

# PERANCANGAN SIMULASI INTERFACE PRIMARY FLIGHT DISPLAY BERBASIS MIKROKONTROLER RASBERRY PI

**Adiyat Eka Juliana**

Program Studi Teknik Elektro Universitas Nurtanio Bandung

E-mail : [eka.adiyat@gmail.com](mailto:eka.adiyat@gmail.com)

**Dr. Ike Yuni Wulandari, S.T., M.T.**

Program Studi Teknik Elektro Universitas Nurtanio Bandung

**Dina Herdiana, S.T., M.T.**

Program Studi Teknik Elektro Universitas Nurtanio Bandung

## Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk merancang simulasi antarmuka (*interface*) *Primary Flight Display* (PFD) berbasis mikrokontroler Raspberry Pi. Menggunakan metode kualitatif melalui wawancara mendalam dengan empat engineer pesawat terbang, penelitian berfokus pada pembuatan antarmuka (*interface*) yang intuitif dan mendekati kondisi asli PFD pada pesawat.

Implementasi melibatkan perancangan hardware menggunakan mikrokontroler Raspberry Pi 4 Model B sebagai pengontrol utama LCD 5inch sebagai display, serta pengembangan *software* menggunakan javascript dan html untuk membuat *interface* yang interaktif. Data simulasi diambil dari rekaman penerbangan yang mencakup tiga fase penerbangan, yaitu: *take-off*, *cruising*, dan *landing*.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem berhasil mensimulasikan tampilan PFD dengan akurat, menampilkan informasi instrumen seperti *airspeed*, *altitude*, *vertical speed*, *heading* dan *flight mode annunciator*. Pengujian menunjukkan responsivitas dan stabilitas sistem yang baik dan dapat membantu sebagai media ajar maupun pelatihan dalam meningkatkan pemahaman dan kompetensi pengguna terhadap sistem avionik *modern*.

Kata kunci: *Primary Flight Display*, *Interface*, Raspberry Pi

## Abstract

*This research aims to design a simulation of a Primary Flight Display (PFD) interface based on a Raspberry Pi microcontroller. Using qualitative methods through in-depth interviews with four aircraft engineers, the research focused on creating an intuitive interface that closely mimics the actual PFD conditions on an aircraft.*

*The implementation involved hardware design using a Raspberry Pi 4 Model B microcontroller as the primary controller for a 5-inch LCD display, and software development using JavaScript and HTML to create an interactive interface. Simulation data was taken from flight recordings covering three flight phases: takeoff, cruising, and landing.*

*The results showed that the system successfully simulated the PFD display accurately, displaying instrument information such as airspeed, altitude, vertical speed, heading, and flight mode annunciator. Testing demonstrated good system responsiveness and stability, and it can be used as a teaching and training tool to improve user understanding and competence with modern avionics systems.*

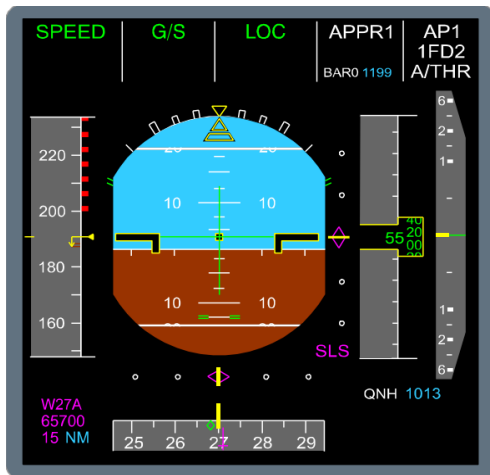
Keywords: *Primary Flight Display*, *Interface*, Raspberry Pi

## PENDAHULUAN

Tujuan penelitian ini adalah untuk dapat merancang dan mengimplementasikan simulasi PFD yang dapat mensimulasikan tiga mode penerbangan, yaitu: *take-off*, *cruising* dan *landing*. Penelitian ini merancang simulasi antarmuka (*interface*) *Primary Flight Display* (PFD) berbasis mikrokontroler Raspberry Pi. Menggunakan metode kualitatif melalui wawancara mendalam dengan empat engineer pesawat terbang, penelitian berfokus pada pembuatan antarmuka (*interface*) yang intuitif dan mendekati kondisi asli PFD pada pesawat.

### Landasan Teori

Pada BAB ini menguraikan teori-teori dasar yang mendasari penelitian, termasuk definisi dan fungsi dari *Primary Flight Display* (PFD), serta berbagai indikator yang ditampilkan pada PFD, seperti *airspeed indicator*, *attitude*, *vertical speed indicator* dan lainnya seperti yang dapat dilihat pada Gambar 2.1



Gambar 2.1 Primary Flight Display

Menurut Doe dan Smith (2020), PFD berperan signifikan dalam mengurangi beban kerja pilot dengan menyediakan *interface* yang intuitif serta memberikan informasi navigasi secara cepat dan tepat.

Penelitian terdahulu menurut Jones et al. (2017) bertujuan untuk mengembangkan PFD yang lebih intuitif untuk meningkatkan keselamatan penerbangan, penelitian tersebut menggunakan metode kualitatif dengan analisis data berdasarkan pengujian lapangan di simulator pesawat.

Selanjutnya menurut Williams dan Carter (2018) berfokus pada pengembangan PFD yang dapat diintegrasikan dengan sistem auto pilot, penelitian tersebut menggunakan metode kuantitatif dengan pengujian pada pilot yang dilatih menggunakan PFD baru.

Kemudian penelitian yang dilakukan oleh Henderson dan Lee (2019) mengeksplorasi evolusi PFD dari sistem analog ke digital. Studi ini menggunakan metode perbandingan historis dengan menganalisis dokumen- dokumen penerbangan.

Penelitian yang dilakukan oleh Nelson et al. (2020) meneliti PFD pada pesawat militer dan menguji integrasi data sensor ke dalam tampilan PFD. Metode yang digunakan adalah simulasi penerbangan dengan alat ukur kinerja pilot.

Kemudian penelitian yang dilakukan oleh Kim dan Park (2021) yaitu meneliti pengaruh PFD yang diintegrasikan dengan teknologi *Augmented Reality* (AR). Keduanya menggunakan metode eksperimental dengan uji coba pada pilot profesional. Hasilnya menunjukkan bahwa PFD berbasis AR dapat memberikan informasi visual yang lebih komprehensif, terutama dalam kondisi penerbangan yang sulit.

Dari penelitian terdahulu yang telah dilakukan, baik dari judul yang diangkat, isi pembahasan kemudian metode penelitian yang digunakan sampai dengan hasil dari masing-masing penelitian yang telah dilakukan menjadi referensi bagi penulis untuk dapat membuat atau merancang hal serupa, yaitu dengan pembuatan perancangan antarmuka (*interface*) PFD berbasis mikrokontroler yang dapat membuat simulasi yang diinginkan.

## METODOLOGI PENELITIAN

### Latar Belakang Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk dapat merancang dan membuat simulasi antarmuka (*interface*) *primary flight display* (PFD) berbasis mikrokontroler Raspberry Pi. Penelitian ini dilakukan sepenuhnya dengan menggunakan metode kualitatif, penelitian yang dilakukan ialah dengan melakukan wawancara mendalam dengan empat engineer pesawat terbang yang bekerja di salah satu industri *maintenance, repair, and overhaul* (MRO) yang berada di kota Batam. Dengan menggunakan pendekatan kualitatif, pembahasan ini berfokus pada pemahaman yang kebutuhan teknis serta fungsionalitas antarmuka (*interface*) PFD.

### Tahapan Penelitian

Metodologi penelitian ini dilakukan secara sistematis dimulai dari tahapan studi literatur sampai dengan laporan skripsi. Untuk dapat lebih mengetahui tahapan yang dilakukan secara menyeluruh, seluruh tahapan, kegiatan utama yang dilakukan, dan hasil pelaksanaan penelitian ini, dapat dilihat pada tabel 3.1.

Tabel 3.1 Tahapan penelitian

No	Tahapan penelitian	Kegiatan utama	Hasil
1.	Studi literatur	Mengumpulkan referensi teknis terkait desain PFD, jurnal, buku, dan dokumentasi teknis	Diperoleh pemahaman mengenai desain dan prinsip kerja PFD untuk perancangan simulasi <i>interface</i>
2.	Analisis kebutuhan & Subjek penelitian	Wawancara dengan 4 <i>engineer</i> pesawat terbang berdasarkan latar belakang	Diperoleh informasi spesifikasi teknis dan kebutuhan pengguna untuk desain dan
		pendidikan, pengalaman kerja untuk menganalisis kebutuhan fitur antarmuka PFD	implementasi antarmuka PFD
3.	Desain sistem	Perancangan <i>hardware</i> ( <i>control box</i> , raspberry pi, lcd) dan <i>software</i> (UI dengan <i>Javascript</i> dan <i>HTML</i> )	Diagram perancangan <i>hardware</i> dan rancangan awal <i>interface</i> PFD
4.	Implementasi sistem	Merakit <i>hardware</i> dan mengintegrasikan <i>software</i> dengan Raspberry Pi dan lcd	Implementasi antarmuka yang berfungsi, uji coba awal dan integrasi perangkat keras.
5.	Pengujian dan evaluasi sistem	Melakukan pengujian fungsionalitas, responsivitas dan kinerja antarmuka	Hasil pengujian performa sistem, <i>feedback</i> dari pengguna, serta identifikasi area perbaikan
6.	Penyempurnaan desain	memperbaiki kekurangan pada desain antarmuka berdasarkan <i>feedback</i> pengguna	Desain antarmuka yang disempurnakan sesuai masukan dari pengguna dan hasil pengujian

### Jenis Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian kualitatif yang fokus pada pembuatan simulasi antarmuka (*interface*) *primary flight display* (PFD). Metode ini dipilih berdasarkan relevansi untuk menggali kebutuhan pengguna serta mengidentifikasi spesifikasi teknis yang dibutuhkan. Wawancara mendalam dilakukan dengan

empat engineer pesawat terbang, dua diantaranya group leader dan dua engineer lainnya untuk mendapatkan masukan langsung mengenai spesifikasi yang diinginkan.

### Objek Penelitian

Objek penelitian ini merupakan perancangan simulasi antarmuka (interface) primary flight display (PFD) sebagai media ajar dan diharapkan menjadi alat bantu pembelajaran bagi mahasiswa penerbangan dan tenaga kerja baru di sektor industri penerbangan. Simulasi ini dibuat menggunakan *microsoft visual code* sebagai alat bantu dalam melakukan pemrograman menggunakan bahasa pemrograman *javascript* dan *html*, didukung oleh mikrokontroler Raspberry Pi sebagai komputer utama sekaligus server yang hasilnya nanti akan ditampilkan oleh LCD berukuran 5 inch.

### Pengumpulan Data

Data dikumpulkan dan disusun melalui metode kualitatif. Data kualitatif dikumpulkan melalui wawancara mendalam dengan engineer pesawat terbang dan observasi langsung pada pengguna antarmuka (*interface*) PFD. Wawancara dilakukan bertujuan untuk memahami kebutuhan teknis dan preferensi para *engineer* dalam mengarahkan agar perancangan dan pembuatan antarmuka (*interface*) PFD ini sesuai dan mendekati kondisi yang sesungguhnya seperti yang terdapat pada pesawat terbang. Observasi dilakukan selama penggunaan untuk dapat mengidentifikasi masalah yang muncul untuk dapat diperbaiki.

Subjek penelitian ini terdiri dari empat *engineer* pesawat terbang dimana dua diantaranya merupakan seorang *group leader* serta dua lainnya merupakan *engineer* tingkat madya, dapat dilihat pada tabel 3.2.

Tabel 3.2 Hasil wawancara *engineer*

Hasil Wawancara Engineer		
Engineer	Spesialisasi	Poin Penting Wawancara
Group Leader 1	Bentuk setiap instrumen pada PFD	Fokus pada setiap bentuk tampilan seperti yang sesungguhnya
Group Leader 2	User Interface (UI) dan user experience (UX)	Fokus pada tampilan PFD secara menyeluruh
Engineer 3	Perancangan <i>software</i> dan <i>hardware</i>	Fokus pada <i>tools</i> yang nanti akan digunakan dan pemilihan komponen yang <i>compact</i> dan <i>portable</i>
Engineer 4	Pengujian sistem	Pengujian performa antarmuka, respons pergerakan setiap instrumen dan stabilitas data dan grafis selama uji coba

### Teknik Analisis Data

Data yang diperoleh dari hasil wawancara dan observasi seperti yang ditunjukkan oleh Tabel 3.3, yang dilakukan dan dianalisis menggunakan metode tematik, yang bertujuan untuk dapat mengidentifikasi tema utama dari hasil wawancara dan observasi tersebut. Analisis tersebut mampu membantu dalam memperbaiki desain antarmuka (*interface*) serta menyesuaikan kebutuhan teknis dan pengalaman pengguna, dapat dilihat pada tabel 3.3.

Tabel 3.3 Teknik analisis data

Jenis data	Teknik pengumpulan	Metode analisis
Kualitatif	Wawancara mendalam dengan engineer dan observasi	Analisis tematik untuk mengidentifikasi tema utama

### Penjadwalan Penelitian

Penjadwalan penelitian seperti yang ditampilkan Tabel 3.4 dilakukan mencakup berbagai tahap dimulai dari studi literatur sampai dengan pengujian serta evaluasi yang telah dilakukan. Hal tersebut bertujuan untuk mengetahui estimasi waktu yang dibutuhkan untuk setiap tahap mengingat penulis bekerja sehingga membutuhkan waktu tambahan untuk setiap pelaksanaan tahapannya. Jadwal penelitian dirancang dan dilakukan agar memudahkan proses perbaikan dan pengembangan pengujian dapat diselesaikan secara efektif dan efisien (kerzner, 2017).

Tabel 3.4 Jadwal penelitian simulasi *interface* PFD

Jadwal Penelitian (Road Map)		
Tahapan Penelitian	Waktu pelaksanaan	Kegiatan utama
Studi literatur dan analisis kebutuhan	Bulan 1-3	Mengumpulkan referensi teknis dan menganalisa kebutuhan berdasarkan wawancara
Perancangan sistem ( <i>hardware</i> & <i>software</i> )	Bulan 4	Mendesain antarmuka PFD dan menentukan komponen seperti raspberry pi dan lcd
Implementasi sistem	Bulan 4-6	Perancangan <i>interface</i> berbasis raspberry
Pengujian dan evaluasi	Bulan 6-7	Melakukan uji coba sistem, mendapatkan feedback user dan evaluasi performa
Penyempurnaan dan finalisasi	Bulan 8	Penyempurnaan akhir dan laporan hasil penelitian

## PENGUMPULAN DAN PENGOLAHAN DATA

### Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan dengan mengambil sampling dari pergerakan PFD pada flight simulator untuk memudahkan dalam mengetahui pergerakan yang terjadi pada PFD tersebut selama penerbangan berlangsung. Proses ini melibatkan simulasi tiga fase penerbangan yang sedang berlangsung, yaitu *take off*, *cruising*, dan *landing*. Data yang akan digunakan terlebih dahulu direkam untuk memperoleh seluruh kegiatan penerbangan yang berlangsung yang selanjutnya dibagai dengan masing-masing durasi satu menit. Sehingga total durasi pengumpulan data adalah tiga menit.

### Proses Pengambilan Sampling

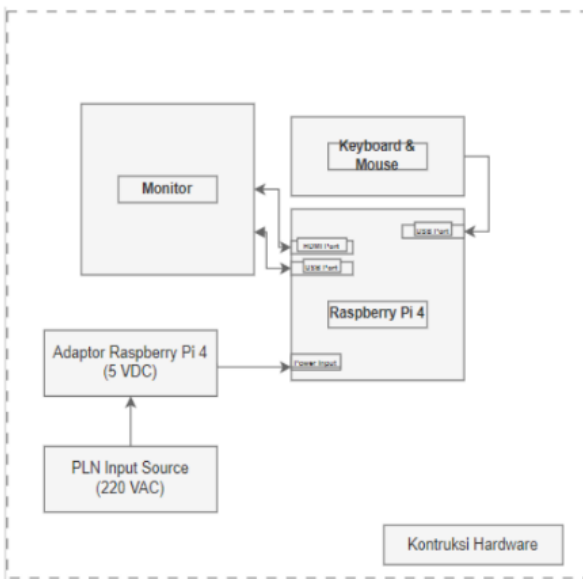
Sampling data yang direkam dari flight simulator seperti yang dapat dilihat pada Gambar 4.1 diambil menggunakan perangkat lunak yang mampu merekam dan menyimpan data pergerakan PFD selama jalannya penerbangan, dapat dilihat pada gambar 4.1.



Gambar 4.1 Tampilan *pop up* PFD pada *flight simulator*

### Konstruksi realisasi *hardware* PFD

Dalam proses perancangan perangkat keras (*hardware*) *primary flight display* (PFD) seperti yang dapat dilihat pada Gambar 4.2 langkah pertama yang dilakukan adalah memastikan supply daya listrik yang stabil untuk semua komponen. Dalam penelitian ini, sumber listrik dengan tegangan 220 VAC kemudian diubah menjadi sebesar 5 VDC menggunakan adaptor khusus untuk mikrokontroler Raspery Pi yang berfungsi sebagai pusat pemrosesan data dan pengontrol utama dari pembuatan simulasi PFD ini, dapat dilihat pada gambar 4.2.

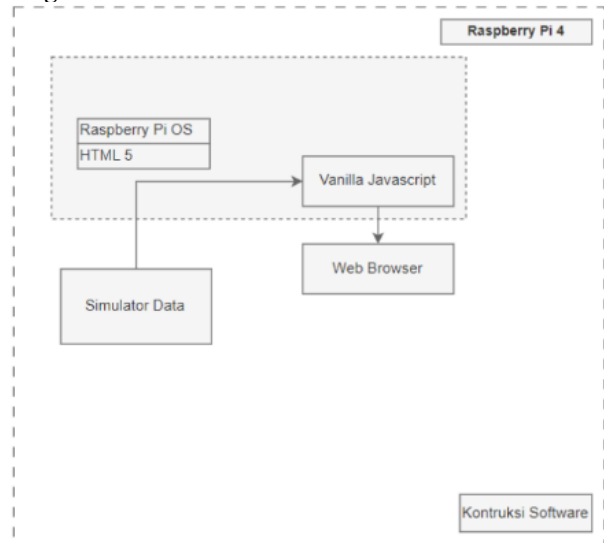


Gambar 4.2 Konstruksi *hardware*

### *Software interface* PFD

Pada tahap pembuatan *software interface primary flight display* (PFD) seperti yang ditunjukkan Gambar dibuat menggunakan bahasa pemrograman yang datanya diambil dari simulator data kemudian html digunakan untuk membangun struktur tampilan, sedangkan *javascript* berfungsi sebagai logika pengendali dan pemrosesan data yang akan ditampilkan pada layar, dapat dilihat pada gambar 4.4.

### Pengolahan Data



Gambar 4.4 Konstruksi *software* PFD

Setelah data dikumpulkan, maka langkah selanjutnya ialah dengan mengolah data untuk menghasilkan parameter yang akurat, sesuai dan siap ditampilkan dalam antarmuka (*interface*) PFD. Adapun beberapa data yang diolah, sebagai berikut:

- Attitude (pitch, roll, yaw)*  
Attitude dihitung dari data pitch, roll, dan yaw yang direkam selama simulasi.

### Implementasi *interface* PFD

Implementasi grafis dilakukan menggunakan html canvas dan javascript. Canvas digunakan untuk menggambar elemen-elemen grafis, sementara javascript digunakan untuk mengendalikan dan memperbaharui elemen-elemen tersebut.

- Menggambar tampilan *flight mode annunciator* (FMA)
- Menggambar tampilan *attitude* dan *guidance*
- Menggambar tampilan kecepatan (*airspeed indicator*)
- Menggambar tampilan *instrument landing system*
- Menggambar tampilan *heading reference line and scale*
- Menggambar tampilan *altitude indicator*
- Menggambar tampilan *vertical speed indicator*

### Pengemasan Alat

Langkah selanjutnya adalah dengan melakukan pengemasan komponen yang telah dirangkai dan dirakit, dapat dilihat pada gambar 4.5, 4.6, 4.7.



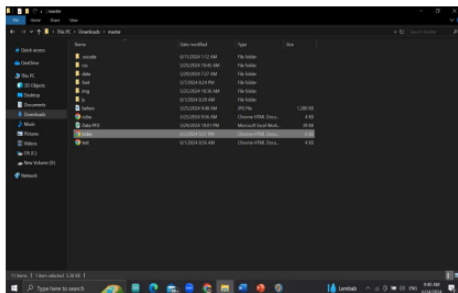


Kemudian setelah dirakit dan di susun dengan menyesuaikan tempat yang ada, maka tampilan alatnya seperti gambar dibawah ini

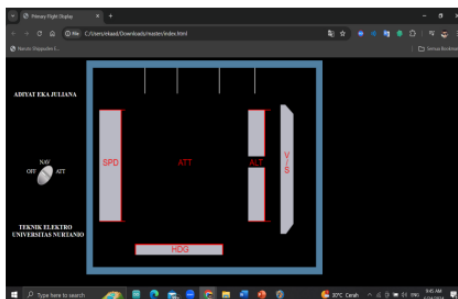


## UJI FUNGSI DAN ANALISIS

### Uji Fungsi



Gambar 5.1 Memulai Program



Gambar 5.2 Tampilan awal interface PFD

### Pengujian dan Validasi

Pengujian dan validasi dilakukan untuk memastikan bahwa PFD bekerja dengan baik dan memberikan informasi yang akurat selama simulasi penerbangan. pengujian yang dilakukan adalah dengan melakukan

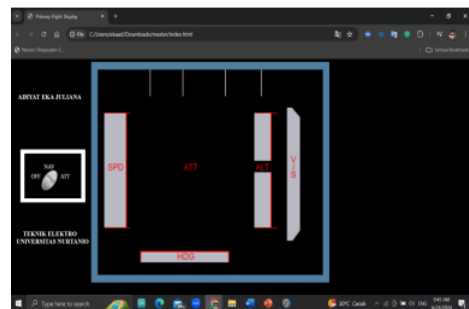
Pengujian fungsional, Setiap fitur dan elemen PFD diuji untuk memastikan fungsionalitasnya.

### Uji Fungsi Dasar

Pada pengujian ini, penulis melakukan pengoperasian terhadap fungsi dasar PFD.

a. Memulai program Memulai program yang telah dibuat terlihat pada Gambar 5.1 sehingga dapat ditampilkan pada layar pengguna seperti yang terlihat pada Gambar 5.2

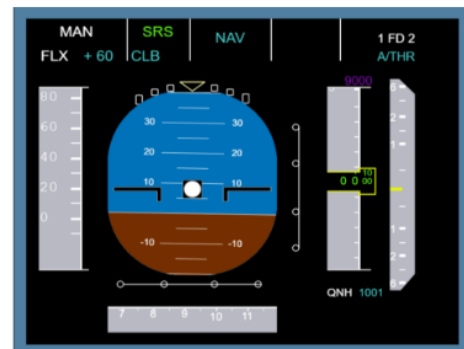
b. Kemudian, dapat memilih mengaktifkan program dengan mengklik salah satu switch seperti yang terlihat pada Gambar 5.3 yang terletak pada tengah sisi kiri antarmuka (interface) PFD.



Gambar 5.3 Pemilihan mode pengaktifan PFD

### Interaksi Pengguna

Pengujian terhadap kemudahan interaksi pengguna dengan antarmuka. Aspek yang diuji meliputi navigasi menu, responsivitas layar, dan kemudahan dalam menyesuaikan tampilan seperti yang dapat dilihat pada Gambar 5.4.



Gambar 5.4 Tampilan interface PFD

### Stabilitas Sistem

Pengujian terhadap stabilitas sistem dilakukan dengan mengoperasikan PFD dalam jangka waktu yang lama dan dalam berbagai kondisi simulasi. Hal ini untuk memastikan sistem tidak mengalami crash atau error yang mengganggu.

### Hasil Uji Fungsi

Hasil uji fungsi seperti yang ditunjukkan oleh Tabel 5.1, menunjukkan bahwa interface PFD berfungsi dengan baik dan memenuhi sebagian besar kriteria yang diharapkan. Beberapa hasil utama dari uji fungsi adalah sebagai berikut:

### Akurasi Informasi

Tampilan informasi penerbangan (kecepatan udara, ketinggian, arah) menunjukkan akurasi yang baik mendekati kondisi sesungguhnya. Informasi ditampilkan secara real-time tanpa delay yang signifikan. Kemudahan penggunaan navigasi menu dan interaksi dengan layar sentuh dinilai mudah dan intuitif oleh pengguna. Pengguna dapat dengan mudah menyesuaikan tampilan sesuai dengan preferensi mereka.

### Stabilitas Sistem

Sistem menunjukkan stabilitas yang baik selama pengujian jangka panjang. Tidak ditemukan crash atau error yang signifikan selama pengujian, dapat dilihat pada tabel 5.1.

Tabel 5.1 Hasil uji fungsionalitas

No	Fungsi yang diuji	Hasil pengujian	Keterangan
1.	Navigasi antarmuka	Berfungsi baik	Pengguna dapat berpindah antara menu dengan lancar
2.	Tampilan data	Berfungsi baik	Data <i>instrument</i> dapat ditampilkan

### Analisis Data Pengujian

Analisis data pengujian seperti yang ditunjukkan Tabel 5.2, dilakukan untuk mengevaluasi kinerja dan efektivitas antarmuka (interface) PFD. Data yang dianalisis meliputi hasil pengukuran akurasi, tingkat responsivitas, dan feedback dari pengguna.

#### Akurasi dan Responsivitasnya

Data pengukuran menunjukkan bahwa sistem memiliki tingkat akurasi yang cukup baik dalam menampilkan informasi penerbangan. Responsivitas sistem juga dapat menunjukkan tampilan antarmuka (interface) sesuai yang diharapkan.

#### Feedback Pengguna

Feedback dari pengguna menunjukkan tingkat kepuasan yang cukup baik terhadap antarmuka PFD. Beberapa saran untuk perbaikan juga diperoleh, seperti penambahan fitur simulasi situasi darurat dan peningkatan kualitas grafis. Dari hasil analisa yang telah dilakukan didapati bahwa antarmuka (interface) PFD yang dirancang sudah memenuhi sebagian besar kebutuhan pengguna. Namun perlu peningkatan dan perbaikan pada aspek visual dan peningkatan grafis yang dapat meningkatkan pengalaman pengguna dalam menggunakan PFD, dapat dilihat pada tabel 5.2.

Tabel 5.2 Hasil analisis pengujian

No.	Hasil Analisis Pengujian	
1.	Kecepatan respon	Pengguna merasa bahwa respon sistem sudah cukup cepat, namun transisi antar instrumen bisa lebih dapat di perhalus
2.	Kenyamanan penggunaan	Sebagian besar pengguna menyampaikan bahwa tampilan antarmuka dapat menampilkan visual seperti tampilan asli PFD namun perlu ada peningkatan pada grafis yang telah dibuat

## KESIMPULAN DAN SARAN

### Kesimpulan

Berdasarkan pembahasan, perancangan serta pembuatan simulasi interface primary flight display (PFD) berbasis mikrokontroler Raspberry Pi, maka terdapat beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Berdasarkan rumusan masalah pertama, penelitian pembuatan simulasi interface PFD berbasis Mikrokontroler Raspberry Pi melibatkan analisis mendalam terhadap elemen-elemen visual dan fungsional yang terdapat di dalam PFD berhasil dirancang sehingga menghasilkan tampilan airspeed indicator, attitude indicator, vertical speed indicator, altitude indicator, instrument landing system dan flight mode annunciator menyerupai dan sesuai dengan tampilan standar pada PFD yang terdapat pada pesawat terbang. Hasil dari perancangan ini menunjukkan bahwa penggunaan Raspberry Pi sebagai platform mikrokontroler dapat menghasilkan tampilan yang interaktif dan responsif. Dengan demikian, penelitian ini membuktikan bahwa teknologi berbasis Raspberry Pi dapat diterapkan dalam pembuatan sistem tampilan yang sesuai dengan yang digunakan pada pesawat terbang.
2. Berdasarkan rumusan masalah kedua, penelitian ini mengevaluasi kinerja perangkat lunak dan perangkat keras dari tampilan antarmuka (interface) PFD. Kinerja perangkat lunak dalam memproses data dapat menampilkan informasi secara real-time menunjukkan responsivitas yang memadai, sedangkan perangkat keras Raspberry Pi mampu menangani beban kerja yang diperlukan tanpa mengalami kendala. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa kombinasi perangkat lunak dan perangkat keras memiliki kinerja yang baik dalam hal akurasi informasi, responsivitas, dan stabilitas.

### Saran

Berdasarkan hasil penelitian dan temuan yang diperoleh, berikut adalah beberapa saran untuk pengembangan lebih lanjut:

1. **Kualitas Grafis**, yang berarti peningkatan kualitas grafis pada interface PFD dapat memberikan pengalaman pengguna yang lebih baik dan lebih mendekati kondisi nyata di kokpit pesawat.
2. **Pengujian Lebih Lanjut**, yang berarti disarankan untuk melakukan pengujian lebih lanjut dengan melibatkan lebih banyak pengguna dan dalam berbagai kondisi simulasi untuk mendapatkan data yang lebih komprehensif dan memastikan sistem berfungsi dengan optimal.

## DAFTAR PUSTAKA

Aghajani, E., Nagy, C., & Bacchelli, A. A Study on the Effectiveness of Debugging Tools. *Journal of Software: Evolution and Process.* (2019).

- Barrett, E. T., & Wood, C. Literature Review: Conducting & Writing. American Psychological Association. (2014).
- Braun, V., & Clarke, V. Using thematic analysis in psychology. *Qualitative Research in Psychology*, 3(2), 77-101. (2006).
- Creswell, J. W. *Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches*. Sage Publications. (2014).
- Cross, N. *Engineering Design Methods: Strategies for Product Design*. John Wiley & Sons. (2000).
- Dillman, D. A. *Mail and Internet Surveys: The Tailored Design Method*. Wiley. (2000).
- Germán, D., & Marin, D. Leveraging Extensions in IDE for Effective Development in Raspberry Pi Projects. *Proceedings of the IEEE 42nd International Conference on Software Engineering*. (2020).
- Field, A. *Discovering Statistics Using IBM SPSS Statistics*. Sage. (2013).
- Gajski, D. D., & Kuhn, R. H. New VLSI tools. *Computer*, 16(12), 11-14. (1983).
- Gupta, R., & Jain, A. Real-time Embedded Systems: A Case Study of Display Optimization in Microcontroller Projects. *Journal of Embedded Systems*. (2020).
- Henderson, P., & Lee, D. Transitioning from Analog to Digital Displays in Modern Cockpits. *Journal of Avionics and Navigation*. (2019).
- Jones, R., Davis, T., & Reed, L. Design and Development of Primary Flight Displays for Civil Aviation. *Aerospace Technology Journal*. (2017).
- Kim, Y., & Park, S. Augmented Reality in Primary Flight Display for Enhanced Pilot Situational Awareness. *International Journal of Aviation Engineering*. (2021).
- Kerzner, H. *Project Management: A Systems Approach to Planning, Scheduling, and Controlling*. John Wiley & Sons. (2017).
- Lin, Y., & Tseng, L. Cost-Effective Flight Simulation Systems Using Microcontrollers. *Journal of Aviation Technology and Engineering*. (2021).
- Miles, M. B., & Huberman, A. M. *Qualitative Data Analysis: An Expanded Sourcebook*. Sage Publications. (1994).
- Nair, S., & Raj, E. Flight Instrumentation and Display Systems: A Raspberry Pi-Based Approach. *Journal of Flight Simulation Technology*. (2020).
- Nielsen, J. *Usability Engineering*. Morgan Kaufmann. (1993).
- Nielsen, J., & Norman, D. A. *Usability Engineering*. Morgan Kaufmann. (2000).
- Patton, M. Q. *Qualitative Research & Evaluation Methods*. Sage Publications. (2002).
- Peng, Z., Li, K., & Zhang, Y. Multi-language Support in Integrated Development Environments for Cross-Platform Development. *ACM Computing Surveys*. (2021).
- Purnomo, H. *Sistem Kendali dengan Mikrokontroler AVR dan Raspberry Pi*. Graha Ilmu. (2018).
- Rahardjo, B. *Pemrograman Python untuk Aplikasi Mikrokontroler dan Robotika*. Penerbit Andi. (2016).
- Reas, C., & Fry, B. *Processing: A Programming Handbook for Visual Designers and Artists*. MIT Press. (2007).
- Santosa, B. *Pengantar Sistem Embedded dengan Raspberry Pi dan Python*. Informatika Bandung. (2019).
- Sharma, P., Singh, A., & Verma, K. Efficient Display Systems for Microcontroller-Based Projects: A Study on HDMI-Compatible LCDs. *International Journal of Advanced Research in Computer Science*. (2019).
- Sutrisno, B. *Mikrokontroler dan Pemrogramannya*. Penerbit Andi. (2015).
- Suwignyo, P., & Hidayat, T. *Dasar-Dasar Avionik*. Penerbit Andi. (2017).
- Suyono, M., & Wahyudi, R. *Sistem Pengendalian Otomatis*. Penerbit Andi. (2017).
- Williams, H., & Carter, J. Pilot Training Using Primary Flight Display Simulations. *Flight Simulation Review*. (2018).