi dengan sinyal logika. Dalam sistem ini, relay digunakan untuk mengontrol pompa vakum secara otomatis sesuai logika program [17].

9. Modul Step-Down

Modul step-down atau buck converter digunakan untuk menurunkan tegangan dari sumber listrik ke level yang sesuai bagi komponen. Fungsinya adalah menjaga kestabilan catu daya serta melindungi perangkat seperti sensor dan mikrokontroler dari kerusakan akibat kelebihan tegangan [18].

10. LCD 20x4

LCD merupakan perangkat tampilan sederhana yang digunakan untuk menampilkan data sensor secara langsung. Modul LCD 20x4 dengan antarmuka I2C dipilih karena hemat pin dan mampu menampilkan lebih banyak informasi dalam satu waktu [19].

11. Keypad 4x4

Keypad 4x4 adalah perangkat input berupa susunan tombol fisik yang digunakan untuk memasukkan angka atau instruksi ke dalam sistem. Dalam penelitian ini, keypad digunakan sebagai antarmuka manual untuk mengatur parameter sistem [20].

12. Arduino IDE

Arduino IDE adalah lingkungan pemrograman yang digunakan untuk menulis, mengompilasi, dan mengunggah kode ke mikrokontroler. IDE ini menyediakan pustaka pendukung bagi sensor tekanan dan modul komunikasi sehingga mempermudah proses pengembangan [21].

13. Solenoid Valve

Solenoid valve adalah katup elektromagnetik yang berfungsi mengatur aliran udara atau fluida secara otomatis. Dalam sistem simulasi tekanan udara, solenoid valve digunakan untuk mengontrol pelepasan udara dari ruang vakum [22].

14. Gauge Tekanan Negatif

Gauge tekanan negatif adalah alat ukur manual yang menggunakan satuan inHg (inch of mercury) untuk mengukur tekanan vakum. Instrumen ini digunakan sebagai alat pembanding untuk kalibrasi dan validasi hasil pembacaan sensor digital [23].

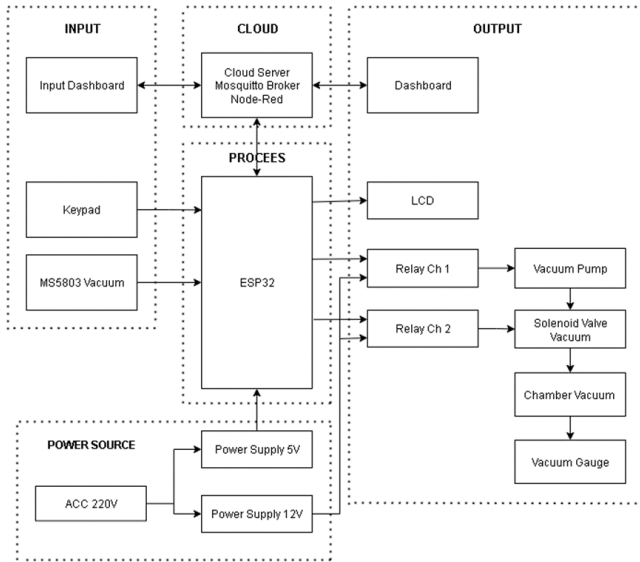
III. METODE

Metode penelitian ini mencakup arsitektur sistem, blok diagram, pemodelan alur kerja, serta rumus perhitungan yang digunakan untuk mengonversi data sensor menjadi informasi ketinggian (altitude) dan kecepatan vertikal (VSI).

3.1 Arsitektur Sistem

Arsitektur sistem dirancang untuk mendigitalisasi data analog dari instrumen altimeter dan VSI menggunakan sensor tekanan MS5803-14BA, mikrokontroler ESP32, LCD 20x4, relay, pompa vakum, dan solenoid valve. Sensor membaca perubahan tekanan udara dalam ruang tertutup, lalu ESP32 mengolahnya menjadi nilai altitude dan VSI berdasarkan persamaan barometrik. Hasilnya ditampilkan secara real-time pada LCD serta dikirim ke dashboard Node-RED melalui protokol MQTT. Selain itu, ESP32 juga mengontrol pompa dan solenoid untuk mensimulasikan perubahan tekanan sesuai target ketinggian.

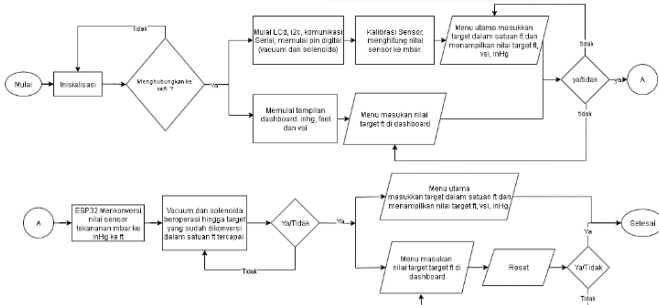
3.2 Blok Diagram Sistem



Gambar 3.1 Blok Diagram Sistem

Blok diagram menjelaskan hubungan antar komponen mulai dari sumber daya, input, pemrosesan, hingga output. Input terdiri atas sensor tekanan dan keypad, pemrosesan dilakukan oleh ESP32, sementara output berupa LCD dan dashboard Node-RED. Komunikasi data menggunakan protokol MQTT melalui Mosquitto Broker. ESP32 juga mengendalikan relay untuk mengoperasikan pompa vakum dan solenoid valve dalam menghasilkan variasi tekanan.

3.3 Flow Node-RED



Gambar 3.2 Flowchart Sistem

Node-RED digunakan sebagai platform visualisasi berbasis cloud untuk monitoring dan kontrol. Data sensor (tekanan, altitude, VSI) dikirimkan ESP32 via MQTT lalu divisualisasikan dalam bentuk gauge, grafik real-time, dan numeric display. Pengguna dapat memasukkan target altitude melalui dashboard, yang kemudian dikirim kembali ke ESP32 untuk mengontrol logika simulasi.

3.4 Pemodelan Sistem

Alur kerja sistem dimodelkan dalam bentuk flowchart yang meliputi inisialisasi perangkat, koneksi jaringan, kalibrasi sensor, pengolahan data tekanan menjadi altitude dan VSI, kontrol aktuator (pompa dan valve), hingga penampilan hasil pada LCD dan dashboard. Proses berjalan terus-menerus (looping) sehingga simulasi dapat dipantau secara real-time.

3.5 Rumus Perhitungan

Perhitungan dalam sistem dilakukan dengan rumus berikut:

1. Konversi tekanan:

$$\text{Tekanan (inHg)} = \text{Tekanan (mbar)} \times 0.02953$$

2. Altitude (ketinggian):

$$\text{Altitude (ft)} = 145366.45 \times \left(1 - \left(\frac{P}{29.92}\right)^{0.190284}\right)$$

3. Vertical Speed Indicator (VSI):

$$\text{VSI (ft/min)} = \Delta \text{Altitude} / \Delta \text{Time (menit)}$$

Implementasi perhitungan dilakukan dalam kode program ESP32 menggunakan fungsi konversi mbar ke inHg, perhitungan altitude, serta selisih altitude per waktu untuk VSI.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Implementasi Sistem

Implementasi sistem dilakukan setelah seluruh komponen perangkat keras dan perangkat lunak selesai dirancang. Sistem digitalisasi data altimeter dan vertical speed indicator (VSI) ini terdiri dari dua bagian utama, yaitu panel antarmuka pengguna dan bagian internal sistem. Panel antarmuka dirancang menggunakan bahan akrilik dengan tata letak yang mengutamakan kemudahan interaksi pengguna. Pada bagian panel dipasang gauge tekanan manual sebagai pembanding data digital, LCD 20x4 untuk menampilkan tekanan, altitude, target altitude, serta laju vertikal secara real-time, serta keypad 4x4 yang digunakan untuk memasukkan nilai target altitude secara manual. Sementara itu, bagian internal sistem terdiri dari ESP32 sebagai unit pemrosesan utama, sensor tekanan MS5803-14BA, modul relay 4 channel, pompa vakum DC, dan solenoid valve 12V. Sensor membaca tekanan dalam chamber tertutup, lalu data tersebut diolah ESP32 menjadi altitude dan VSI menggunakan rumus barometrik. Hasil pengolahan ditampilkan melalui LCD dan dikirimkan ke dashboard Node-RED melalui protokol MQTT.



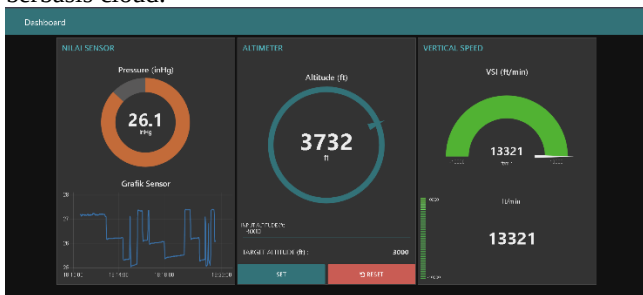
Gambar 4.1 Panel Antarmuka Sistem



Gambar 4.2 Bagian dalam sistem

4.2 Visualisasi Monitoring

Hasil monitoring sistem dapat diamati secara lokal melalui LCD 20x4 dan secara daring melalui dashboard Node-RED. LCD memperbarui data setiap 50 milidetik, menampilkan parameter tekanan, altitude, target altitude, dan VSI. Pada sisi lain, dashboard Node-RED menampilkan visualisasi dalam bentuk gauge altitude, gauge VSI, dan value display tekanan secara real-time yang diterima dari ESP32 melalui Mosquitto Broker. Visualisasi ini memudahkan pengguna dalam memantau kondisi simulasi baik secara langsung di perangkat maupun melalui antarmuka berbasis cloud.



Gambar 4.3 Tampilan Dashboard Node-RED saat Simulasi Ketinggian

4.3 Uji Respons Cloud

Pengujian respons cloud dilakukan untuk mengevaluasi interval pengiriman data dari ESP32 ke broker MQTT hingga ditampilkan pada dashboard Node-RED. Hasil uji menunjukkan bahwa interval pengiriman data rata-rata berada pada kisaran 268 hingga 307 milidetik. Variasi ini masih dalam batas wajar mengingat pengujian dilakukan menggunakan jaringan nirkabel melalui hotspot seluler yang dipengaruhi kondisi sinyal dan trafik jaringan. Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa sistem memiliki latensi yang cukup rendah sehingga dapat diandalkan untuk monitoring real-time.



Gambar 4.4 Hasil Uji Respons Cloud Sistem melalui Dashboard Node-RED

4.4 Pengujian Sistem

Pengujian sistem dilakukan setelah perangkat keras dan perangkat lunak terintegrasi dengan baik. Proses pengujian diawali dengan kalibrasi sensor MS5803-14BA untuk menentukan tekanan referensi pada kondisi awal. Selanjutnya, target altitude dimasukkan melalui keypad maupun dashboard, kemudian sistem mengaktifkan pompa vakum dan solenoid valve untuk menyesuaikan tekanan udara di dalam chamber hingga mendekati target yang ditentukan. Seluruh parameter, yaitu tekanan, altitude, dan VSI, divisualisasikan secara real-time pada LCD dan dashboard Node-RED. Acuan pengujian diambil dari tabel kalibrasi altimeter pada buku UAMTC SIL-34P, yang digunakan secara luas di industri penerbangan untuk menghubungkan nilai tekanan dan ketinggian.

Standard Altitudes feet	Equivalent Atmospheric Pressure mm	Equivalent Atmospheric Pressure (Mercury) feet	Scale Error Variation From Standard Altitude	
			35,000 feet Altimeters	50,000 feet Altimeters
0	760.0	29.92	± 50	± 50
500	746.4	29.39	50	50
1,000	732.9	28.86	75	75
1,500	719.7	28.33	75	75
2,000	706.6	27.82	100	100
2,500	693.8	27.31	100	100
3,000	681.1	26.81	100	100
4,000	656.3	25.84	100	150
5,000	632.4	24.89	100	150
6,000	609.0	23.98	100	150
8,000	564.4	22.22	150	175
10,000	522.6	20.58	150	175
12,000	483.3	19.03	200	225
14,000	446.4	17.57	200	225
16,000	411.8	16.21	200	240
18,000	379.4	14.94	200	275
20,000	349.1	13.75	200	300
22,000	320.8	12.63	300	340
25,000	281.9	11.10	300	375
30,000	225.6	8.88	300	450
35,000	178.7	7.04	300	525
40,000	140.7	5.54		600
45,000	110.8	4.36		675
50,000	87.3	3.44		750

Gambar 4.5 Tabel Kalibrasi Altimeter dari Buku UAMTC SIL-34P [21]

4.5 Hasil Pengujian

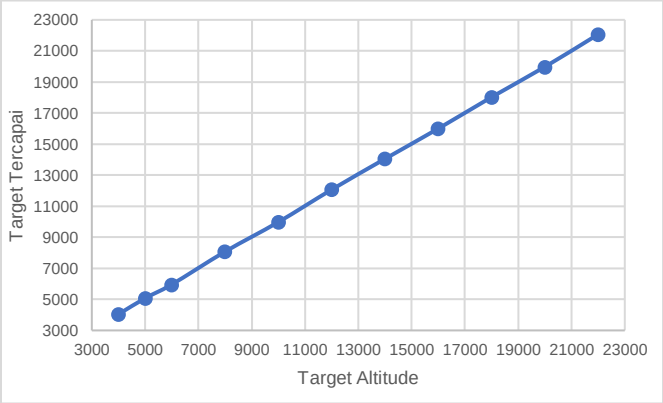
Hasil pengujian dilakukan pada 12 skenario target altitude mulai dari 3000 hingga 22000 kaki. Setiap pengujian mencatat target tekanan, tekanan yang dicapai, altitude yang terbaca, serta scale error baik dalam satuan inHg maupun ft.

Tabel 4.1 Hasil Pengujian Sistem Digitalisasi Altimeter dan VSI

No	Target Altitude (ft)	Target Tekanan (inHg)	Tekanan Tercapai (inHg)	Altitude Tercapai (ft)	Scale Error	
					inHg	ft
1	3000	26.81	26.65	3162	0.16	162
2	4000	25.84	25.8	4042	0.04	42
3	5000	24.89	24.83	5072	0.06	72
4	6000	23.98	24.01	5960	-0.03	-40
5	8000	22.22	22.16	8074	0.06	74
6	10000	20.58	20.59	9978	-0.01	-22
7	12000	19.03	18.98	12067	0.05	67
8	14000	17.57	17.54	14048	0.03	48
9	16000	16.21	16.21	15996	0.00	-4

10	18000	14.94	14.92	18024	0.02	4
11	20000	13.75	13.76	19974	-0.01	-26
12	22000	12.63	12.6	22066	0.03	66

Berdasarkan hasil pengujian, sistem menunjukkan pola yang sesuai dengan teori altimeter, di mana semakin tinggi target altitude maka semakin rendah tekanan udara. Deviasi pembacaan berada dalam rentang ± 0 hingga ± 162 ft, dengan deviasi terbesar pada target 3000 ft sebesar +162 ft, dan deviasi terkecil pada target 16000 ft sebesar -4 ft. Perbandingan data pengujian dengan acuan literatur divisualisasikan dalam grafik yang memperlihatkan kurva hasil sistem mengikuti kurva acuan dengan baik. Hal ini menunjukkan bahwa sistem digitalisasi altimeter dan VSI yang dikembangkan memiliki akurasi memadai, sinkronisasi real-time yang stabil antara LCD dan dashboard, serta layak digunakan untuk keperluan simulasi instrumen penerbangan di laboratorium.



Gambar 4.6 Grafik Perbandingan Altitude Acuan Buku dan Hasil Pengujian Sistemini

V. KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil implementasi dan pengujian yang telah dilakukan, sistem simulasi digitalisasi data analog dari instrumen altimeter dan vertical speed indicator (VSI) berhasil dikembangkan sesuai dengan tujuan penelitian. Sistem ini menggunakan sensor tekanan MS5803-14BA dan mikrokontroler ESP32 yang mampu mengonversi nilai tekanan udara (mbar) menjadi ketinggian (ft) serta menghitung kecepatan vertikal (VSI) secara real-time. Hasil pengolahan data dapat ditampilkan secara sinkron baik melalui LCD 20x4 maupun dashboard berbasis cloud menggunakan Node-RED dengan protokol MQTT. Sistem menunjukkan kinerja yang stabil dalam merespons perubahan tekanan, dengan deviasi pembacaan yang masih berada dalam batas toleransi dibandingkan data acuan literatur. Hal ini membuktikan bahwa sistem yang dirancang telah berfungsi sesuai rancangan, memiliki akurasi yang memadai, dan layak digunakan sebagai media edukasi maupun pengujian dalam lingkungan laboratorium.

5.2 Saran

Untuk pengembangan lebih lanjut, sistem ini dapat ditingkatkan dengan penggunaan pompa vakum yang

memiliki spesifikasi lebih tinggi agar rentang tekanan yang dapat disimulasikan semakin luas dan akurat, sehingga hasil perhitungan altitude maupun VSI menjadi lebih representatif. Selain itu, penambahan fitur penyimpanan data (data logging) berbasis cloud atau database lokal akan sangat membantu dalam melakukan analisis historis dari hasil simulasi. Dari sisi perangkat keras, kestabilan komunikasi I²C antara ESP32 dan sensor MS5803-14BA juga perlu diperhatikan, misalnya dengan menambahkan resistor pull-up atau melakukan penyesuaian kecepatan clock agar error pembacaan dapat diminimalisir. Sementara itu, pada aspek antarmuka, pengembangan visualisasi yang lebih interaktif atau menyerupai instrumen penerbangan asli sangat disarankan untuk memberikan pengalaman simulasi yang lebih realistis dan mendekati kondisi sebenarnya di kokpit pesawat.

REFERENSI

[1] Nagi, L. (2022). Improvement of Baro Sensors Matrix for Altitude Estimation. *Sensors*, 22(18), 7060.

[2] Socha, V., Socha, L., Hanakova, L., Valenta, V., Kusmirek, S., & Lalis, A. (2020). Pilots' Performance and Workload Assessment: Transition from Analogue to Glass-Cockpit. *Applied Sciences*, 10(15), 5211.

[3] Zanella, A., Bui, N., Castellani, A., Vangelista, L., & Zorzi, M. (2021). Internet of Things for Smart Cities. *IEEE Internet of Things Journal*, 1(1), 22–32.

[4] Hercog, D. (2023). Design and Implementation of ESP32-Based IoT Devices. *Electronics*, 12(14), 3041.

[5] Tolea, M. S., & Hintea, M. G. (2020). Comparative Study of Analog and Digital Displays for Altitude Reading Accuracy in Flight Simulation. *Scientific Bulletin of the "Mircea cel Batran" Naval Academy*, 23(1), 197–204.

[6] Narayanan, S. (2022). Enhanced Vertical Navigation Using Barometric Pressure Measurements. *Sensors*, 22(23), 9263.

[7] Almutairi, R. (2024). Advancements and Challenges in IoT Simulators. *Sensors*, 24(5), 1511.

[8] Prasetyo, H. A., Ramadhan, F. R., & Santoso, B. (2023). Design of Vacuum Pressure Simulation Chamber for Instrument Calibration. *Journal of Physics: Conference Series*, 2637(1), 012043.

[9] Filippone, A. (2022). Flight Performance of Fixed and Rotary Wing Aircraft (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.

[10] Ramírez López, A. (2024). Computational Algorithms for Representing Aircraft Instruments: Vertical Speed Indicator (V.S.I.) (Analog Instrument and Computer Simulation). *Applied Sciences*, 14(24), 11536.

[11] Hercog, D. (2023). Design and Implementation of IoT Devices for Real-Time Monitoring Applications. *Electronics*, 12(14), 3041.

- [12] IBM. (2020). Node-RED: Flow-based Programming for the Internet of Things. [Online]. Available: <https://nodered.org>
- [13] TE Connectivity. (2021). MS5803-14BA Pressure Sensor Datasheet. [Online]. Available: <https://www.te.com>
- [14] Shukor, M. F., Rahman, A. A., & Sabri, M. F. M. (2021). Design and Implementation of Solenoid Valve Control System for Automated Pressure Regulation. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 11(5), 4083–4091.
- [15] Kumar, P., & Singh, M. (2021). Design and Implementation of an Efficient DC-DC Buck Converter for Embedded Systems. *Journal of Electrical Engineering*, 72(3), 223–230.
- [16] Li, Y., Wu, J., & Chen, Q. (2020). I2C-Based LCD Display System for Embedded Applications. *International Journal of Embedded Systems*, 14(2), 123–131.
- [17] Rahman, M. S., Hossain, N., & Islam, S. (2022). 4x4 Keypad Interface Design for Microcontroller-Based Applications. *Microcontroller Projects Journal*, 9(1), 45–53.
- [18] Hasan, A., & Khan, M. B. (2020). An Overview of Arduino IDE for Embedded Systems Development. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 9(6), 101–107.
- [19] Park, J. H., Lee, S. W., & Kim, H. J. (2023). Microcontroller-Based Solenoid Valve Control for Automated Pneumatic Systems. *Automation in Instrumentation*, 11(2), 78–85.
- [20] Wong, K. T. (2021). InHg Pressure Gauges for Vacuum Measurement Systems. *Instrumentation Review*, 131(4), 55–63.
- [21] UAMTC. (n.d.). SIL-34P: Aircraft Aerodynamic Structure and System Practices (Instrument System). Universitas Nurtanio Bandung, Fakultas Teknik, Bandung, Indonesia.

