

Parking Monitoring System Teaching Aid for I2C Communication Learning in a Shopping Mall Basement Environment

Alfi Syahril¹, Mursyidin¹, Mumammad Ikhsan¹

¹, Universitas Islam Negeri Ar-Raniry Banda Aceh, Indonesia

E-mail: alfi7528@gmail.com

Submission:

Accepted:

Published:

Abstract

The development of microcontroller technology has increased the need for practical learning media that can help students understand the integration of hardware, software, and serial communication in embedded systems. However, the learning of Inter-Integrated Circuit (I2C) communication in the Microprocessor Systems course is still predominantly theoretical and lacks instructional tools that demonstrate its practical implementation in an integrated system. This study aims to develop a microcontroller-based parking monitoring teaching aid as a learning medium for I2C communication in the Microprocessor Systems course. The research employed a Research and Development (R&D) method using the ADDIE development model, consisting of Analysis, Design, Development, Implementation, and Evaluation. Data were collected using validation questionnaires administered to two media experts and two subject-matter experts. The data were analyzed descriptively by converting the Likert-scale scores into feasibility percentages. The results showed that the teaching aid was successfully developed and all system components functioned according to the design. The media expert validation obtained a feasibility percentage of 92.50%, categorized as Highly Feasible, while the subject-matter expert validation obtained 90.00%, also categorized as Highly Feasible. The implementation results demonstrated that the ESP32 microcontroller, infrared sensors, I2C LCD, and servo motor operated in an integrated manner according to their respective functions. Unlike an Internet of Things (IoT) system, which primarily emphasizes internet connectivity and remote data exchange, the developed teaching aid focuses on demonstrating the practical implementation of I2C communication between the microcontroller and peripheral devices within an embedded system. Therefore, the developed microcontroller-based parking monitoring teaching aid is considered highly feasible for supporting I2C communication learning in the Microprocessor Systems course.

Keywords: Teaching Aid, Parking Monitoring System, Microcontroller, I2C.

Abstrak

Perkembangan teknologi mikrokontroler meningkatkan kebutuhan akan media pembelajaran praktis yang dapat membantu mahasiswa memahami integrasi perangkat keras, perangkat lunak, dan komunikasi serial dalam sistem tertanam (*embedded system*). Namun, pembelajaran komunikasi *Inter-Integrated Circuit* (I2C) pada mata kuliah Sistem Mikroprosesor masih cenderung bersifat teoritis dan belum didukung oleh alat peraga yang mampu menunjukkan penerapannya secara praktis dalam suatu sistem yang terintegrasi. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan alat peraga sistem monitoring parkir *basement* pusat perbelanjaan berbasis mikrokontroler sebagai media pembelajaran komunikasi I2C pada mata kuliah Sistem Mikroprosesor. Penelitian ini menggunakan metode *Research and Development* (R&D) dengan model pengembangan ADDIE yang terdiri atas tahap *Analysis, Design, Development, Implementation, dan Evaluation*. Pengumpulan data dilakukan

menggunakan angket validasi yang diberikan kepada dua ahli media dan dua ahli materi. Data dianalisis secara deskriptif dengan mengonversi skor angket skala Likert ke dalam bentuk persentase kelayakan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa alat peraga berhasil dikembangkan dan seluruh komponen sistem dapat berfungsi sesuai dengan rancangan. Hasil validasi ahli media memperoleh persentase kelayakan sebesar 92,50% dengan kategori Sangat Layak, sedangkan hasil validasi ahli materi memperoleh persentase sebesar 90,00% dengan kategori Sangat Layak. Hasil implementasi menunjukkan bahwa mikrokontroler ESP32, sensor inframerah, LCD I2C, dan motor servo dapat bekerja secara terintegrasi sesuai dengan fungsi masing-masing. Berbeda dengan sistem *Internet of Things* (IoT) yang berfokus pada konektivitas internet dan pertukaran data secara daring, alat peraga yang dikembangkan dalam penelitian ini berfokus pada demonstrasi penerapan komunikasi I2C antara mikrokontroler dan perangkat periferi dalam sistem tertanam. Dengan demikian, alat peraga sistem monitoring parkir berbasis mikrokontroler dinyatakan sangat layak digunakan sebagai media pembelajaran komunikasi I2C pada mata kuliah Sistem Mikroprosesor.

Kata Kunci: Alat Peraga, Sistem Monitoring Parkir, Mikrokontroler, I2C.

Introduction

Perkembangan teknologi mikrokontroler telah memberikan dampak yang signifikan terhadap pendidikan teknik, khususnya dalam pembelajaran sistem mikroprosesor. Mata kuliah praktikum mikrokontroler menuntut untuk memahami integrasi antara perangkat keras, perangkat lunak, serta implementasi aplikasi secara praktis. Materi pembelajaran tidak hanya mencakup sistem minimum mikrokontroler dan bahasa pemrograman, tetapi juga berbagai aplikasi seperti sistem input-output (I/O), timer-counter, interupsi, *pulse width modulation* (PWM), serta komunikasi serial [1], [2].

Namun demikian, proses pembelajaran komunikasi *Inter-Integrated Circuit* (I2C), yaitu protokol komunikasi serial yang digunakan untuk pertukaran data antarperangkat dalam sistem mikrokontroler, masih menghadapi berbagai tantangan. Berdasarkan observasi awal yang dilakukan pada Program Studi Pendidikan Teknik Elektro, Fakultas Tarbiyah dan Keguruan, UIN Ar-Raniry, pembelajaran komunikasi I2C pada mata kuliah Sistem Mikroprosesor masih cenderung bersifat teoretis dan belum didukung secara optimal oleh alat peraga yang memadai. Keterbatasan tersebut terutama terlihat dari belum tersedianya alat peraga yang mampu mengintegrasikan berbagai komponen ke dalam suatu sistem yang utuh dan aplikatif. Kondisi ini berpotensi menghambat pemahaman mahasiswa terhadap konsep komunikasi serial, khususnya dalam memahami proses pertukaran data antara mikrokontroler dan perangkat periferi, yang idealnya dipelajari melalui pengalaman praktis dan kontekstual [3], [4].

Komunikasi I2C merupakan salah satu protokol komunikasi serial yang paling banyak digunakan dalam sistem tertanam (*embedded systems*) karena efisiensinya dalam penggunaan jalur komunikasi serta kemampuannya mendukung konfigurasi *multi-master* dan *multi-slave*. Protokol ini menggunakan dua jalur utama, yaitu *Serial Clock Line* (SCL) dan *Serial Data Line* (SDA), untuk melakukan pertukaran data antarperangkat. Keunggulan tersebut menjadikan komunikasi *Inter-Integrated Circuit* (I2C) sebagai salah satu materi penting dalam pembelajaran sistem mikrokontroler, khususnya pada pengembangan sistem berbasis mikrokontroler[5].

Untuk mengatasi keterbatasan alat peraga yang ada, diperlukan suatu alat peraga inovatif yang mampu mendemonstrasikan implementasi komunikasi I2C secara praktis. Salah satu solusi yang dapat dikembangkan adalah alat peraga berupa sistem pemantauan parkir berbasis mikrokontroler. Sistem yang diusulkan menggunakan NodeMCU ESP32 sebagai pengendali utama, sensor inframerah sebagai perangkat masukan untuk mendeteksi kendaraan, LCD I2C sebagai media penampil informasi parkir, serta motor servo sebagai pengendali palang parkir. Sistem ini dirancang untuk memantau ketersediaan slot parkir dan menampilkan informasi kondisi parkir secara *real-time* melalui sistem tampilan yang terintegrasi. Dengan mengintegrasikan berbagai komponen perangkat keras ke dalam satu platform, alat peraga yang dikembangkan mampu mendemonstrasikan implementasi komunikasi *Inter-Integrated Circuit* (I2C) beserta penerapannya dalam sistem tertanam (*embedded system*) secara lebih aplikatif [6].

Berbeda dengan sistem Internet of Things (IoT) yang umumnya mengandalkan konektivitas internet untuk melakukan pertukaran data, pemantauan jarak jauh, atau integrasi dengan platform berbasis jaringan, alat peraga yang dikembangkan dalam penelitian ini tidak berfokus pada konektivitas internet. ESP32 digunakan sebagai mikrokontroler utama untuk memproses data dari sensor inframerah, mengendalikan LCD I2C, serta mengoperasikan motor servo secara lokal. Fokus utama pengembangan alat peraga adalah mendemonstrasikan konsep dan implementasi komunikasi I2C melalui integrasi perangkat keras dalam suatu sistem tertanam. Dengan demikian, penggunaan ESP32 dalam penelitian ini lebih diarahkan sebagai pengendali sistem dan media pembelajaran komunikasi I2C, bukan sebagai perangkat IoT.

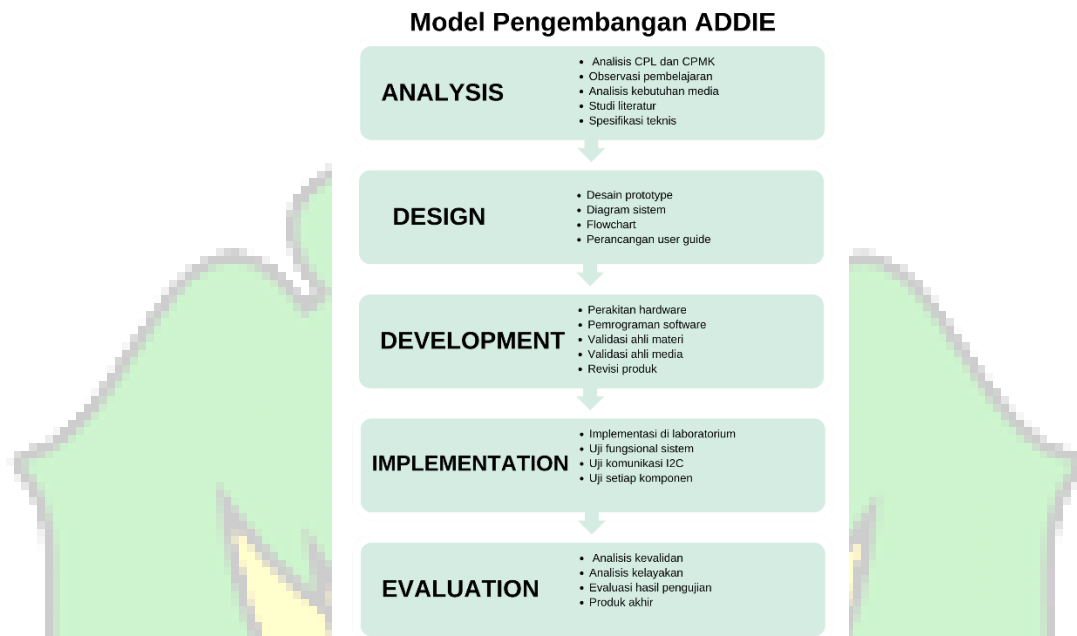
Pemilihan sistem pemantauan parkir sebagai alat peraga didasarkan pada relevansinya dengan aplikasi di dunia nyata, khususnya pada lingkungan parkir berkapasitas tinggi seperti area parkir bawah tanah (*basement*) pusat perbelanjaan. Sistem ini memungkinkan integrasi berbagai komponen, seperti sensor, protokol komunikasi serial, dan perangkat keluaran, dalam satu platform yang komprehensif. Dengan demikian, alat peraga yang dikembangkan tidak hanya berfungsi sebagai sarana pembelajaran, tetapi juga sebagai simulasi sistem nyata yang mampu meningkatkan pemahaman konseptual serta keterampilan praktis [7].

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengevaluasi kelayakan sistem pemantauan parkir basement pusat perbelanjaan sebagai alat peraga komunikasi I2C pada mata kuliah Sistem Mikroprosesor. Kebaruan (*novelty*) penelitian ini terletak pada pengembangan alat peraga berbasis ESP32 yang mengintegrasikan komunikasi I2C, sensor inframerah, dan motor servo ke dalam satu platform pembelajaran terpadu. Alat peraga ini dirancang untuk merepresentasikan implementasi komunikasi *Inter-Integrated Circuit* (I2C) dalam sebuah sistem nyata sehingga dapat digunakan sebagai sarana demonstrasi penerapan komunikasi I2C pada lingkungan sistem tertanam (*embedded system*) yang terintegrasi.

Method

Penelitian ini menggunakan metode *Research and Development* (R&D) yang bertujuan untuk mengembangkan dan mengevaluasi kelayakan alat peraga sistem pemantauan parkir berbasis mikrokontroler sebagai media pembelajaran komunikasi *Inter-*

Integrated Circuit (I2C) pada mata kuliah Sistem Mikroprosesor. Model pengembangan yang digunakan adalah ADDIE (*Analysis, Design, Development, Implementation, and Evaluation*) karena menyediakan tahapan yang sistematis dalam mengidentifikasi kebutuhan, merancang, mengembangkan, menguji, dan mengevaluasi produk pembelajaran. Subjek validasi terdiri atas dua ahli media dan dua ahli materi, sedangkan implementasi dan pengujian produk dilakukan di Laboratorium Pendidikan Teknik Elektro, Fakultas Tarbiyah dan Keguruan, UIN Ar-Raniry. Tahapan penelitian dan aktivitas yang dilakukan pada setiap tahap ditunjukkan pada Gambar 1.



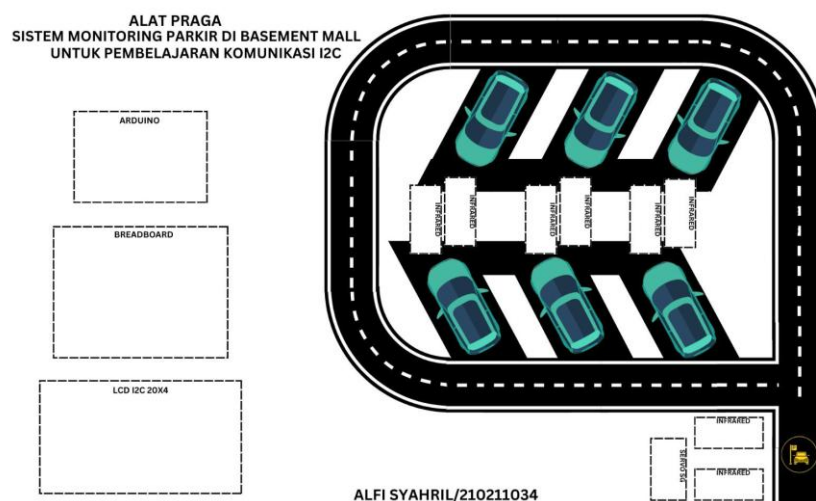
Gambar 1. Model Pengembangan ADDIE

1. Tahap Analisis (Analysis)

Tahap *Analysis* dilakukan untuk mengidentifikasi kebutuhan pembelajaran, capaian pembelajaran, serta spesifikasi teknis alat peraga yang akan dikembangkan. Analisis dilakukan melalui observasi proses pembelajaran komunikasi I2C pada mata kuliah Sistem Mikroprosesor dan studi literatur yang berkaitan dengan komunikasi I2C, mikrokontroler, serta pengembangan alat peraga pembelajaran. Selain itu, dilakukan analisis terhadap CPL dan CPMK yang berkaitan dengan kemampuan mahasiswa dalam memahami dan menerapkan komunikasi serial pada sistem berbasis mikrokontroler. Hasil analisis digunakan sebagai dasar untuk menentukan kebutuhan alat peraga dan spesifikasi teknis sistem, meliputi penggunaan NodeMCU ESP32, sensor inframerah, LCD I2C, dan motor servo [9].

2. Tahap Perancangan (Design)

Tahap *Design* dilakukan berdasarkan hasil analisis kebutuhan. Perancangan meliputi desain *prototype*, diagram blok sistem, alur kerja sistem, serta panduan penggunaan (*user guide*). Desain alat dibuat untuk menggambarkan hubungan antara NodeMCU ESP32 sebagai pengendali utama dengan sensor inframerah, LCD I2C, dan motor servo. Rancangan tersebut menjadi acuan dalam proses pembuatan dan integrasi perangkat keras maupun perangkat lunak. Desain sistem pemantauan parkir ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Desain Perancangan Alat Peraga Sistem Monitoring Parkir

Berdasarkan Gambar 2 tersebut, sensor inframerah digunakan untuk mendeteksi keberadaan kendaraan pada slot parkir. Data hasil deteksi diproses oleh NodeMCU ESP32, kemudian informasi kondisi parkir ditampilkan melalui LCD I2C. Motor servo digunakan sebagai penggerak palang parkir berdasarkan perintah dari mikrokontroler. Rancangan juga dilengkapi dengan panduan penggunaan sebagai acuan dalam pengoperasian alat peraga pada kegiatan pembelajaran.

3. Tahap Pengembangan (Development)

Tahap *Development* dilakukan dengan merealisasikan rancangan menjadi alat peraga yang dapat berfungsi. Proses pengembangan meliputi perakitan perangkat keras, pemrograman mikrokontroler, integrasi sensor inframerah, LCD I2C, dan motor servo, serta pengujian awal terhadap fungsi setiap komponen. Setelah produk selesai dikembangkan, dilakukan validasi oleh dua ahli media dan dua ahli materi.

Validasi ahli media digunakan untuk menilai aspek desain fisik, tampilan visual, penempatan komponen, kualitas konstruksi, dan fungsi desain alat peraga. Validasi ahli materi digunakan untuk menilai kesesuaian konsep sistem, ketepatan implementasi komunikasi I2C, kinerja sistem, dan kesesuaian fungsi alat dengan tujuan pembelajaran. Instrumen validasi menggunakan angket tertutup dengan skala Likert lima tingkat dan dilengkapi angket terbuka untuk memperoleh komentar dan saran dari validator. Hasil validasi digunakan sebagai dasar untuk melakukan revisi dan penyempurnaan produk sebelum tahap implementasi [10].

4. Tahap Implementasi (Implementation)

Tahap *Implementation* dilakukan di Laboratorium Pendidikan Teknik Elektro, Fakultas Tarbiyah dan Keguruan, UIN Ar-Raniry. Pada tahap ini, alat peraga yang telah melalui proses validasi dan revisi dipasang, dioperasikan, dan diuji secara langsung untuk mengetahui fungsi dan kinerja sistem. Pengujian meliputi pengujian sensor inframerah dalam mendeteksi keberadaan kendaraan, pengujian komunikasi I2C antara NodeMCU ESP32 dan LCD I2C, serta pengujian motor servo sebagai penggerak palang parkir. Pengujian dilakukan untuk memastikan setiap komponen dapat bekerja sesuai dengan rancangan dan seluruh sistem dapat terintegrasi dengan baik.

5. Tahap Evaluasi (Evaluation)

Tahap *Evaluation* dilakukan untuk menilai hasil pengembangan secara keseluruhan berdasarkan data validasi dan hasil pengujian produk. Evaluasi mencakup aspek kevalidan dan kelayakan alat peraga berdasarkan penilaian ahli media dan ahli materi, serta hasil pengujian fungsi sistem pada tahap implementasi. Masukan dari validator dan hasil pengujian digunakan untuk menentukan perbaikan akhir produk. Produk dinyatakan layak apabila memenuhi kriteria kelayakan yang telah ditetapkan berdasarkan hasil analisis data.

a. Data Collection Techniques

Pengumpulan data dalam penelitian ini dilakukan menggunakan teknik angket. Angket merupakan instrumen pengumpulan data yang terdiri atas serangkaian pernyataan tertulis yang diberikan kepada responden untuk memperoleh informasi mengenai penilaian terhadap alat peraga yang dikembangkan.

Dalam penelitian ini, instrumen angket diberikan kepada dua validator, yaitu ahli media dan ahli materi. Angket yang diberikan kepada ahli media bertujuan untuk menilai aspek desain, tampilan, konstruksi, dan fungsionalitas alat peraga, sedangkan angket yang diberikan kepada ahli materi bertujuan untuk menilai kesesuaian materi, implementasi komunikasi *Inter-Integrated Circuit* (I2C), serta kesesuaian alat peraga dengan tujuan pembelajaran pada mata kuliah Sistem Mikroprosesor. Hasil penilaian dari kedua validator digunakan sebagai dasar untuk menentukan tingkat kelayakan alat peraga serta sebagai acuan dalam melakukan revisi dan penyempurnaan produk.

Skala pengukuran yang digunakan dalam angket adalah skala Likert lima tingkat, yang memungkinkan validator memberikan penilaian terhadap setiap butir pernyataan berdasarkan tingkat kesesuaiannya. Skala ini digunakan untuk mengukur tingkat kelayakan alat peraga yang dikembangkan berdasarkan aspek media maupun aspek materi [12], [13].

b. Research Instruments

Instrumen penelitian yang digunakan dalam penelitian ini berupa angket tertutup dan angket terbuka. Angket digunakan untuk memperoleh data mengenai kelayakan alat peraga berupa sistem pemantauan parkir *basement* pusat perbelanjaan berbasis mikrokontroler sebagai media pembelajaran komunikasi *Inter-Integrated Circuit* (I2C) pada mata kuliah Sistem Mikroprosesor. Instrumen diberikan kepada ahli media dan ahli materi untuk menilai kualitas alat peraga dari aspek desain, konstruksi, fungsionalitas, kinerja sistem, serta kesesuaian materi dengan tujuan pembelajaran.

Angket tertutup merupakan angket yang menyediakan alternatif jawaban yang telah ditentukan sehingga validator dapat memberikan penilaian secara langsung pada setiap pernyataan. Angket tertutup digunakan untuk memperoleh data kuantitatif mengenai tingkat kelayakan alat peraga. Instrumen ini terdiri atas dua jenis, yaitu (1) angket penilaian kelayakan oleh ahli media dan (2) angket penilaian kelayakan oleh ahli materi. Penilaian menggunakan skala Likert lima tingkat, yaitu Sangat Baik (5), Baik (4), Cukup (3), Kurang (2), dan Sangat Kurang (1).

Angket terbuka merupakan bagian instrumen yang memberikan kesempatan kepada validator untuk menyampaikan komentar, kritik, dan saran secara bebas terhadap produk yang dikembangkan. Angket terbuka digunakan untuk memperoleh data kualitatif sebagai bahan pertimbangan dalam melakukan revisi dan penyempurnaan alat peraga. Komentar dan saran dari ahli media dan ahli materi digunakan sebagai dasar perbaikan terhadap aspek-aspek yang masih memerlukan penyempurnaan sebelum alat peraga diimplementasikan.

Dengan demikian, penggunaan angket tertutup dan angket terbuka memungkinkan penelitian memperoleh data kuantitatif berupa skor kelayakan sekaligus data kualitatif berupa komentar dan saran validator, sehingga penilaian terhadap alat peraga dapat dilakukan secara lebih komprehensif.

c. Validation Sheet and Questionnaire Blueprint

Produk yang telah dikembangkan divalidasi oleh dua orang ahli, yang terdiri atas satu orang ahli alat peraga dan satu orang ahli materi, yang keduanya merupakan dosen perguruan tinggi. Ahli media bertugas mengevaluasi aspek desain, tampilan, konstruksi, dan fungsionalitas alat peraga, sedangkan ahli materi menilai kesesuaian konsep yang disajikan, implementasi komunikasi *Inter-Integrated Circuit* (I2C), serta kinerja sistem yang dikembangkan.

Kisi-Kisi Validasi Ahli Media

Instrumen validasi ahli media terdiri atas beberapa aspek penilaian, yaitu aspek pembelajaran, aspek desain fisik alat peraga, aspek kualitas alat peraga, dan aspek fungsionalitas media. Rincian indikator serta butir-butir penilaian disajikan pada Tabel 1.

Table 1. Blueprint of the Media Expert Validation Instrument

No	Indicator	Assessment Item
1	Physical Design	The shape of the instructional media is appropriate for the parking monitoring system function. The size of the instructional media is proportional and ergonomic. The dimensions of the instructional media are suitable for system operation.
2	Visual Appearance	The color combination is attractive and does not interfere with usability. The text and labels on the instructional media are easy to read. Symbols and indicators are easy to understand. Parking labels are positioned appropriately.
3	Component Arrangement	The components are arranged neatly and systematically. The placement of components does not confuse users. Components are easily accessible and convenient to use.
4	Construction Quality	The materials used are durable and suitable for repeated use. The assembly of the instructional media is neat and well-organized. There are no parts that may pose safety risks to users.

5	Design Functionality	The design supports the functionality of the parking monitoring system. Desain alat mempermudah pengoperasian The design facilitates ease of operation.
---	----------------------	---

Selain memberikan penilaian terhadap setiap butir instrumen, validator juga diberikan ruang untuk menyampaikan komentar dan saran. Masukan tersebut digunakan sebagai bahan evaluasi dalam proses revisi dan penyempurnaan alat peraga yang dikembangkan.

Kisi-Kisi Validasi Ahli Materi

Instrumen validasi ahli materi difokuskan pada kesesuaian materi pembelajaran dengan tujuan pembelajaran, kebutuhan belajar, serta kualitas penyajian materi. Rincian indikator penilaian disajikan pada Tabel 2.

Table 2. Blueprint of the Subject-Matter Expert Validation Instrument

No	Indicator	Assessment Item
1	System Appropriateness	The parking monitoring system is designed in accordance with the principles of a parking monitoring system. The implementation of I2C communication in the instructional media is accurate. The integration among system components operates according to the intended design concept.
2	Implementation Accuracy	The implementation of I2C communication functions correctly. Each component (sensors, microcontroller, and output devices) performs according to its intended function.
3	System Performance	The system is capable of accurately detecting parking conditions. The system provides outputs that correspond to actual conditions. The system operates stably without significant disruptions.
4	Functional Suitability	The instructional media can be used as a realistic parking monitoring system.

Sebagaimana pada proses validasi oleh ahli media, ahli materi juga diberikan kesempatan untuk menyampaikan komentar dan rekomendasi terhadap alat peraga yang dikembangkan. Masukan tersebut menjadi bahan evaluasi yang penting dalam proses revisi dan penyempurnaan alat peraga sehingga produk yang dihasilkan memiliki kualitas yang lebih baik dan sesuai dengan tujuan pembelajaran.

d. Data Analysis Techniques

Data yang diperoleh dari hasil validasi ahli media dan ahli materi dianalisis menggunakan teknik statistik deskriptif. Analisis data bertujuan untuk mengetahui tingkat kelayakan alat peraga sistem pemantauan parkir berbasis mikrokontroler sebagai alat peraga komunikasi *Inter-Integrated Circuit* (I2C).

Analisis Kelayakan Alat peraga

Penilaian kelayakan alat peraga dilakukan menggunakan skala Likert lima tingkat pada setiap butir pernyataan dalam angket. Setiap kategori penilaian diberikan skor yang berbeda, sebagaimana disajikan pada Tabel 3.

Table 3. Scoring Criteria for the Feasibility Questionnaire

Criteria	Score
Excellent	5
Good	4
Fair	3
Poor	2
Very Poor	1

Data yang diperoleh dari hasil angket dianalisis secara deskriptif dengan menghitung nilai rata-rata kelayakan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$\text{Feasibility Score of Teaching Aid } p = \frac{F}{R} 100\%$$

Nilai rata-rata yang diperoleh selanjutnya dikonversi ke dalam bentuk persentase untuk menentukan kategori kelayakan alat peraga. Penentuan kategori kelayakan didasarkan pada klasifikasi skala Likert lima tingkat, sebagaimana disajikan pada Tabel 4.

Table 4. Feasibility Categories of the Instructional Media

Score Range (%)	Category
81 – 100	Highly Feasible
61 – 80	Feasible
41 – 60	Moderately Feasible
21 – 40	Less Feasible
0 – 20	Not Feasible

Berdasarkan kriteria tersebut, tingkat kelayakan alat peraga ditentukan berdasarkan persentase skor yang diperoleh dari hasil analisis angket validasi. Semakin tinggi persentase yang diperoleh, semakin tinggi pula tingkat kelayakan alat peraga yang dikembangkan untuk digunakan dalam proses pembelajaran.

Result and Discussion

a. Results

Penelitian ini menghasilkan sebuah alat peraga berupa sistem pemantauan parkir basement pusat perbelanjaan berbasis mikrokontroler sebagai sarana pembelajaran komunikasi *Inter-Integrated Circuit* (I2C) pada mata kuliah Sistem Mikroprosesor. Proses pengembangan alat peraga dilakukan menggunakan model ADDIE yang terdiri atas lima

tahapan, yaitu Analysis (analisis), Design (perancangan), Development (pengembangan), Implementation (implementasi), dan Evaluation (evaluasi).

1. Analysis Phase

Tahap analisis dilakukan melalui observasi terhadap proses pembelajaran komunikasi I2C pada mata kuliah Sistem Mikroprosesor di Program Studi Pendidikan Teknik Elektro, Fakultas Tarbiyah dan Keguruan, UIN Ar-Raniry. Hasil observasi menunjukkan bahwa pembelajaran komunikasi *Inter-Integrated Circuit* (I2C) masih didominasi oleh penyampaian materi secara teoretis, sehingga implementasi komunikasi I2C pada sistem nyata belum dapat didemonstrasikan secara optimal dalam proses pembelajaran.

Selain itu, belum tersedia alat peraga yang mampu mengintegrasikan berbagai komponen mikrokontroler ke dalam satu sistem yang utuh dan aplikatif. Oleh karena itu, pengembangan alat peraga dinilai diperlukan untuk merepresentasikan implementasi komunikasi *Inter-Integrated Circuit* (I2C) dalam sistem berbasis mikrokontroler sehingga dapat digunakan sebagai sarana demonstrasi pada proses pembelajaran.

2. Design Phase

Berdasarkan hasil analisis kebutuhan, dilakukan perancangan alat peraga berupa sistem pemantauan parkir. Sistem yang dirancang terdiri atas NodeMCU ESP32 sebagai pengendali utama, sensor inframerah sebagai pendeteksi keberadaan kendaraan, LCD I2C sebagai media penampil informasi kondisi parkir, dan motor servo sebagai penggerak palang parkir. Seluruh komponen tersebut diintegrasikan dalam satu sistem untuk mendemonstrasikan penerapan komunikasi I2C secara praktis pada sistem tertanam (*embedded system*).

Proses perancangan meliputi penyusunan diagram blok sistem dan *flowchart* sistem. Diagram blok digunakan untuk menggambarkan hubungan antarkomponen yang terdapat dalam sistem, sedangkan *flowchart* digunakan untuk menjelaskan alur kerja sistem secara keseluruhan, mulai dari proses identifikasi pengguna, pendeteksian slot parkir, hingga penyampaian informasi ketersediaan tempat parkir kepada pengguna.

3. Development Phase

Pada tahap pengembangan, seluruh komponen perangkat keras dirakit dan diintegrasikan dengan perangkat lunak yang telah dirancang berdasarkan desain *prototype* sebelumnya. Alat peraga yang dikembangkan menggunakan NodeMCU ESP32 sebagai pengendali utama, sensor inframerah untuk mendeteksi keberadaan kendaraan, LCD I2C untuk menampilkan informasi status parkir, dan motor servo untuk mengoperasikan palang parkir secara otomatis. Seluruh komponen diintegrasikan menjadi satu sistem pemantauan parkir yang dapat digunakan untuk mendemonstrasikan penerapan komunikasi *Inter-Integrated Circuit* (I2C) secara praktis.

Setelah proses perakitan dan integrasi sistem selesai, dilakukan pengujian awal terhadap setiap komponen untuk memastikan bahwa perangkat keras dan perangkat lunak dapat berfungsi sesuai dengan rancangan. Produk yang telah

dikembangkan selanjutnya masuk ke tahap validasi untuk menilai kelayakan alat peraga sebelum diimplementasikan.

Tahap validasi dilakukan untuk mengetahui tingkat kelayakan alat peraga yang telah dikembangkan. Validasi dilakukan oleh dua orang ahli media dan dua orang ahli materi yang memiliki kompetensi sesuai dengan bidangnya. Validasi ahli media bertujuan untuk menilai aspek desain fisik, tampilan visual, penempatan komponen, kualitas konstruksi, dan fungsi desain alat peraga. Sementara itu, validasi ahli materi bertujuan untuk menilai kesesuaian konsep sistem, ketepatan implementasi komunikasi I2C, kinerja sistem, dan kesesuaian fungsi alat dengan tujuan pembelajaran.

Penilaian dilakukan menggunakan angket tertutup dengan skala Likert lima tingkat, sedangkan validator juga diberikan angket terbuka untuk memberikan komentar, kritik, dan saran terhadap produk. Hasil validasi digunakan sebagai dasar untuk melakukan revisi dan penyempurnaan alat peraga sebelum memasuki tahap implementasi.

4. Implementation Phase

Tahap implementasi dilakukan dengan mengoperasikan alat peraga yang telah dikembangkan untuk memastikan bahwa seluruh komponen sistem berfungsi sesuai dengan spesifikasi perancangan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor inframerah berhasil mendeteksi keberadaan kendaraan pada setiap slot parkir. Data hasil deteksi kemudian diproses oleh mikrokontroler ESP32 dan ditampilkan pada LCD I2C secara *real-time*.

Selain itu, sistem identifikasi pengguna berfungsi dengan baik dalam mengelola akses kendaraan ke area parkir, sedangkan motor servo berhasil membuka dan menutup palang parkir secara otomatis sesuai dengan perintah yang diberikan oleh sistem. Hasil tersebut menunjukkan bahwa seluruh komponen sistem telah bekerja secara terintegrasi dan mampu memenuhi tujuan pengembangan yang telah direncanakan.

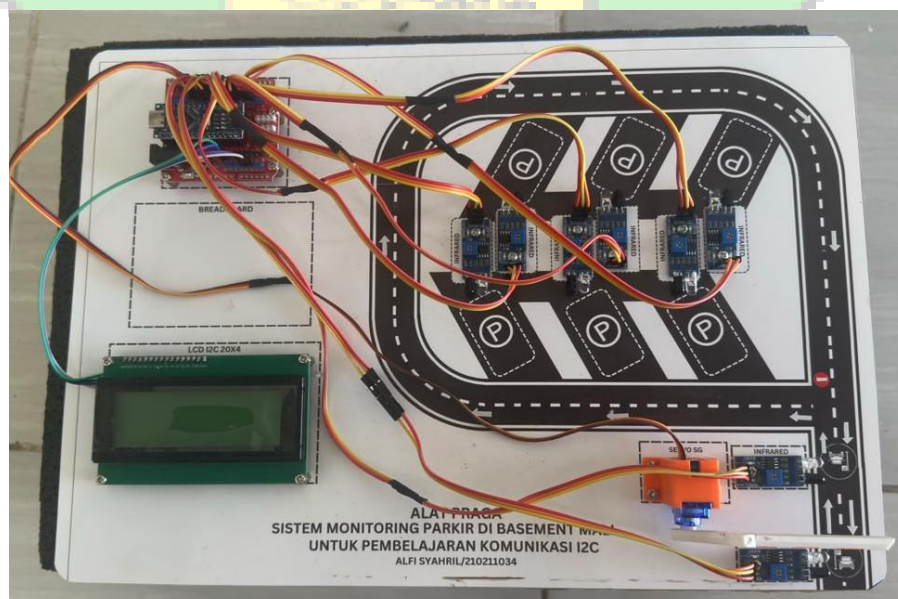


Figure 3. Implementation of the Developed Instructional Media

5. Evaluation Phase

Tahap evaluasi dilakukan untuk menilai kualitas alat peraga yang telah dikembangkan secara menyeluruh berdasarkan hasil validasi ahli media dan ahli materi. Evaluasi ini bertujuan untuk mengetahui tingkat kelayakan produk yang dikembangkan serta mengidentifikasi aspek-aspek yang masih memerlukan penyempurnaan sebelum alat peraga diimplementasikan dalam proses pembelajaran.

a. Media Expert Validation Results

Media expert validation was conducted to evaluate the physical design, visual appearance, component arrangement, construction quality, and design functionality of the developed instructional media.

Table 5. Media Expert Validation Results

No	Assessment Indicator	Assessment Item	Validator		Total Score	Feasibility Percentage (%)	Feasibility Category
			V1	V2			
1	Physical Design	P1	5	5	10	90,0	Highly Feasible
		P2	5	4	9		
		P3	4	4	8		
2	Visual Appearance	P1	5	5	10	87,50	Highly Feasible
		P2	4	4	8		
		P3	5	4	9		
		P4	4	4	8		
3	Component Arrangement	P1	5	4	9	86,67	Highly Feasible
		P2	4	4	8		
		P3	5	4	9		
4	Construction Quality	P1	5	5	10	100	Highly Feasible
		P2	5	5	10		
		P3	5	5	10		
5	Design Functionality	P1	5	5	10	100	Highly Feasible
		P2	5	5	10		
		P3	5	5	10		
Overall Total					148	92,50	Highly Feasible

Berdasarkan hasil validasi ahli media yang disajikan pada Tabel 5, alat peraga memperoleh total skor sebesar 148 dari skor maksimum 160, sehingga menghasilkan persentase kelayakan sebesar 92,50%. Berdasarkan kriteria penilaian yang telah ditetapkan, alat peraga yang dikembangkan termasuk dalam kategori Sangat Layak, sehingga layak digunakan sebagai alat peraga pada mata kuliah Sistem Mikroprosesor.

Secara rinci, aspek kualitas konstruksi dan fungsionalitas desain memperoleh nilai tertinggi dengan persentase kelayakan masing-masing sebesar 100%. Hasil ini menunjukkan bahwa alat peraga memiliki konstruksi yang kuat, aman digunakan, serta seluruh komponen sistem berfungsi sesuai dengan rancangan yang telah ditetapkan. Selain itu, aspek desain fisik memperoleh persentase kelayakan sebesar 90,00%, sedangkan aspek tampilan visual memperoleh persentase sebesar 87,50%. Aspek penataan komponen memperoleh persentase

kelayakan sebesar 86,67%, yang merupakan nilai terendah di antara seluruh aspek penilaian. Meskipun demikian, seluruh aspek tersebut tetap berada dalam kategori Sangat Layak, sehingga menunjukkan bahwa alat peraga telah memenuhi standar kualitas yang dipersyaratkan untuk digunakan dalam proses pembelajaran.

Hasil validasi ini menunjukkan bahwa alat peraga yang dikembangkan memiliki kualitas yang baik dari segi desain, konstruksi, maupun fungsionalitas. Dengan demikian, alat peraga sistem pemantauan parkir berbasis mikrokontroler dinilai layak digunakan sebagai alat peraga komunikasi *Inter-Integrated Circuit* (I2C) untuk membantu memahami konsep komunikasi serial serta implementasinya pada sistem tertanam (*embedded system*).

b. Subject-Matter Expert Validation Results

Subject-matter expert validation was conducted to assess the alignment of the parking monitoring system concept with I2C communication learning objectives, implementation accuracy, system performance, and functional suitability.

Table 6. Subject-Matter Expert Validation Results

No	Assessment Indicator	Assessment Item	Validator V1	Validator V2	Total Score	Feasibility Percentage (%)	Feasibility Category
1	System Concept Appropriateness	P1	5	5	10	96,67	Highly Feasible
		P2	5	4	9		
		P3	5	5	10		
2	Implementation Accuracy	P1	5	4	9	90	Highly Feasible
		P2	4	5	9		
		P3	5	4	9		
3	System Performance	P2	4	5	9	86,67	Highly Feasible
		P3	4	4	8		
4	Functional Suitability	P1	5	3	8	80,00	Feasible
Overall Total					81	90,0	Highly Feasible

Berdasarkan hasil validasi ahli materi yang disajikan pada Tabel 6, alat peraga memperoleh total skor sebesar 81 dari skor maksimum 90, sehingga menghasilkan persentase kelayakan sebesar 90,00%. Berdasarkan kriteria penilaian yang telah ditetapkan, alat peraga yang dikembangkan termasuk dalam kategori Sangat Layak dan dinilai sesuai untuk digunakan dalam proses pembelajaran pada mata kuliah Sistem Mikroprosesor.

Secara rinci, aspek kesesuaian konsep sistem memperoleh persentase kelayakan tertinggi, yaitu 96,67%, yang menunjukkan bahwa materi dan konsep yang diterapkan pada alat peraga telah sesuai dengan capaian pembelajaran komunikasi *Inter-Integrated Circuit* (I2C). Aspek akurasi implementasi memperoleh persentase kelayakan sebesar 90,00%, sedangkan aspek kinerja sistem memperoleh persentase sebesar 86,67%. Sementara itu, aspek kesesuaian fungsional memperoleh persentase sebesar 80,00% dan termasuk dalam kategori Layak. Meskipun memiliki nilai yang lebih rendah dibandingkan aspek lainnya,

hasil tersebut menunjukkan bahwa fungsi alat peraga telah berjalan dengan baik dan masih memenuhi kriteria untuk digunakan sebagai alat peraga.

Secara keseluruhan, hasil validasi ahli materi menunjukkan bahwa alat peraga yang dikembangkan telah memiliki kesesuaian materi, implementasi, dan kinerja sistem yang baik. Dengan persentase kelayakan keseluruhan sebesar 90,00%, alat peraga dinyatakan Sangat Layak untuk digunakan sebagai alat peraga komunikasi *Inter-Integrated Circuit* (I2C) pada mata kuliah Sistem Mikroprosesor.

Selain penilaian secara kuantitatif, para validator juga memberikan beberapa rekomendasi untuk penyempurnaan produk. Saran yang diberikan meliputi perbaikan tata letak komponen sistem, penambahan label pada beberapa bagian alat peraga, serta penyempurnaan buku panduan penggunaan agar lebih mudah dipahami oleh pengguna.

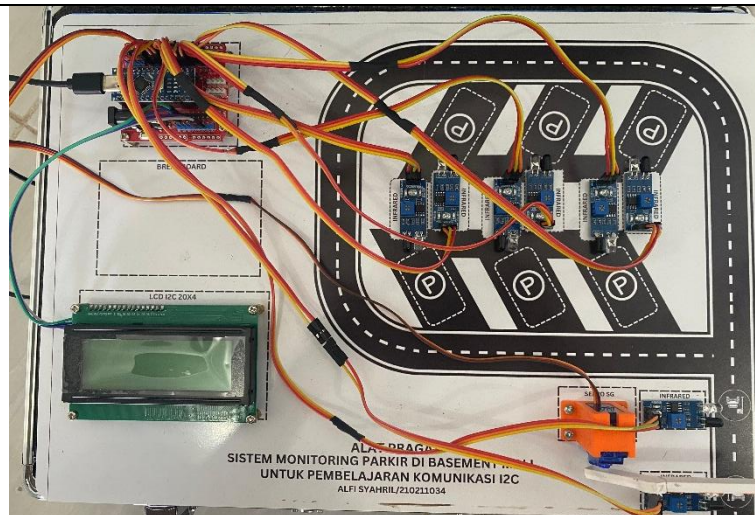
Setelah dilakukan revisi berdasarkan masukan dari para validator, alat peraga menunjukkan peningkatan kualitas dan dinyatakan siap untuk diimplementasikan sebagai alat peraga komunikasi *Inter-Integrated Circuit* (I2C) pada mata kuliah Sistem Mikroprosesor. Secara keseluruhan, hasil evaluasi menunjukkan bahwa sistem pemantauan parkir basement pusat perbelanjaan berbasis mikrokontroler yang dikembangkan termasuk dalam kategori Sangat Layak dan layak digunakan dalam proses pembelajaran.

c. Revisi Produk Berdasarkan Masukan Validator

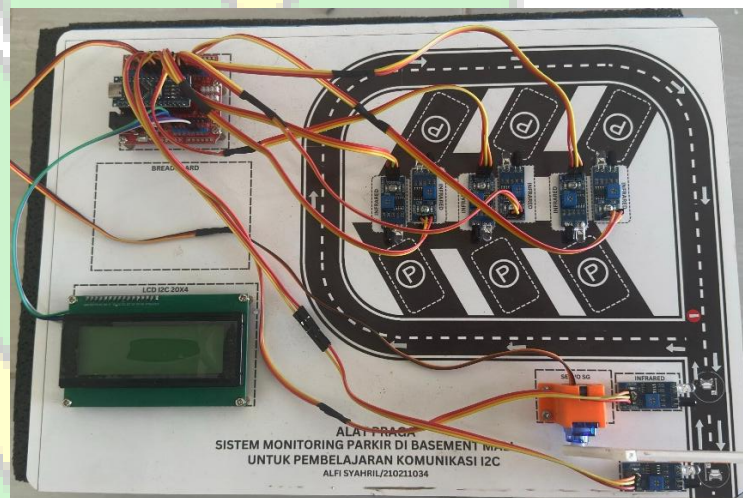
Setelah proses validasi oleh ahli media dan ahli materi selesai dilakukan, alat peraga direvisi berdasarkan masukan dan saran yang diberikan oleh para validator. Revisi dilakukan sebagai upaya penyempurnaan alat peraga agar memiliki tampilan yang lebih informatif, sistematis, dan sesuai dengan kebutuhan pembelajaran komunikasi *Inter-Integrated Circuit* (I2C).

Berdasarkan hasil validasi, salah satu masukan yang diberikan oleh validator adalah perlunya penambahan petunjuk arah pada jalur kendaraan di area parkir. Sebelum dilakukan revisi, alat peraga belum dilengkapi dengan petunjuk arah sehingga alur pergerakan kendaraan pada simulasi sistem monitoring parkir belum tergambarkan secara jelas. Oleh karena itu, dilakukan penambahan petunjuk arah pada jalur masuk dan keluar kendaraan agar alur pergerakan kendaraan dapat dipahami dengan lebih mudah selama proses demonstrasi.

Perbaikan tersebut menghasilkan tampilan alat peraga yang lebih komunikatif dan mempermudah penyajian simulasi sistem monitoring parkir. Penambahan petunjuk arah juga menjadikan representasi alur kerja sistem lebih jelas sehingga alat peraga lebih sesuai digunakan sebagai media demonstrasi komunikasi *Inter-Integrated Circuit* (I2C) pada mata kuliah Sistem Mikroprosesor. Perbandingan kondisi alat peraga sebelum dan sesudah dilakukan revisi ditunjukkan pada Gambar 4 dan Gambar 5.



Gambar 4. Alat Peraga Sebelum Revisi



Gambar 5. Alat Peraga Sesudah Revisi

Berdasarkan Gambar 4 dan Gambar 5, terlihat bahwa alat peraga telah mengalami penyempurnaan sesuai dengan masukan validator. Perubahan yang dilakukan berupa penambahan petunjuk arah pada jalur kendaraan sehingga alur pergerakan kendaraan pada simulasi sistem monitoring parkir menjadi lebih jelas dan mudah dipahami. Penambahan petunjuk arah tersebut meningkatkan aspek komunikatif dari alat peraga, sehingga pengguna dapat mengikuti proses simulasi secara lebih sistematis. Revisi ini diharapkan dapat mendukung penggunaan alat peraga sebagai media pembelajaran yang lebih efektif dalam mendemonstrasikan implementasi komunikasi *Inter-Integrated Circuit* (I2C) pada sistem berbasis mikrokontroler.

b. Discussion

Hasil penelitian menunjukkan bahwa alat peraga sistem pemantauan parkir berbasis mikrokontroler berhasil dikembangkan menggunakan model ADDIE dan memperoleh tingkat kelayakan yang tinggi sebagai media pembelajaran komunikasi *Inter-Integrated Circuit* (I2C) pada mata kuliah Sistem Mikroprosesor. Berdasarkan hasil validasi, alat peraga memperoleh persentase kelayakan sebesar 92,50% dari ahli media dan 90,00% dari ahli materi, yang keduanya termasuk dalam kategori Sangat Layak. Hasil tersebut menunjukkan

bahwa alat peraga telah memenuhi aspek desain, konstruksi, fungsi, serta kesesuaian materi pembelajaran. Tingkat kelayakan yang tinggi menunjukkan bahwa alat peraga mampu mengintegrasikan konsep komunikasi I2C ke dalam sistem yang dapat diamati secara langsung. Integrasi NodeMCU ESP32, sensor inframerah, LCD I2C, dan motor servo memungkinkan mahasiswa memahami hubungan antara mikrokontroler dengan perangkat periferi melalui suatu sistem yang merepresentasikan penerapan nyata. LCD I2C memberikan representasi langsung mengenai penerapan komunikasi serial, sedangkan sensor inframerah dan motor servo memperlihatkan bagaimana data masukan diproses oleh mikrokontroler dan menghasilkan keluaran sesuai dengan kondisi sistem. Hasil validasi ahli media sebesar 92,50% menunjukkan bahwa alat peraga memiliki kualitas desain dan konstruksi yang baik. Aspek kualitas konstruksi dan fungsi desain memperoleh nilai tertinggi sebesar 100%, yang menunjukkan bahwa alat dapat digunakan sesuai dengan tujuan perancangannya. Sementara itu, aspek tampilan visual memperoleh nilai sebesar 87,50%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa tampilan alat masih memiliki ruang untuk penyempurnaan, terutama pada aspek pemberian label, petunjuk arah, dan tata letak komponen. Setelah dilakukan revisi berdasarkan masukan validator, tampilan alat menjadi lebih informatif dan mendukung proses penggunaan. Validasi ahli materi memperoleh persentase sebesar 90,00%, yang menunjukkan bahwa konsep sistem dan penerapan komunikasi I2C pada alat telah sesuai dengan materi Sistem Mikroprosesor. Aspek kinerja sistem memperoleh nilai sebesar 86,67%, yang merupakan nilai terendah pada validasi ahli materi. Meskipun demikian, nilai tersebut masih berada dalam kategori Sangat Layak dan menunjukkan bahwa fungsi utama alat telah berjalan sesuai dengan rancangan.

Hasil penelitian ini menunjukkan tingkat kelayakan yang sebanding dengan beberapa penelitian terdahulu mengenai pengembangan media pembelajaran berbasis mikrokontroler. Penelitian Rohma Endar Puspita memperoleh validasi ahli media sebesar 86,62% dan ahli materi sebesar 90,85%, sedangkan penelitian mengenai trainer *Internet of Things* berbasis ESP32 memperoleh tingkat kevalidan media sebesar 89,43%. Penelitian lain mengenai pengembangan media pembelajaran mikrokontroler antarmuka I2C memperoleh validasi ahli media sebesar 96,9% dan ahli materi sebesar 84,9%. Apabila dibandingkan dengan penelitian tersebut, penelitian ini memperoleh 92,50% dari ahli media dan 90,00% dari ahli materi, sehingga menunjukkan bahwa tingkat kelayakan alat peraga yang dikembangkan berada pada kategori yang kompetitif. Perbedaan karakteristik penelitian terletak pada konteks penggunaan alat sebagai media pembelajaran komunikasi I2C melalui simulasi sistem pemantauan parkir. Alat peraga tidak hanya digunakan untuk memperlihatkan fungsi komunikasi I2C, tetapi mengintegrasikan komunikasi tersebut dengan sensor inframerah, LCD I2C, ESP32, dan motor servo dalam satu sistem *embedded system*.

Secara pedagogis, alat peraga yang dikembangkan memiliki implikasi terhadap pembelajaran Sistem Mikroprosesor karena dapat membantu menghubungkan konsep teoritis dengan penerapan praktis. Mahasiswa dapat mengamati secara langsung bagaimana data dari sensor diproses oleh mikrokontroler dan bagaimana informasi tersebut ditampilkan melalui LCD I2C. Kondisi tersebut dapat memberikan pengalaman belajar yang lebih konkret dibandingkan pembelajaran yang hanya menggunakan penjelasan teori atau simulasi. Secara praktis, alat peraga dapat digunakan oleh dosen sebagai media demonstrasi dan kegiatan praktikum pada materi komunikasi I2C. Sistem pemantauan parkir juga memberikan konteks aplikasi yang lebih dekat dengan kehidupan nyata sehingga mahasiswa

dapat memahami bahwa komunikasi I2C tidak hanya dipelajari sebagai konsep komunikasi serial, tetapi dapat diterapkan sebagai bagian dari sistem tertanam yang terintegrasi.

Meskipun demikian, penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. Alat peraga yang dikembangkan masih menggunakan jumlah slot parkir yang terbatas sehingga belum sepenuhnya merepresentasikan sistem parkir pada kondisi nyata dengan kapasitas yang lebih besar. Penelitian ini juga lebih berfokus pada pengembangan dan kelayakan alat peraga, sehingga belum dilakukan pengujian efektivitas secara eksperimen untuk mengetahui peningkatan hasil belajar mahasiswa sebelum dan sesudah menggunakan alat peraga. Selain itu, sistem yang dikembangkan masih berfokus pada penerapan komunikasi I2C untuk integrasi LCD dengan mikrokontroler dan belum mencakup pengembangan komunikasi I2C dengan jumlah perangkat periferal yang lebih kompleks. Sistem juga belum dilengkapi dengan fitur pemantauan berbasis internet atau aplikasi *mobile* karena fokus penelitian diarahkan pada penerapan komunikasi I2C sebagai materi pembelajaran.

Berdasarkan hasil penelitian dan keterbatasan tersebut, pengembangan selanjutnya dapat dilakukan dengan menambah jumlah slot parkir dan variasi perangkat periferal sehingga sistem dapat digunakan untuk mendemonstrasikan komunikasi I2C dengan konfigurasi yang lebih kompleks. Pengembangan juga dapat diarahkan pada integrasi fitur pemantauan berbasis *Internet of Things* (IoT) atau aplikasi *mobile* sebagai pengembangan lanjutan tanpa menghilangkan fungsi utama alat sebagai media pembelajaran komunikasi I2C. Selain itu, penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan pengujian efektivitas melalui desain eksperimen, misalnya dengan membandingkan hasil belajar mahasiswa sebelum dan sesudah menggunakan alat peraga. Pengujian tersebut dapat memberikan bukti empiris yang lebih kuat mengenai pengaruh penggunaan alat peraga terhadap pemahaman konsep komunikasi I2C dan keterampilan praktis mahasiswa. Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa alat peraga sistem pemantauan parkir berbasis mikrokontroler memiliki tingkat kelayakan yang sangat baik dan berpotensi menjadi media pembelajaran yang mampu menghubungkan konsep komunikasi I2C secara teoritis dengan penerapannya secara praktis dalam sistem *embedded system*.

Conclusion

Penelitian ini berhasil mengembangkan alat peraga berupa sistem pemantauan parkir *basement* pusat perbelanjaan berbasis mikrokontroler sebagai media pembelajaran komunikasi *Inter-Integrated Circuit* (I2C) pada mata kuliah Sistem Mikroprosesor. Proses pengembangan dilakukan menggunakan model ADDIE yang meliputi tahapan *Analysis*, *Design*, *Development*, *Implementation*, dan *Evaluation*. Alat peraga yang dikembangkan mengintegrasikan mikrokontroler ESP32, sensor inframerah, LCD I2C, dan motor servo ke dalam satu sistem yang terintegrasi sehingga mampu merepresentasikan penerapan komunikasi I2C pada sistem tertanam (*embedded system*) secara praktis dan kontekstual.

Hasil validasi menunjukkan bahwa alat peraga yang dikembangkan memperoleh persentase kelayakan sebesar 92,50% berdasarkan penilaian ahli media dan 90,00% berdasarkan penilaian ahli materi. Berdasarkan kriteria penilaian yang digunakan, kedua hasil tersebut termasuk dalam kategori Sangat Layak. Selain itu, hasil implementasi

menunjukkan bahwa seluruh komponen sistem berfungsi sesuai dengan rancangan dan mampu mendemonstrasikan penerapan komunikasi I2C secara efektif dalam lingkungan *embedded system*. Dengan demikian, alat peraga yang dikembangkan dinyatakan layak digunakan sebagai media pendukung pembelajaran komunikasi *Inter-Integrated Circuit* (I2C) pada mata kuliah Sistem Mikroprosesor karena mampu merepresentasikan implementasi komunikasi I2C dalam suatu sistem tertanam secara terintegrasi.

Pengembangan selanjutnya dapat dilakukan dengan menambahkan fitur pemantauan berbasis *Internet of Things* (IoT), pengembangan aplikasi bergerak (*mobile application*), serta penambahan jumlah slot parkir agar simulasi yang dihasilkan semakin mendekati kondisi sistem parkir sebenarnya. Meskipun alat peraga yang dikembangkan telah dinyatakan sangat layak berdasarkan hasil validasi ahli media dan ahli materi, penelitian ini belum diimplementasikan secara langsung kepada mahasiswa dalam proses pembelajaran. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan untuk menerapkan alat peraga pada kegiatan pembelajaran yang sesungguhnya sehingga dapat diketahui respons pengguna serta manfaat penggunaannya dalam mendukung pembelajaran komunikasi *Inter-Integrated Circuit* (I2C). Selain itu, efektivitas penggunaan alat peraga perlu diuji menggunakan desain penelitian eksperimen, seperti *pretest-posttest*, sehingga pengaruh penggunaan alat peraga terhadap peningkatan hasil belajar mahasiswa dapat diukur secara lebih objektif.

References

- [1] A. N. Rahmawati and D. Kurniawan, "The Role of Learning Media in Improving Student Understanding," *Journal of Educational Technology*, vol. 15, no. 2, pp. 45–53, 2021.
- [2] R. Pratama, "Digital Learning Media Development in Higher Education," *International Journal of Education and Learning*, vol. 8, no. 1, pp. 12–20, 2022.
- [3] S. Nurhayati and A. Fauzi, "Teaching Aids as Learning Support Media," *Journal of Science Education*, vol. 9, no. 3, pp. 210–218, 2021.
- [4] M. F. Rizal et al., "Development of Interactive Teaching Aids for Engineering Education," *Journal of Engineering Education*, vol. 11, no. 2, pp. 88–97, 2023.
- [5] M. M. Ahmed and K. Hassan, "ESP32-Based Embedded Systems for Educational Applications," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 112340–112349, 2022.
- [6] S. Sharma and R. Kumar, "Implementation of IoT Systems Using ESP32 Microcontroller," *International Journal of Smart Technology*, vol. 5, no. 4, pp. 145–153, 2023.
- [7] H. Lee and J. Park, "I2C Communication Protocol in Embedded Systems," *Electronics*, vol. 10, no. 15, pp. 1–12, 2021.
- [8] P. K. Singh, "Performance Analysis of I2C Communication in Microcontroller Applications," *Microprocessors and Microsystems*, vol. 84, pp. 1–9, 2022.
- [9] R. Wahyudi et al., "Development of Arduino-Based Learning Media," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1805, no. 1, 2021.
- [10] F. S. Lubis and A. Syahputra, "Microcontroller-Based Learning Tools for Vocational Education," *Jurnal Pendidikan Teknologi dan Kejuruan*, vol. 27, no. 1, pp. 55–63, 2021.
- [11] N. Hidayat et al., "Development of Embedded System Learning Kits," *International Journal of Instruction*, vol. 15, no. 2, pp. 421–436, 2022.

- [12] Y. Setiawan and B. Nugroho, "IoT-Based Educational Media Development," *Jurnal Pendidikan Vokasi*, vol. 13, no. 2, pp. 150–159, 2023.
- [13] M. Alamsyah et al., "Smart Learning Devices Using ESP32," *TELKOMNIKA*, vol. 21, no. 1, pp. 87–95, 2023.
- [14] R. M. Branch and T. Kopcha, "Instructional Design Models and ADDIE Framework," *Educational Technology Research Review*, vol. 12, no. 2, pp. 34–42, 2021.
- [15] S. H. Kim, "Application of ADDIE Model in Learning Media Development," *International Journal of Educational Research*, vol. 18, no. 4, pp. 55–63, 2022.
- [16] Sugiyono, *Metode Penelitian dan Pengembangan (Research and Development)*. Bandung: Alfabeta, 2022.
- [17] J. W. Creswell and J. D. Creswell, *Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches*, 6th ed. Thousand Oaks, CA: Sage, 2023.
- [18] E. R. Allen and P. Seaman, "Likert Scales and Data Analysis," *Quality Progress*, vol. 55, no. 3, pp. 64–68, 2022.
- [19] A. Fitriani et al., "Effectiveness of Learning Media in Engineering Education," *Jurnal Pendidikan Teknologi dan Kejuruan*, vol. 30, no. 1, pp. 10–19, 2024.
- [20] D. Prasetyo and S. Wibowo, "Technology-Based Learning Media and Student Motivation," *International Journal of Education*, vol. 16, no. 2, pp. 111–120, 2024.
- [21] N. Ramadhani et al., "Interactive Media Development for Technical Education," *Journal of Educational Innovation*, vol. 7, no. 1, pp. 25–34, 2024.
- [22] A. Kumar and R. Sharma, "Internet of Things Applications Using ESP32," *IEEE Internet of Things Magazine*, vol. 7, no. 1, pp. 56–63, 2025.
- [23] B. Setiawan et al., "IoT-Based Monitoring Systems for Educational Purposes," *TELKOMNIKA*, vol. 23, no. 1, pp. 101–110, 2025.
- [24] H. Putra and M. Yusran, "Practical Learning Through Teaching Aids in Engineering Education," *Jurnal Pendidikan Teknik Elektro*, vol. 14, no. 2, pp. 77–85, 2025.
- [25] S. Rahman et al., "Embedded System Learning Media for Higher Education," *International Journal of Advanced Education*, vol. 9, no. 1, pp. 35–44, 2025.

