

***Prototype Smart locker Berbasis ESP32-S3 dengan Autentikasi
Berlapis dan Antarmuka Web untuk Area Publik
Osa Auditya Sulistyana; Umi Fadlilah, S.T., M.Eng, Ph.D***

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan *prototype* loker pintar berbasis mikrokontroler ESP32-S3 dengan otentikasi berlapis yang menggabungkan PIN, OTP (*One Time Password*), dan kode QR/barcode serta antarmuka berbasis web guna meningkatkan keamanan dan kemudahan akses di area publik. Perangkat keras sistem terdiri dari modul ESP32-S3, kunci pintu solenoid, relay, *keypad* matrix 4x4, dan layar TFT, sedangkan perangkat lunak dikembangkan berbasis *server web* yang dapat diakses melalui smartphone. Sistem menjalankan dua fungsi utama, yaitu proses simpan barang dan ambil barang. Pengguna menyimpan barang dengan memindai QR code pada pintu loker, mengisi data pribadi di web untuk mendapatkan OTP, lalu memasukkan kode melalui *keypad* dan menekan # untuk mengonfirmasi agar loker terbuka otomatis. Untuk pengambilan barang, pengguna memindai QR code kembali, memasukkan nomor ponsel terdaftar, dan menekan D untuk menutup serta mengunci loker setelah barang diambil. Hasil pengujian menunjukkan performa sangat baik, di mana pengujian antarmuka web mencapai 98,33%, pengujian perangkat fisik 98,85%, proses simpan barang 99,17% proses ambil barang 99,61%, dan pembacaan RFID 80%. Sistem terbukti berjalan stabil tanpa kegagalan kritis dan cocok diimplementasikan di area publik seperti kampus, stasiun, dan fasilitas umum lainnya.

Kata Kunci: Autentikasi Berlapis; ESP32-S3; *Internet of Things* (IoT); Monitoring Berbasis Web; Prototipe Sistem; *Smart Locker*.

Abstract

This research aims to design and implement a smart locker prototype based on the ESP32-S3 microcontroller with layered authentication combining PIN, OTP (One Time Password), and QR code/barcode along with a web-based interface to improve security and ease of access in public areas. The hardware consists of an ESP32-S3 module, solenoid door lock, relay, 4x4 matrix keypad, and TFT screen, while the software is developed on a web server accessible via smartphone. The system runs two main functions, namely item storage and item retrieval. Users store items by scanning the QR code on the locker door, filling in personal data on the web to obtain an OTP, then entering the code via keypad and pressing # to confirm so the locker opens automatically. For item retrieval, users scan the QR code again, enter their registered phone number, and press D to close and lock the locker after retrieving items. Test results showed excellent performance, with web interface testing achieving 98,33%, physical device testing 98,85%, item storage process 99.17%, item retrieval process 99.61%, and RFID reading 80%. The system ran stably without critical failures and is suitable for implementation in public areas such as campuses, stations, and other public facilities.

Keywords: Layered Authentication; ESP32-S3; *Internet of Things* (IoT); Web-Based Monitoring; System Prototype; *Smart Locker*.

1. PENDAHULUAN

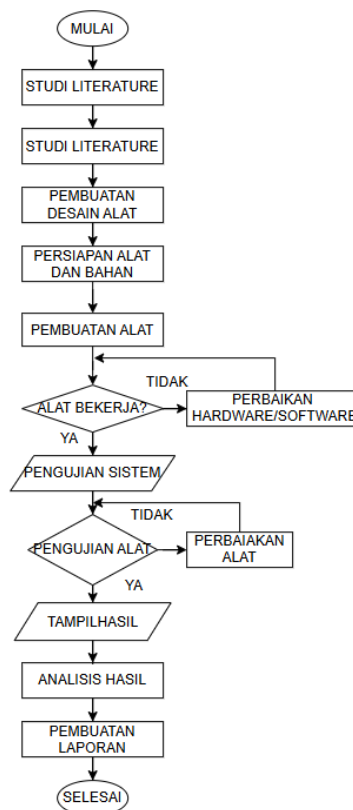
Perkembangan teknologi informasi dan *Internet of Things* (IoT) telah mendorong penerapan sistem otomatis di berbagai area publik seperti perpustakaan, pusat perbelanjaan, dan stasiun transportasi. Loker konvensional yang masih bergantung pada kunci mekanik memiliki berbagai kelemahan seperti risiko kehilangan kunci dan potensi duplikasi (Bharatiraja et al., 2023). Ketiadaan pengelolaan terpusat pada sistem manual juga menjadikannya kurang sesuai untuk lingkungan dengan mobilitas pengguna yang tinggi (Iftitah Walinda Fujiarti et al., 2025). Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa RFID (*Radio Frequency Identification*) mampu meningkatkan keamanan dan efisiensi akses loker melalui identifikasi yang cepat dan akurat (Bharatiraja et al., 2023). Teknologi ini banyak diterapkan pada *smart locker* untuk mengurangi ketergantungan terhadap kunci fisik (Iftitah Walinda Fujiarti et al., 2025). Perluasan metode autentikasi menggunakan *QR code* berbasis IoT terbukti meningkatkan keamanan akses pengguna (Adedoyin & Olukoya, n.d.), serta memungkinkan monitoring status loker secara daring melalui antarmuka *website* (Permana et al., 2025). Namun, sebagian besar sistem yang dikembangkan masih bergantung pada antarmuka *mobile* eksternal sehingga pengguna perlu perangkat tambahan untuk mengoperasikannya (Ananda et al., 2023), dan belum menerapkan autentikasi berlapis sehingga belum mampu memberikan perlindungan optimal terhadap akses tidak sah (Alzhrani et al., 2024).

Peningkatan keamanan sistem akses dapat dilakukan melalui penerapan autentikasi berlapis yang mengombinasikan RFID, *keypad*, dan *One Time Password* (OTP), sehingga hanya pengguna yang memiliki kartu dan kode akses yang *valid* dapat masuk ke sistem (Rozaq et al., 2023). Layar TFT merupakan komponen penampil yang umum digunakan pada sistem *embedded* untuk menyajikan informasi secara langsung kepada pengguna, seperti menu *idle*, panduan penggunaan, dan antarmuka *input* OTP, sehingga interaksi pengguna dapat berlangsung lebih intuitif tanpa bergantung pada perangkat eksternal tambahan. *Keypad* 4x4 merupakan perangkat *input* yang andal dan mudah diimplementasikan untuk sistem autentikasi berlapis (Alfonsius et al., 2024). Di sisi lain, mikrokontroler ESP32-S3 menawarkan kemampuan pemrosesan lebih tinggi dan konektivitas *Wi-Fi* yang optimal untuk IoT (Saputra et al., 2024), namun penerapannya pada *smart locker* masih terbatas karena banyak sistem yang masih menggunakan mikrokontroler generasi lama (Aulia et al., 2025).

Oleh karena itu, penelitian ini mengembangkan sistem *smart locker* berbasis ESP32-S3 yang mengintegrasikan autentikasi berlapis menggunakan RFID, *QR code*, dan OTP, dilengkapi antarmuka TFT serta *keypad* 4x4. Sistem bersifat prototipe dengan fokus pada pengujian integrasi perangkat keras dan perangkat lunak, keandalan autentikasi berlapis, serta fungsi monitoring berbasis *web*.

2. METODE

Penelitian ini bertujuan mengembangkan *prototipe* sistem *Smart locker* yang terintegrasi dengan kendali penguncian otomatis berbasis mikrokontroler ESP32S3. Sistem dirancang menggunakan arsitektur terpadu yang menggabungkan mikrokontroler ESP32S3 sebagai pengendali perangkat keras, modul RFID RC522 sebagai autentikasi pengguna, serta *platform web* berbasis PHP dan MySQL sebagai antarmuka manajemen loker dan penyimpanan data. Metode yang digunakan dalam penelitian ini meliputi perancangan sistem mekanik dan elektronik, implementasi *firmware* berbasis *state machine*, pengembangan API PHP sebagai jembatan komunikasi antara ESP32S3 dan *database* MySQL, serta pengujian sistem secara menyeluruh. Gambar 1 adalah alur serta penjelasan mengenai tahapan penelitian yang akan dilakukan.



Gambar 1. Diagram Alur Penelitian

a. Studi Literatur

Pada tahapan ini bertujuan untuk memahami konsep dasar yang berkaitan dengan sistem loker pintar berbasis mikrokontroler, pengendalian perangkat keras menggunakan ESP32S3, mekanisme autentikasi berlapis menggunakan OTP dan RFID, pemrograman antarmuka berbasis *web* menggunakan PHP dan MySQL, serta penerapan komunikasi nirkabel berbasis WiFi untuk mendukung pertukaran data antara *firmware* dan *server* pada sistem *smart locker*.

b. Persiapan alat dan bahan

Pada tahap ini dilakukan proses perancangan sistem yang akan dibangun, mulai dari desain skematik perangkat keras hingga pengembangan perangkat lunak. Perancangan meliputi integrasi modul ESP32S3, *solenoid door lock*, relay 4 *channel*, layar TFT ST7735, *keypad* 4×4, dan modul RFID RC522, serta pengembangan *server web* sebagai antarmuka pengguna. Pengguna mengakses halaman *web* untuk melakukan pemesanan loker dan menerima kode OTP sebagai kunci akses penyimpanan barang. Selain itu, dirancang pula mekanisme akses menggunakan kartu RFID yang UID-nya telah terdaftar di *database* MySQL untuk pengambilan barang sementara, serta verifikasi kombinasi RFID dan OTP permanen untuk pengambilan barang secara penuh yang sekaligus mengubah status loker menjadi tersedia kembali.

c. Pembuatan Prototipe

Pada tahap ini dilakukan perakitan rangkaian *hardware* sesuai dengan skema yang telah dirancang, yaitu menghubungkan ESP32S3 dengan modul relay 4 *channel* yang berfungsi untuk mengontrol keempat *solenoid door lock* pada masing-masing kompartemen loker. Selain itu dilakukan pembuatan program *firmware* pada ESP32S3 menggunakan Arduino IDE agar ESP32S3 dapat terhubung dengan jaringan *Wi-Fi* dan berkomunikasi dengan *server web* melalui protokol HTTP GET. *Firmware* dirancang menggunakan pendekatan *state machine* sehingga sistem dapat menangani berbagai skenario penggunaan secara terstruktur, meliputi penyimpanan barang dengan verifikasi OTP, pengambilan barang sementara menggunakan kartu RFID, serta pengambilan barang permanen menggunakan kombinasi kartu RFID dan OTP permanen. Sebagai antarmuka pengguna, dikembangkan pula sistem *web* berbasis PHP dan MySQL yang dihosting pada *server* osaasulistiana.my.id. Melalui antarmuka *web* ini pengguna dapat melakukan pemesanan loker, memperoleh kode OTP,

serta meminta pengambilan barang secara permanen. Seluruh data transaksi dan status loker tersimpan di *database* MySQL yang dikelola melalui *cPanel hosting*, sehingga ESP32S3 dan *web* dapat saling bertukar informasi secara *real-time*.

d. Pengujian Sistem Program pada Prototipe

Setelah prototipe selesai dibuat, tahap selanjutnya adalah melakukan pengujian sistem secara menyeluruh. Pengujian dilakukan untuk memastikan bahwa setiap bagian sistem dapat bekerja sesuai dengan fungsi yang diharapkan. Pengujian meliputi pengujian koneksi ESP32S3 dengan jaringan WiFi, pengujian pembacaan kartu RFID RC522 dan pencocokan UID dengan *database* MySQL, pengujian *input* OTP melalui *keypad* 4×4 beserta verifikasinya ke *server*, pengujian respons *solenoid door lock* terhadap perintah relay, serta pengujian mekanisme *polling server* setiap 1,5 detik untuk mendeteksi pesanan baru maupun permintaan pengambilan permanen. Pengujian juga dilakukan terhadap tampilan layar TFT ST7735 untuk memastikan setiap *state* menampilkan informasi yang benar dan *countdown timer* berjalan tanpa *overflow*. Selain itu dilakukan pengujian stabilitas sistem dan waktu respons dari pengiriman HTTP request hingga eksekusi perintah pada *hardware*.

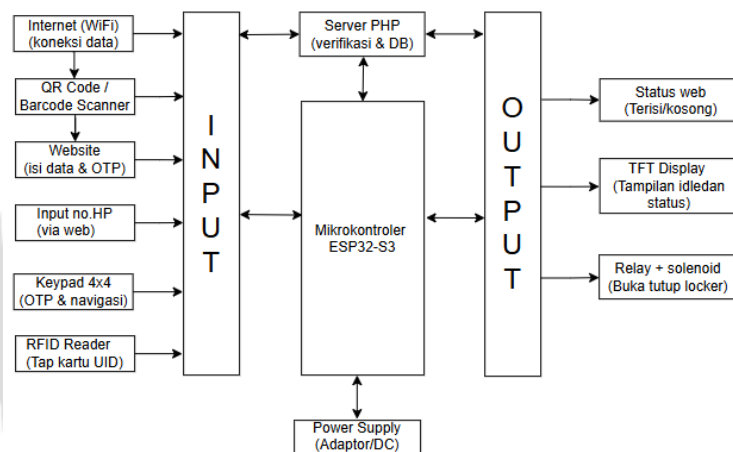
e. Analisis hasil

Pada tahap ini dilakukan evaluasi terhadap hasil pengujian untuk memastikan apakah sistem sudah dapat bekerja secara fungsional. Parameter yang diperiksa meliputi apakah ESP32S3 dapat terhubung ke jaringan WiFi dan melakukan *polling* secara konsisten, apakah solenoid dapat membuka dan mengunci kembali sesuai perintah relay, apakah modul RFID RC522 dapat membaca UID kartu dengan benar dan mencocokkannya dengan data di *database* MySQL, apakah verifikasi OTP melalui *keypad* berjalan akurat, serta apakah perubahan status loker di *database* tercermin dengan benar pada tampilan layar TFT. Jika sistem tidak bekerja sebagaimana mestinya, dilakukan identifikasi penyebab masalah baik dari sisi *hardware* seperti kesalahan rangkaian atau gangguan SPI, maupun dari sisi *software* seperti kesalahan logika *firmware* atau *query database* yang tidak sesuai. Setelah perbaikan dilakukan, sistem kembali diuji hingga seluruh fungsi dapat berjalan secara fungsional.

f. Pembuatan naskah publikasi

Laporan berisi latar belakang penelitian, landasan teori, metode penelitian, perancangan sistem mekanik dan elektronik, implementasi *hardware* dan *firmware*, pengembangan sistem *web* berbasis PHP dan MySQL, hasil pengujian, analisis hasil, serta kesimpulan dan saran. Laporan ini disusun sebagai bentuk pertanggungjawaban ilmiah atas penelitian yang telah dilakukan dan sebagai referensi untuk pengembangan sistem *smart locker* pada penelitian selanjutnya.

2.1. Skema Blok Penelitian *Smart locker*

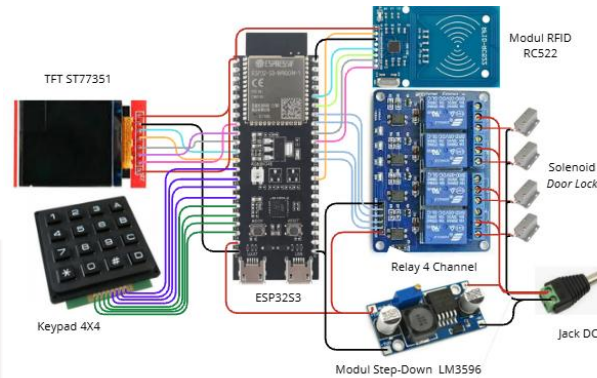


Gambar 2. Skema Blok Penelitian *Smart locker*

Sistem prototipe *smart locker* ini menggunakan mikrokontroler ESP32-S3 sebagai unit pemrosesan utama yang bekerja melalui tiga tahap, yaitu *input*, *proses*, dan *output*. Pada tahap *input*, pengguna memindai *QR code* menggunakan handphone untuk diarahkan ke halaman *web*, kemudian mengisi form data diri dan nomor handphone sebagai identitas verifikasi. OTP dikirim *server* melalui *web* dan dimasukkan secara fisik via *keypad* 4×4 yang juga berfungsi sebagai tombol navigasi. Seluruh komunikasi berjalan melalui koneksi WiFi, sementara RFID *reader* digunakan khusus untuk skenario pengambilan permanen. Pada tahap *proses*, ESP32-S3 berkomunikasi dua arah dengan *Server PHP* untuk verifikasi data dan akses *database*, serta mendapat suplai daya dari adaptor DC. Sistem memvalidasi OTP yang dimasukkan pengguna jika tidak *valid*, TFT menampilkan notifikasi kesalahan, jika *valid*, status loker berubah menjadi "Terpakai". Pengguna kemudian dapat memilih tiga skenario pengambilan, yaitu ambil sementara (A) yang membuka solenoid

via relay dan menutupnya kembali, ambil permanen (B) yang memerlukan verifikasi RFID dan OTP kedua, atau batal (C) untuk membatalkan proses. Pada tahap *output*, status *web* menampilkan kondisi loker secara daring sebagai "Terisi" atau "Kosong", TFT display menampilkan antarmuka status dan notifikasi pada perangkat, serta relay dan solenoid bekerja sebagai aktuator yang membuka atau mengunci pintu loker sesuai perintah ESP32-S3.

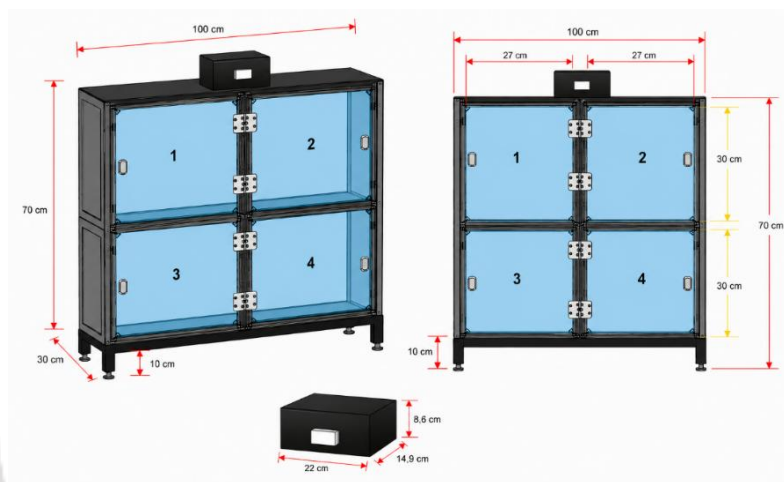
2.2.WIRING DIAGRAM



Gambar 3. *Wiring diagram.*

Pada Gambar 5 merupakan rancangan rangkaian *hardware Smart locker* berbasis ESP32S3 yang menunjukkan sebuah sistem kendali terintegrasi untuk mengatur penguncian dan antarmuka pengguna dalam satu rangkaian. Pusat kendali menggunakan ESP32S3 yang berfungsi sebagai mikrokontroler utama dengan kemampuan WiFi bawaan untuk komunikasi dengan *server web* secara nirkabel. ESP32S3 terhubung ke seluruh modul peripheral melalui antarmuka SPI, GPIO, dan jalur digital. Untuk antarmuka tampilan, digunakan layar TFT ST7735 berukuran 1,8 inci yang terhubung ke ESP32S3 melalui jalur *Software SPI* menggunakan lima pin yaitu MOSI, SCLK, CS, DC, dan RST. Layar ini berfungsi menampilkan status sistem, menu navigasi, dan informasi loker secara *real-time*. *Input* pengguna dilakukan melalui *Keypad 4x4* yang terhubung menggunakan delapan jalur GPIO, terdiri dari empat pin baris dan empat pin kolom, digunakan untuk memasukkan kode OTP. Pembacaan kartu identitas pengguna dilakukan oleh Modul RFID RC522 yang terhubung ke ESP32S3 melalui jalur *Hardware SPI* menggunakan pin SCK, MOSI, MISO, SS, dan RST. Modul ini berfungsi sebagai autentikasi fisik sebelum proses pengambilan barang secara sementara maupun permanen. Sistem penguncian menggunakan empat buah Solenoid *Door lock* yang dikendalikan melalui Modul Relay 4

Channel. Relay menerima sinyal kendali dari empat pin GPIO ESP32S3 (IN1–IN4) dan bekerja secara aktif *LOW*. Sumber daya untuk relay dan solenoid berasal dari Modul *Step-Down* LM2596 yang menurunkan tegangan dari adaptor DC 12V menjadi tegangan kerja yang sesuai. Tegangan masukan diperoleh dari Jack DC yang terpasang pada sisi kanan rangkaian. Secara keseluruhan, rangkaian ini menunjukkan integrasi antara kontrol akses berbasis RFID dan OTP, antarmuka pengguna melalui layar TFT dan *keypad*, serta komunikasi nirkabel melalui WiFi ESP32S3, sehingga sangat cocok untuk aplikasi penyimpanan barang otomatis yang membutuhkan keamanan dan kemudahan akses terpusat.



Gambar 4. *Hardware Smart locker*

Desain fisik *smart locker* dapat dilihat pada Gambar 4. Loker memiliki dimensi keseluruhan dengan lebar 100 cm, tinggi 70 cm, dan dilengkapi kaki penyangga setinggi 30 cm dengan jarak antar kaki 10 cm. Loker terdiri dari empat kompartemen berukuran masing-masing 27 cm × 30 cm yang tersusun dalam konfigurasi 2×2, yaitu Loker 1 dan Loker 2 di baris atas, serta Loker 3 dan Loker 4 di baris bawah. Setiap pintu kompartemen menggunakan material transparan berwarna biru yang memungkinkan pengguna melihat isi loker dari luar, serta dilengkapi mekanisme pengunci pada bagian tengah antarpintu. Di bagian atas loker terpasang sebuah kotak kontrol yang menjadi pusat kendali sistem. Kotak kontrol ini memiliki dimensi 22 cm × 14,9 cm × 8,6 cm dan di dalamnya terdapat mikrokontroler ESP32 sebagai otak dari keseluruhan sistem, modul relay untuk mengontrol solenoid *door lock* pada setiap kompartemen, serta komponen pendukung lainnya. Selain itu, pada bagian tengah loker dipasang *keypad* 4×4 dan layar TFT sebagai antarmuka interaksi langsung antara pengguna dan

sistem, serta modul RFID untuk keperluan verifikasi pada skenario pengambilan barang secara permanen.

2.3. Perancangan Software

Pengembangan *software* pada penelitian ini dibagi menjadi tiga bagian utama, yaitu program ESP32S3 menggunakan Arduino IDE, program *web server* berbasis Node.js, dan antarmuka *web* berbasis HTML, CSS, serta JavaScript. Ketiga bagian ini saling terintegrasi dan bekerja bersama melalui koneksi *Wi-Fi* dan *database* MySQL sebagai penghubung antara *software* dan *hardware*.

2.3.1. Program ESP32S3

ESP32S3 diprogram menggunakan Arduino IDE sebagai pengendali utama pada sisi *hardware*. Tugas utama program ini adalah menghubungkan ESP32S3 ke jaringan *Wi-Fi* dan mempertahankan koneksinya dengan *web server* agar perangkat selalu dalam kondisi siap menerima perintah kapanpun dibutuhkan. Saat ada perintah masuk dari *server*, ESP32S3 akan membaca nilai yang dikirimkan dan menentukan apakah solenoid *door lock* pada masing-masing loker harus diaktifkan atau dinonaktifkan berdasarkan nilai tersebut. Dalam sistem ini digunakan empat pin *output* yang masing-masing difungsikan untuk mengontrol relay solenoid pada Loker 1, Loker 2, Loker 3, dan Loker 4 secara *independent*. Di samping fungsi kendali relay, program pada ESP32S3 juga mengatur pembacaan *input* dari *keypad* 4×4 untuk menerima masukan nomor HP dan kode OTP dari pengguna, pembacaan modul RFID untuk memverifikasi UID kartu pada skenario pengambilan permanen, serta menampilkan status terkini sistem pada layar TFT yang terpasang pada loker sehingga pengguna dapat langsung melihat kondisi loker tanpa harus membuka halaman *web*.

2.3.2. Program Web Server

Program *web server* dikembangkan untuk menangani seluruh logika sistem dari sisi *server*, termasuk manajemen data pengguna, pengiriman OTP, dan komunikasi dengan ESP32S3. Pemilihan arsitektur berbasis *web server* didasarkan pada kemudahan aksesnya melalui berbagai perangkat tanpa memerlukan instalasi aplikasi tambahan. Terdapat beberapa komponen utama yang digunakan dalam program ini, masing-masing memiliki peran yang berbeda dalam menjalankan sistem secara keseluruhan. Komponen pertama adalah modul pengiriman OTP yang bertugas membangkitkan kode verifikasi secara acak kemudian ditampilkan melalui *web* pengguna. Sebelum mengirim

OTP, *server* terlebih dahulu memvalidasi data diri yang dimasukkan pengguna melalui *web* dan mencocokkannya dengan data yang tersimpan di *database* agar hanya pengguna terdaftar yang dapat mengakses loker. Kode OTP yang dibangkitkan kemudian disimpan sementara di *database* dengan batas waktu kedaluwarsa tertentu sehingga sistem tetap aman meskipun OTP tidak segera digunakan. Untuk mengelola status loker secara *real-time*, *server* menggunakan *database* MySQL yang menyimpan informasi kondisi setiap loker, data pengguna yang sedang menggunakan loker, serta riwayat aktivitas akses. Proses pengiriman perintah buka atau tutup ke *hardware* dilakukan melalui komunikasi serial antara *server* dan ESP32S3, di mana *server* mengirimkan instruksi berdasarkan hasil validasi OTP dan RFID yang diterima dari pengguna. Selain fungsi utama tersebut, program *web server* juga dilengkapi dengan fitur pencatatan waktu akses yang bekerja secara otomatis setiap kali loker dibuka maupun ditutup. Pencatatan dilakukan dengan menyimpan timestamp beserta identitas pengguna dan nomor loker yang diakses ke dalam *database*, sehingga seluruh riwayat penggunaan loker dapat dipantau melalui halaman *web* oleh pengelola sistem kapanpun dibutuhkan.

2.3.3. Antarmuka Web

Selain program ESP32S3, sistem *smart locker* ini juga dilengkapi dengan antarmuka *web* sebagai media interaksi utama antara pengguna dan sistem yang dapat diakses melalui *smartphone* maupun *laptop*. Antarmuka *web* ini dikembangkan menggunakan tiga file terpisah yaitu *index.html* sebagai kerangka struktur halaman, *style.css* untuk mengatur tampilan visual, dan *app.js* sebagai tempat seluruh logika program dijalankan. Pemisahan ketiga file ini dilakukan agar kode lebih terorganisir dan mudah diperbaiki jika sewaktu-waktu ada perubahan yang perlu dilakukan pada salah satu bagiannya saja. Untuk mengakses sistem, pengguna cukup melakukan scan *QR code* yang tertempel pada loker menggunakan *smartphone*, yang kemudian akan mengarahkan langsung ke halaman *web* tanpa perlu mengetikkan alamat URL secara manual. Pada halaman *web* tersebut, pengguna mengisi form data diri termasuk nomor HP yang akan digunakan sebagai identitas penggunaan loker. Setelah form terisi, *server* akan mengirimkan kode OTP enam digit pada tampilan *web* pengguna. Kode OTP tersebut selanjutnya dimasukkan melalui *keypad* 4×4 yang terpasang pada loker untuk divalidasi oleh ESP32S3 sebelum solenoid

door lock dibuka. Antarmuka *web* juga menampilkan status ketersediaan setiap loker secara *real-time*, sehingga pengguna dapat mengetahui loker mana yang sedang kosong atau sedang digunakan sebelum melakukan pemesanan. Pada skenario pengambilan barang secara permanen, halaman *web* menampilkan OTP permanen yang harus dimasukkan pengguna melalui *keypad* sebagai lapisan verifikasi tambahan setelah tap kartu RFID berhasil divalidasi oleh sistem. Setiap kali perintah dijalankan, baik pemesanan loker, pengiriman OTP, maupun konfirmasi pengambilan barang, sistem akan langsung memperbarui status pada halaman *web* secara otomatis. Seluruh riwayat aktivitas penggunaan loker juga tersimpan dalam *database* dan dapat dipantau melalui halaman *web* oleh pengelola sistem, lengkap dengan informasi waktu akses, identitas pengguna, nomor loker yang digunakan, serta jenis skenario pengambilan yang dipilih.

2.4. Perintah yang Didukung Sistem

Sistem *smart locker* ini dirancang untuk dapat menangani tiga skenario utama dalam proses penyimpanan dan pengambilan barang, yaitu skenario simpan barang, ambil sementara, dan ambil permanen. Semua interaksi dengan sistem menggunakan kombinasi antara antarmuka *web*, *keypad* 4×4, dan kartu RFID yang disesuaikan dengan kebutuhan masing-masing skenario.

Tabel 1. Perintah yang didukung

No.	Perintah	Fungsi
1.	<i>Scan QR code</i> , isi form data diri di <i>web</i> , terima OTP pada tampilan <i>web</i> , <i>input</i> OTP melalui <i>keypad</i> saat TFT menampilkan notifikasi loker dipesan	Solenoid loker terbuka selama 60 detik, TFT menampilkan <i>countdown</i> , loker tertutup otomatis atau saat tekan D
2.	Tekan * pada <i>keypad</i> , pilih A (Ambil Sementara), tap kartu RFID	Sistem memverifikasi UID ke <i>server</i> , solenoid loker terbuka selama 40 detik, TFT menampilkan <i>countdown</i> , loker tertutup otomatis atau saat tekan D
3.	Tekan * pada <i>keypad</i> , pilih B (Ambil Permanen), masukkan No HP di <i>web</i> untuk permintaan OTP, sistem <i>polling</i> konfirmasi loker dari <i>server</i> , tap kartu RFID, <i>input</i> OTP melalui <i>keypad</i>	Sistem memverifikasi RFID dan OTP ke <i>server</i> , solenoid loker terbuka selama 60 detik, TFT menampilkan <i>countdown</i> , loker tertutup otomatis atau saat tekan D
4.	Tekan D setelah loker terbuka	Solenoid menutup sebelum <i>countdown</i> habis, sistem kembali ke tampilan <i>idle</i>
5.	Tekan C pada menu mana pun	Proses dibatalkan, sistem kembali ke tampilan <i>idle</i> tanpa membuka loker
6.	Tekan # untuk konfirmasi <i>keypad</i>	untuk konfirmasi input OTP Sistem memvalidasi OTP yang diinputkan via <i>keypad</i> dan melanjutkan ke proses berikutnya

Selain skenario utama di Tabel 1, sistem juga menangani kondisi-kondisi khusus yang dapat terjadi selama proses berlangsung. Berbeda dengan skenario normal yang mengaktifkan relay solenoid, kondisi-kondisi ini langsung diproses oleh ESP32 untuk kemudian ditampilkan pada layar TFT tanpa membuka loker.

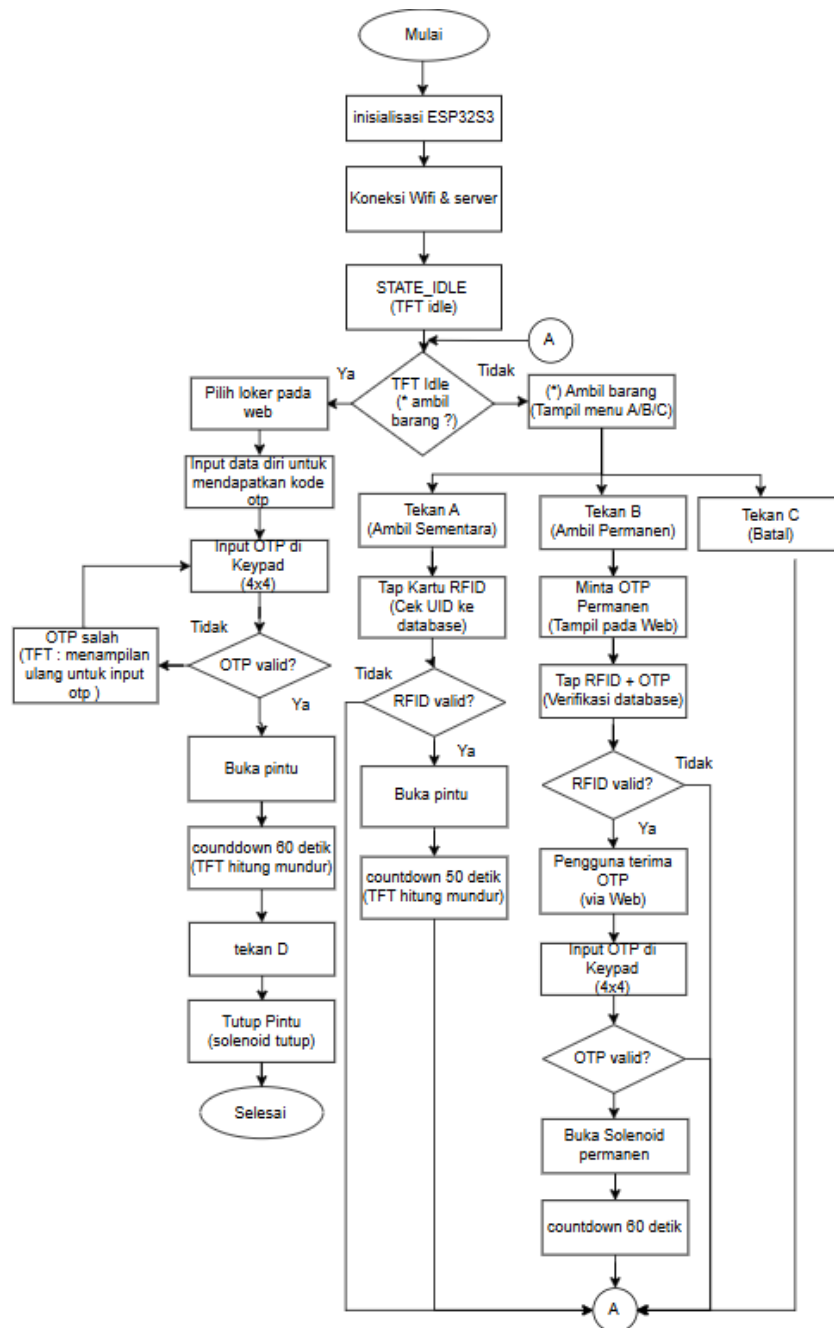
Tabel 2. Kondisi dan respons sistem

No.	Kondisi	Respon Sistem
1.	OTP yang dimasukkan salah	TFT menampilkan pesan <i>error</i> , sistem meminta <i>input</i> ulang
2.	RFID tidak dikenal atau tidak sesuai	TFT menampilkan pesan <i>error</i> , proses dibatalkan dan sistem akan kembali ke <i>idle</i>
3.	Loker terbuka melebihi batas waktu	Solenoid tertutup otomatis, status <i>web</i> diperbarui
4.	Koneksi <i>Wi-Fi</i> terputus	ESP32 melakukan <i>reconnect</i> otomatis setiap 5 detik secara <i>non-blocking</i> tanpa mengganggu proses yang sedang berjalan
5.	Server tidak merespons	HTTP <i>timeout</i> 2000ms, sistem kembali ke kondisi sebelumnya

Cara sistem memproses setiap aksi di atas adalah dengan menggunakan mesin state atau *state machine* yang membagi seluruh kondisi sistem ke dalam beberapa state, yaitu STATE_IDLE, STATE_SIMPAN_OTP, STATE_AMBIL_SEMENTARA_RFID, STATE_AMBIL_PERMANEN_RFID, STATE_AMBIL_PERMANEN_OTP, STATE_TERBUKA_SIMPAN, STATE_TERBUKA_SEMENTARA, STATE_TERBUKA_PERMANEN, dan STATE_ERROR. Prinsip kerjanya adalah sistem selalu berada pada salah satu state dan hanya akan berpindah ke *state* berikutnya apabila kondisi yang disyaratkan terpenuhi, misalnya ketika OTP yang dimasukkan pengguna melalui *keypad* cocok dengan data yang tersimpan di *server* maka sistem akan berpindah dari STATE_SIMPAN_OTP ke STATE_TERBUKA_SIMPAN dan relay solenoid loker yang bersangkutan akan langsung diaktifkan.

2.5. Perancangan sistem kerja

Cara kerja sistem dimulai ketika ESP32S3 melakukan inisialisasi dan koneksi ke jaringan WiFi serta *server*, kemudian masuk ke kondisi STATE_IDLE di mana layar TFT menampilkan tampilan *standby* sambil menunggu *input* dari pengguna. Pengguna dapat berinteraksi melalui dua jalur *input*.



Gambar 6. Cara Kerja

Jalur pertama adalah pengguna mengscan *QR code* dan mengisi data diri untuk memulai proses penitipan barang, sedangkan jalur kedua adalah menekan tombol bintang (*) untuk masuk ke menu pengambilan barang dengan tiga pilihan: Tekan A (ambil sementara), Tekan B (ambil permanen), dan Tekan C (batal). Pada alur penitipan barang, sistem meminta pengguna memasukkan kode OTP melalui *keypad* 4x4. Jika OTP tidak *valid*, sistem meminta pengguna mengulang *input*. Jika *valid*, solenoid membuka pintu dan sistem menjalankan *countdown* 60 detik. Selama *countdown* berlangsung, pengguna dapat menekan tombol D untuk

menutup pintu secara manual tanpa menunggu *timer* habis dan proses selesai. Pada alur pengambilan barang, tindakan ditentukan berdasarkan pilihan menu. Tekan A hanya memverifikasi kartu RFID ke *database*, dan jika *valid* pintu terbuka dengan *countdown* 50 detik sebelum sistem kembali *idle*. Tekan B diawali dengan sistem mengirimkan kode OTP permanen ke halaman *web* pengguna, kemudian pengguna menempelkan kartu RFID sekaligus memasukkan OTP untuk diverifikasi ke *database*. Jika verifikasi gagal, sistem meminta pengguna mengulang proses. Jika berhasil, solenoid membuka pintu dengan *countdown* 60 detik sebelum sistem kembali ke STATE_IDLE. Tekan C langsung membatalkan proses dan mengembalikan sistem ke kondisi *idle*.

2.6. Metode pengujian

Setelah sistem selesai dibuat, dilakukan serangkaian pengujian menggunakan *prototipe smart locker* yang sudah dirakit untuk mengetahui sejauh mana sistem dapat bekerja dengan baik. Tingkat keberhasilan setiap pengujian dihitung menggunakan Persamaan 1.

$$\text{Persentase Keberhasilan} = \frac{\text{Jumlah Percobaan Berhasil}}{\text{Total Percobaan}} \times 100\% \quad (1)$$

Pengujian pertama adalah pengujian koneksi *Wi-Fi* dan *server* untuk memastikan ESP32S3 dapat terhubung dengan stabil sebagai syarat utama agar seluruh fungsi sistem berjalan. Pengujian kedua adalah pengujian *input* OTP melalui *keypad* 4x4 pada alur penitipan barang, dengan memasukkan OTP benar maupun salah sebanyak 10 kali untuk memverifikasi keandalan sistem dalam memvalidasi kode. Pengujian ketiga adalah pengujian pembacaan kartu RFID untuk memastikan modul dapat memverifikasi UID ke *database* dengan benar, baik pada skenario ambil sementara (Tekan A) maupun ambil permanen (Tekan B), sekaligus menguji antarmuka *web* dalam menampilkan OTP permanen dan proses verifikasi dua tahap pada alur Tekan B. Pengujian keempat adalah pengujian *countdown timer* untuk memverifikasi ketepatan waktu mundur pada layar TFT, yaitu 60 detik untuk penitipan dan ambil permanen serta 50 detik untuk ambil sementara, termasuk memastikan solenoid menutup otomatis setelah waktu habis. Pengujian kelima adalah pengujian fungsi batal (Tekan C) untuk memastikan sistem dapat membatalkan proses dan kembali ke kondisi *idle* tanpa mengaktifkan perangkat keras apapun. Pengujian keenam adalah pengujian fungsi tutup pintu (Tekan D)

untuk memastikan solenoid dapat mengunci pintu loker secara manual tanpa menunggu *countdown timer* habis. Pengujian ketujuh sekaligus terakhir adalah pengujian waktu respons, yang mengukur *delay* dari *input* diberikan hingga solenoid aktif pada seluruh skenario sebagai bahan evaluasi kelayakan sistem dalam penggunaan nyata.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. HASIL PENGUJIAN *HARDWARE*

Sebelum pengujian sistem secara keseluruhan dilakukan, terlebih dahulu dilakukan pengujian pada masing-masing komponen perangkat keras untuk memastikan semuanya dapat bekerja dengan baik. Dari hasil pengujian tersebut ditunjukkan pada Tabel 2, seluruh komponen yang terpasang dalam wadah alat menunjukkan kondisi yang normal dan tidak ditemukan kendala apapun selama pengujian berlangsung.

Tabel 2. Hasil Pengujian *Hardware*

No.	Komponene	Status	Keterangan
1.	Mikrokontroler ESP32S3	Normal	Terhubung ke jaringan dan <i>server</i> dengan stabil
2.	Keypad 4x4	Normal	Mampu menerima <i>input</i> OTP dan navigasi menu dengan benar
3.	Modul RFID RC522	Normal	Mampu membaca dan memverifikasi UID kartu ke <i>database</i> dengan benar
4.	Solenoid <i>Door lock</i>	Normal	Mampu membuka dan mengunci pintu loker sesuai perintah sistem
5.	Layar TFT	Normal	Menampilkan tampilan <i>idle</i> , <i>countdown timer</i> , dan status sistem secara <i>real-time</i>
6.	Relay	Normal	Mampu mengaktifkan dan menonaktifkan solenoid sesuai kondisi yang ditentukan
7.	Stepdown LM2596	Normal	Tegangan <i>output</i> stabil dan tidak ada gangguan daya selama pengujian

3.2. Hasil Pengujian Sistem *Smart locker* Berbasis ESP32-S3

Pengujian sistem *Smart locker* dilakukan pada 4 loker dengan masing-masing 5 kali percobaan, sehingga total keseluruhan percobaan berjumlah 20 kali untuk setiap proses pengujian. Pengujian dilakukan melalui dua media yaitu antarmuka *web* dan

perangkat fisik berupa RFID, *keypad* 4×4, dan layar TFT. Hasil pengujian sistem melalui antarmuka *web* ditunjukkan pada Tabel 4, sedangkan hasil pengujian sistem melalui perangkat fisik ditunjukkan pada Tabel 5. Rumus rata-rata hasil pengujian dapat dilihat pada Persamaan 1.

Tabel 3: Pengujian Sistem *Smart locker* via *Web*

No.	Proses	Berhasil	Gagal	% Keberhasilan
1.	Scan <i>QR code</i> hingga halaman <i>web</i> terbuka	20	0	100 %
2.	Pilih menu titip barang di <i>web</i>	20	0	100 %
3.	Pilih loker di <i>web</i>	20	0	100%
4.	<i>Input</i> data diri	20	0	100 %
5.	Status loker tampil di <i>web</i>	20	0	100 %
6.	OTP berhasil <i>dedelay</i> dan tampil di <i>web</i> (simpan)	18	2	90 %
7.	Pilih menu ambil barang	20	0	100 %
8	<i>Input</i> nomor HP untuk cari titipan	20	0	100%
9.	OTP berhasil <i>didelay</i> dan tampil di <i>web</i> (ambil)	19	1	95%
Total		177	3	98,33%

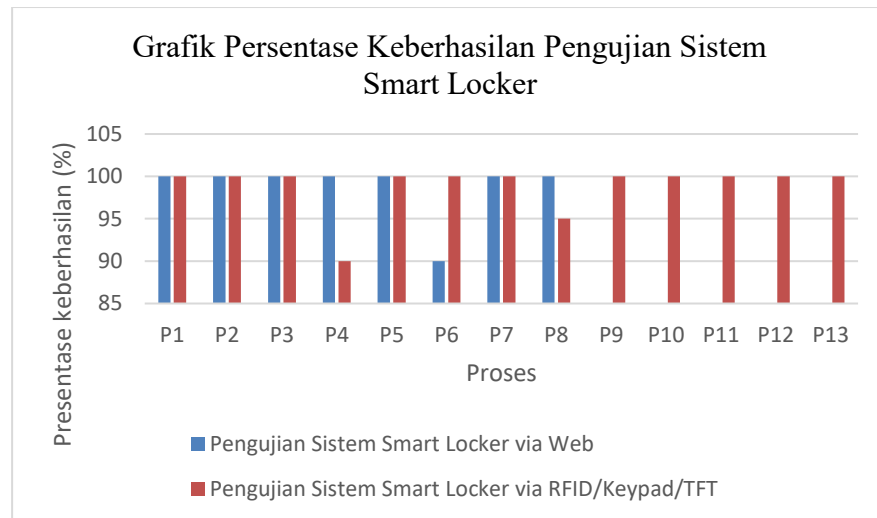
Contoh penggunaan Persamaan 1 pada Tabel 4:

$$\text{Persentase Keberhasilan} = \frac{\text{Berhasil}}{\text{pengujian}} \times 100\% = \frac{177}{180} \times 100\% = 98,33\%$$

Berdasarkan data pada Tabel 3 dan Tabel 4, pengujian sistem *Smart locker* dilakukan sebanyak 20 kali percobaan untuk setiap proses. Pada Tabel 3, pengujian melalui antarmuka *web* menunjukkan tingkat keberhasilan 98,33 % pada seluruh 9 proses dengan total 177 percobaan berhasil dan 3 kegagalan. Pada Tabel 4, pengujian melalui perangkat fisik RFID, *keypad*, dan layar TFT menunjukkan keberhasilan 98,85% dari total 260 percobaan dengan 257 berhasil dan 3 gagal.

Tabel 4. Pengujian Sistem *Smart locker* via RFID/Keypad/TFT

No	Loker	Berhasil	Gagal	% Keberhasilan
1.	Scan <i>QR code</i> hingga halaman <i>web</i> terbuka	20	0	100 %
2.	Tampilan menu loker muncul di layar TFT	22	0	100 %
3.	<i>Input</i> OTP via <i>keypad</i> untuk simpan barang	20	0	100 %
4.	OTP benar dan konfirmasi tampil di layar TFT	18	2	90%
5.	Loker terbuka setelah OTP simpan benar	20	0	100 %
6.	Loker tertutup dan status tersimpan	20	0	100 %
7.	Tap RFID untuk verifikasi ambil barang sementara	20	0	100 %
8.	Tap RFID untuk verifikasi ambil barang sementara	20	0	100 %
9.	<i>Input</i> OTP via <i>keypad</i> untuk ambil barang permanen	19	1	95 %
10.	OTP benar dan konfirmasi tampil di layar TFT	20	0	100 %
11.	Loker terbuka setelah OTP ambil benar	20	0	100 %
12.	Loker <i>reset</i> ke status KOSONG setelah ambil	20	0	100 %
13.	Tekan D hingga loker tertutup kembali	20	0	100%
Total		257	3	98,85 %



Gambar 7. Persentase Keberhasilan Pengujian Sistem *Smart Locker*

Kegagalan terjadi pada proses OTP benar dan OTP berhasil *dedelay* dan tampil di *web* (simpan) masing-masing 2 kali kegagalan dari 20 percobaan. Kegagalan ketika proses *Input* OTP via *keypad* untuk ambil barang permanen/ambi masing-masing 1 kali, tersebut kemungkinan disebabkan oleh sinyal *Wi-Fi* dan tekanan tombol *keypad* yang kurang tepat saat percobaan berlangsung. Secara keseluruhan, sistem *Smart locker* berbasis ESP32-S3 menunjukkan performa yang baik dengan keberhasilan 98,33%% via *web* dan 98,85% via perangkat fisik, membuktikan sistem mampu menjalankan seluruh fungsi utama secara andal dan konsisten.

3.3. Hasil Pengujian Keseluruhan Fungsional Sistem *Smart locker*

Pengujian keseluruhan fungsional sistem *Smart locker* dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam menjalankan seluruh proses simpan dan ambil barang secara menyeluruh, mulai dari scan *QR code*, *input* OTP via *keypad*, verifikasi RFID, hingga tampilan konfirmasi di layar TFT. Setiap skenario diuji sebanyak 5 kali percobaan pada 4 loker, sehingga total keseluruhan percobaan berjumlah 20 kali untuk setiap tabel pengujian. Rumus rata-rata hasil pengujian dapat dilihat pada Persamaan 4.

Contoh penggunaan Persamaan 1 pada Tabel 5 :

$$\text{Persentase Keberhasilan} = \frac{\text{Berhasil}}{\text{pengujian}} \times 100\% = \frac{239}{240} \times 100\% = 99,58\%$$

Tabel 5. Pengujian Keberhasilan Proses Simpan Barang

No	Proses	Berhasil	Gagal	% Keberhasilan
1.	Scan <i>QR code</i> hingga halaman <i>web</i> terbuka	20	0	100 %
2.	Pilih menu titip barang di <i>web</i>	20	0	100 %
3.	Pilih loker di <i>web</i>	20	0	100 %
4	<i>Input</i> data diri	20	0	100%
5.	Status loker tampil di <i>web</i>	20	0	100%
6.	OTP berhasil <i>didelay</i> dan tampil di <i>web</i>	20	0	100%
7.	<i>Input</i> OTP via <i>keypad</i> untuk simpan barang	20	0	100%
8.	OTP benar dan konfirmasi tampil di layar TFT	18	2	90%
9.	Loker terbuka setelah OTP simpan benar	20	0	100%
10.	Loker tertutup dan status tersimpan	20	0	100%
11.	Status loker tampil di <i>web</i>	20	0	100%
12.	Tekan D hingga loker tertutup kembali	20	0	100%
Total		238	2	99,17%

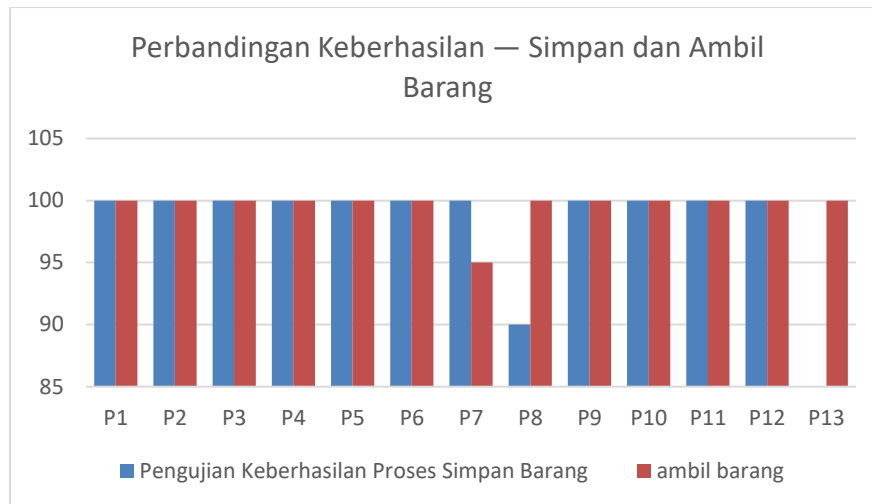
Contoh penggunaan persamaan 1 pada Tabel 5:

$$\text{Persentase Keberhasilan} = \frac{\text{Berhasil}}{\text{pengujian}} \times 100\% = \frac{238}{240} \times 100\% = 99,17\%$$

Pengujian proses ambil barang dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam menjalankan seluruh alur pengambilan barang, mulai dari scan QR code, input nomor HP, verifikasi OTP, hingga konfirmasi pembukaan loker di layar TFT. Setiap skenario diuji sebanyak 5 kali percobaan pada 4 loker, sehingga total keseluruhan percobaan berjumlah 20 kali untuk setiap tahapan pengujian. Hasil selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 5 dan Gambar 6 berikut.

Tabel 6. Pengujian Keberhasilan Proses Ambil Barang

No.	Loker	Berhasil	Gagal	% Keberhasilan
1.	Scan <i>QR code</i> hingga halaman <i>web</i> terbuka	20	0	100 %
2.	Pilih menu ambil barang di <i>web</i>	20	0	100 %
3.	Tampilan menu loker muncul di layar TFT	20	0	100 %
4.	<i>Input</i> nomor HP untuk cari titipan	20	0	100 %
5.	OTP berhasil <i>delay</i> dan tampil di <i>web</i>	20	0	100 %
6.	Tap RFID untuk verifikasi ambil barang sementara	20	0	100 %
7.	Tap RFID untuk verifikasi ambil barang permanen	19	1	95%
8.	<i>Input</i> OTP via <i>keypad</i> untuk ambil barang permanen	20	0	100%
9.	OTP benar dan konfirmasi tampil di layar TFT	20	0	100%
10.	Loker terbuka setelah OTP ambil benar	20	0	100%
11.	Loker <i>reset</i> ke status KOSONG setelah ambil	20	0	100%
12.	Loker terbuka setelah RFID benar	20	0	100%
13.	Tekan D hingga loker tertutup kembali	20	0	100%
Total		259	1	99,61%



Gambar 8. Perbandingan Keberhasilan Proses Simpan dan Ambil Barang

Pengujian fungsional sistem *smart locker* dilakukan sebanyak 20 kali percobaan untuk setiap proses. Pada pengujian proses simpan barang yang terdiri dari 12 proses dengan total 240 percobaan, sebagian besar proses berhasil 100% namun terdapat satu kegagalan pada proses konfirmasi OTP di layar TFT yang kemungkinan disebabkan oleh sinyal *Wi-Fi* yang kurang stabil saat melakukan konfirmasi input OTP, sehingga tingkat keberhasilan keseluruhan mencapai 99,17%. Pada pengujian proses ambil barang yang terdiri dari 13 proses dengan total 260 percobaan, terdapat satu kegagalan pada proses verifikasi RFID permanen yang kemungkinan disebabkan oleh posisi tap kartu yang kurang tepat terhadap *reader* atau adanya interferensi sinyal sehingga UID kartu tidak terbaca dengan sempurna oleh modul RC522, sehingga tingkat keberhasilan keseluruhan mencapai 99,61%. Secara keseluruhan, hasil pengujian membuktikan bahwa sistem mampu menjalankan seluruh fungsi utama secara andal, konsisten, dan dapat diandalkan dalam kondisi pengujian nyata.

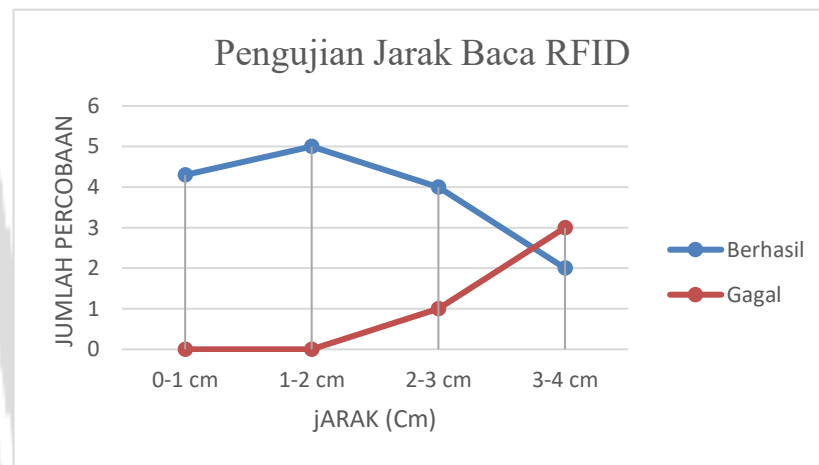
3.4. Hasil Pengujian Pengujian Jarak Baca RFID

Pengujian jarak baca RFID dilakukan untuk mengetahui seberapa besar pengaruh jarak tap kartu terhadap kemampuan sistem dalam membaca UID kartu secara akurat. Hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 8.

$$\text{Persentase Keberhasilan} = \frac{\text{Berhasil}}{\text{pengujian}} \times 100\% = \frac{16}{20} \times 100\% = 80\%$$

Tabel 8. Pengujian Jarak Baca RFID

No.	Jarak (cm)	Berhasil	Gagal	% Keberhasilan
1.	0-1 cm	5	0	100%
2.	1-2 cm	5	0	100%
3.	2-3 cm	4	1	80%
4.	3-4 cm	2	3	40%
Total		16	4	80%



Gambar 9. Pengujian Jarak Baca RFID

Berdasarkan Tabel 8, modul RFID RC522 mampu membaca UID kartu dengan tingkat keberhasilan 100% pada jarak 0-2 cm. Pada jarak 2-3 cm keberhasilan menurun menjadi 80% dan pada jarak 3-4 cm hanya mencapai 40%. Hal ini menunjukkan bahwa jarak optimal pembacaan kartu RFID adalah 0 - 2 cm, dan semakin jauh jarak tap kartu maka semakin besar kemungkinan kegagalan pembacaan UID oleh modul RFID RC522.

3.5. Hasil Pengujian *Delay Waktu Respon* Sistem

Pengujian waktu respon dilakukan untuk mengukur berapa lama waktu yang dibutuhkan sistem dari setiap proses hingga sistem selesai merespons. Hasil pengujian *delay* ditunjukkan pada Tabel 9.

Contoh penggunaan Persamaan 2 pada Tabel 9 :

$$\bar{D} = \frac{\sum_{i=1}^n D_i}{n} \quad (2)$$

$$\text{Perintah 1 } \bar{D} = \frac{D1+D2+\dots+Dn}{n} = \frac{2,1+2,3+2,0+2,2+2,1+2,3+2,0+2,2+2,1+2,2}{10} = \frac{21,5}{10} = 2,15$$

Tabel 9. Pengujian *Delay* Waktu Respon Proses Simpan Barang

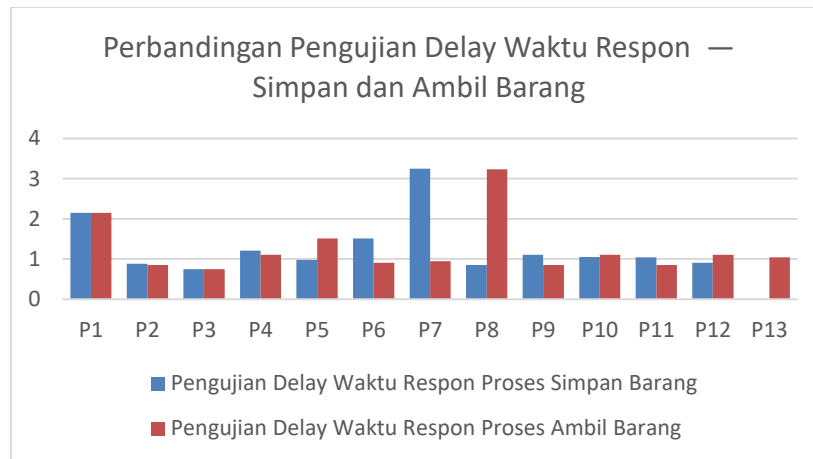
No.	Proses	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	Rata-rata
1.	Scan <i>QR code</i> hingga halaman <i>web</i> terbuka	2,1	2,3	2,0	2,2	2,1	2,3	2,0	2,2	2,1	2,2	2,15
2.	Pilih menu titip barang di <i>web</i>	0,8	0,9	0,8	1,0	0,9	0,8	0,9	1,0	0,8	0,9	0,88
3.	Pilih loker di <i>web</i>	0,7	0,8	0,7	0,8	0,7	0,8	0,7	0,8	0,7	0,8	0,75
4.	<i>Input</i> data diri	1,2	1,3	1,1	1,2	1,3	1,2	1,1	1,3	1,2	1,2	1,21
5.	Status loker tampil di <i>web</i>	0,9	1,0	0,9	1,1	1,0	0,9	1,0	1,1	0,9	1,0	0,98
6.	OTP berhasil di <i>delay</i> dan tampil di <i>web</i>	1,5	1,6	1,4	1,5	1,6	1,5	1,4	1,6	1,5	1,5	1,51
7.	<i>Input</i> OTP via <i>keypad</i> untuk simpan barang	3,2	3,4	3,1	3,3	3,2	3,4	3,1	3,3	3,2	3,3	3,25
8.	OTP benar dan konfirmasi tampil di layar TFT	0,8	0,9	0,8	0,9	0,8	0,9	0,8	0,9	0,8	0,9	0,85
9.	Loker terbuka setelah OTP simpan benar	1,1	1,2	1,0	1,1	1,2	1,1	1,0	1,2	1,1	1,1	1,11
10.	Loker tertutup dan status tersimpan	1,0	1,1	1,0	1,1	1,0	1,1	1,0	1,1	1,0	1,1	1,05
11.	Status loker tampil di <i>web</i>	0,9	1,0	0,8	0,9	1,0	0,9	0,8	1,0	0,9	0,9	1,04
12.	Tekan D hingga loker tertutup kembali	1,0	1,1	1,0	1,0	1,1	1,0	1,0	1,1	1,0	1,1	0,91

Contoh penggunaan Persamaan 2 pada Tabel 10 :

$$\text{Perintah 1 } \bar{D} = \frac{D1+D2+\dots+Dn}{n} = \frac{2,1+2,3+2,0+2,2+2,1+2,3+2,0+2,2+2,1+2,2}{10} = \frac{21,5}{10} = 2,15$$

Tabel 10. Pengujian *Delay* Waktu Respon Proses Ambil Barang

No.	Proses	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	Rata-rata
1.	Scan <i>QR code</i> hingga halaman <i>web</i> terbuka	2,1	2,3	2,0	2,2	2,1	2,3	2,0	2,2	2,1	2,2	2,15
2.	Pilih menu ambil barang di <i>web</i>	0,8	0,9	0,8	0,9	0,8	0,9	0,8	0,9	0,8	0,9	0,85
3.	Tampilan menu loker muncul di layar TFT	0,7	0,8	0,7	0,8	0,7	0,8	0,7	0,8	0,7	0,8	0,75
4.	<i>Input</i> nomor HP untuk cari titipan	1,2	1,3	1,0	1,1	1,2	1,1	1,0	1,2	1,1	1,1	1,11
5.	OTP berhasil <i>didelay</i> dan tampil di <i>web</i>	1,5	1,6	1,4	1,5	1,6	1,5	1,4	1,6	1,5	1,5	1,51
6.	Tap RFID untuk verifikasi ambil barang sementara	0,9	1,0	0,8	0,9	1,0	0,9	0,8	1,0	0,9	0,9	0,91
7.	Tap RFID untuk verifikasi ambil barang permanen	0,9	1,0	0,9	1,0	0,9	1,0	0,9	1,0	0,9	1,0	0,95
8.	<i>Input</i> OTP via <i>keypad</i> untuk ambil barang permanen	3,1	3,3	3,2	3,4	3,1	3,3	3,2	3,4	3,1	3,2	3,23
9.	OTP benar dan konfirmasi tampil di layar TFT	0,8	0,9	0,8	0,9	0,8	0,9	0,8	0,9	0,8	0,9	0,85
10.	Loker terbuka setelah OTP ambil benar	1,1	1,2	1,0	1,1	1,2	1,1	1,0	1,2	1,1	1,1	1,11
11.	Loker <i>reset</i> ke status KOSONG setelah ambil	0,8	0,9	0,8	0,9	0,8	0,9	0,8	0,9	0,8	0,9	0,85
12.	Loker terbuka setelah RFID benar	1,1	1,2	1,0	1,1	1,2	1,1	1,0	1,2	1,1	1,1	1,11
13.	Tekan D hingga loker tertutup kembali	1,0	1,1	1,0	1,0	1,1	1,0	1,0	1,1	1,0	1,1	1,04



Gambar 9. Perbandingan Pengujian *Delay Waktu Respon* Sistem – Simpan dan Ambil Barang

Berdasarkan hasil pengujian *delay waktu respon* pada Tabel 9 dan Tabel 10, seluruh proses simpan maupun ambil barang berhasil berjalan dengan baik. Pada proses simpan barang, nilai rata-rata *delay* tertinggi terjadi pada proses "*Input OTP via keypad untuk simpan barang*" sebesar 3,25 detik karena pengguna perlu memasukkan kode OTP secara manual melalui *keypad* fisik, sedangkan *delay* terendah terjadi pada proses "*Pilih loker di web*" sebesar 0,75 detik. Pada proses ambil barang, *delay* tertinggi juga terjadi pada proses "*Input OTP via keypad untuk ambil barang permanen*" sebesar 3,23 detik, sementara *delay* terendah terjadi pada proses "*Tampilan menu loker muncul di layar TFT*" sebesar 0,75 detik. Jika dibandingkan, proses ambil barang memiliki tahapan lebih banyak karena melibatkan verifikasi RFID sementara, RFID permanen, dan OTP sehingga total waktu keseluruhan lebih panjang dibanding proses simpan barang. Meskipun demikian, perbedaan *delay* antar proses pada kedua tabel tidak terlalu signifikan dan sistem mampu merespons setiap tahapan dengan stabil dan konsisten.

3.6. Hasil Pengujian Variasi Proses Simpan dan Ambil Barang

Pengujian variasi proses dilakukan untuk melihat sejauh mana sistem masih bisa menjalankan fungsinya ketika pengguna melakukan *input* dengan kondisi yang berbeda-beda, seperti *input* data tidak lengkap, OTP salah, kartu RFID tidak terdaftar, maupun loker yang tidak tersedia. Hasil pengujian variasi proses simpan barang ditunjukkan pada Tabel 10 dan variasi proses ambil barang ditunjukkan pada

Tabel 11. Tabel Keterbatasan Sistem Saat Ambil Titip Barang

No.	Proses	Kondisi <i>Input</i>	Status	Keterangan
1.	Scan <i>QR code</i> hingga halaman <i>web</i> terbuka	<i>QR code valid</i> / tidak <i>valid</i>	Berhasil / gagal	Halaman web terbuka jika <i>valid</i> , tidak terbuka jika tidak <i>valid</i>
2.	Pilih menu titip barang di <i>web</i>	<i>Menu</i> tersedia	Berhasil	<i>Menu</i> titip barang tampil
3.	Pilih loker di <i>web</i>	Loker tersedia (kosong) / (terisi)	Berhasil / gagal	Loker dipilih jika kosong; tidak bisa dipilih jika terisi
4.	<i>Input</i> data diri	Data lengkap dan <i>valid</i>	Berhasil	Data tersimpan
5.	Status loker tampil dan OTP tampil di <i>web</i>	Koneksi stabil	Berhasil	Status loker tampil di <i>web</i>
6.	<i>Input</i> OTP via <i>keypad</i> untuk simpan barang	OTP benar / salah	Berhasil / gagal	Status loker dan OTP tampil di web
7.	OTP benar dan konfirmasi tampil di layar TFT	OTP <i>valid</i>	Berhasil	Konfirmasi tampil di TFT
8.	Loker terbuka setelah OTP simpan benar	OTP benar	Berhasil	Solenoid membuka loker
9.	Barang disimpan, tekan D, loker tertutup & status terbaru	Tekan D, koneksi stabil	Berhasil	Loker tertutup, status loker terbaru di web

Pada Tabel 11, dari 15 proses pengujian asli, terdapat 6 proses yang digabungkan ke dalam proses utama yang relevan karena merupakan respons otomatis sistem, bukan kondisi uji yang berdiri sendiri. Proses-proses dengan dua kondisi berlawanan seperti scan QR code *valid* dan tidak *valid* , pemilihan loker kosong dan terisi, serta input OTP benar dan salah disatukan dalam satu baris karena menguji proses yang sama dengan input berbeda. Selain itu, proses yang terjadi secara otomatis dan berurutan dalam satu aksi, seperti konfirmasi OTP di layar TFT, penutupan loker, dan pembaruan status di *web*, juga digabung menjadi satu entri.

Tabel 12. Tabel Keterbatasan Sistem Saat Ambil Titip Barang

No.	Proses	Kondisi <i>Input</i>	Status	Keterangan
1.	Scan <i>QR code</i> hingga halaman <i>web</i> terbuka	<i>QR code valid</i> / tidak <i>valid</i>	Berhasil / gagal	Halaman web terbuka jika <i>valid</i> ; tidak terbuka jika tidak <i>valid</i>
2.	Pilih menu ambil barang di web & tampilan loker muncul di TFT	Menu tersedia, system aktif	Berhasil	Menu ambil barang tampil di web dan layar TFT menampilkan <i>idle</i>
3.	<i>Input</i> nomor HP untuk cari data titipan	No. Hp terdaftar / tidak terdaftar	Berhasil / gagal	Data titipan ditemukan jika terdaftar; tidak ditemukan jika tidak
4.	OTP dikirim dan tampil di <i>web</i>	Koneksi stabil	Berhasil	OTP tampil di <i>web</i>
5.	Tap RFID untuk verifikasi ambil barang sementara	Kartu terdaftar / tidak terdaftar	Berhasil / gagal	Verifikasi berhasil jika terdaftar; kembali ke menu jika tidak
6.	Tap RFID untuk verifikasi ambil barang permanen	Kartu terdaftar / tidak terdaftar	Berhasil / gagal	Verifikasi berhasil jika terdaftar; kembali ke menu jika tidak
7.	<i>Input</i> OTP via <i>keypad</i> untuk ambil barang permanen	OTP benar / salah	Berhasil / gagal	Konfirmasi tampil di TFT jika benar; sistem menolak jika salah
8.	Loker terbuka, barang diambil, tekan D & status loker <i>reset</i>	Barang diambil, tekan D	Berhasil / gagal	Solenoid membuka loker, status reset ke KOSONG, loker tertutup

Pada Tabel 12, dari 18 proses pengujian asli terdapat 10 proses yang digabungkan karena merupakan respon otomatis sistem atau menguji proses yang sama dengan kondisi *input* berbeda. Penggabungan mencakup proses yang terjadi dalam satu siklus bersamaan, *output* langsung dari proses sebelumnya, alur yang berjalan berurutan secara otomatis, serta kondisi berhasil dan gagal dari satu proses yang disatukan dalam satu baris. Hal ini dilakukan agar tabel lebih ringkas, terstruktur, dan mudah dibaca tanpa mengurangi kelengkapan maupun cakupan hasil pengujian secara keseluruhan.

Proses yang berhasil pada pengujian simpan barang adalah kondisi di mana semua *input* sesuai ketentuan sistem, seperti *QR code valid* , loker dalam keadaan kosong, data diri lengkap, OTP benar, dan konfirmasi tampil di layar TFT. Kondisi yang

gagal terjadi ketika QR code tidak *valid* , loker dalam keadaan terisi, dan OTP yang diinputkan via keypad tidak sesuai dengan OTP yang dikirim sistem, sehingga sistem menolak input dan kembali ke menu awal secara otomatis. Pada pengujian proses ambil barang, kondisi yang berhasil terjadi ketika QR code *valid* , nomor HP terdaftar di database, kartu RFID terdaftar, dan OTP yang diinputkan sesuai dengan OTP yang tampil di *web*. Kondisi yang gagal terjadi ketika *QR code* tidak *valid* , nomor HP tidak terdaftar, kartu RFID tidak dikenali sistem, dan OTP yang diinputkan tidak sesuai, sehingga sistem menolak dan kembali ke *menu* awal. Hal ini membuktikan bahwa sistem mampu menangani berbagai kondisi *input* dengan baik.

3.7. Analisis Keterbatasan Sistem

Tabel 13. Keterbatasan Sistem

No.	Keterbatasan	damapak	Sarana Pengembangan
1.	Bergantung penuh pada koneksi <i>internet</i>	Sistem tidak dapat berfungsi saat <i>offline</i>	Tambahkan <i>mode offline</i> dengan penyimpanan data lokal pada ESP32-S3
2.	Jarak baca RFID terbatas (0-2 cm)	Pengguna harus menempelkan kartu sangat dekat ke <i>reader</i>	kartu sangat dekat ke <i>reader</i> Ganti modul RFID RC522 dengan modul RFID
3.	OTP dikirim melalui <i>web</i> saja	Pengguna harus membuka <i>web</i> untuk melihat OTP	Tambahkan fitur pengiriman OTP via SMS atau <i>WhatsApp</i>
4.	Tidak ada notifikasi <i>real-time</i> ke pengguna	Pengguna tidak mengetahui status loker secara langsung	Tambahkan fitur notifikasi <i>push notification</i> atau SMS

Keterbatasan pertama adalah ketergantungan sistem terhadap koneksi internet. Seluruh proses mulai dari scan *QR code*, *input* data diri, *delay* OTP, hingga pembaruan status loker bergantung sepenuhnya pada koneksi internet aktif. Akibatnya ketika koneksi terputus, sistem tidak dapat berfungsi sama sekali meskipun perangkat keras dalam kondisi normal. Keterbatasan kedua adalah jarak baca modul RFID RC522 yang terbatas. Berdasarkan Tabel 12 modul RFID hanya mampu membaca kartu secara optimal pada jarak 0-2 cm dengan keberhasilan 100%, menurun menjadi 80% pada jarak 2-3 cm, dan hanya 40% pada jarak 3-4 cm. Hal ini menyebabkan pengguna harus menempelkan kartu sangat dekat ke *reader* agar verifikasi berjalan dengan baik.

Keterbatasan ketiga adalah OTP yang hanya dapat diakses melalui antarmuka *web*. Pengguna harus membuka halaman *web* untuk melihat OTP sebelum menginputkannya via *keypad*, yang dapat menyulitkan pengguna yang tidak membawa *smartphone*. Ke depannya dapat dikembangkan dengan menambahkan fitur pengiriman OTP melalui SMS atau *WhatsApp*. Keterbatasan keempat adalah tidak adanya notifikasi *real-time* terkait status loker. Sistem hanya menampilkan status di halaman *web* tanpa pemberitahuan aktif kepada pengguna. Ke depannya fitur *push notification* atau SMS dapat ditambahkan agar pengguna dapat mengetahui status loker secara langsung.

4. PENUTUP

4.1. Kesimpulan

Sistem *Smart Locker* berbasis ESP32-S3 berhasil dibangun dan berfungsi sesuai tujuan penelitian. Sistem mampu menjalankan dua fungsi utama secara bersamaan, yaitu proses simpan barang dan ambil barang, dengan memanfaatkan antarmuka *web*, *keypad* 4×4, modul RFID RC522, dan layar TFT sebagai media interaksi pengguna. Seluruh komponen perangkat keras terbukti berfungsi tanpa kendala selama pengujian, sementara antarmuka *web* dapat diakses via *smartphone* melalui scan QR code. Hasil pengujian menunjukkan performa yang sangat baik, di mana pengujian via *web* mencapai keberhasilan 98,33% dari 160 percobaan, pengujian via perangkat fisik mencapai 98,85% dari 240 percobaan, serta tingkat keberhasilan fungsional proses simpan barang sebesar 99,17% dan ambil barang sebesar 99,61%. Jarak baca RFID bekerja optimal pada rentang 0–2 cm dan mulai menurun pada jarak lebih dari 2 cm. Secara keseluruhan, sistem terbukti mampu menjalankan seluruh fungsi utama secara andal dan konsisten dalam kondisi pengujian nyata.

4.2. Saran

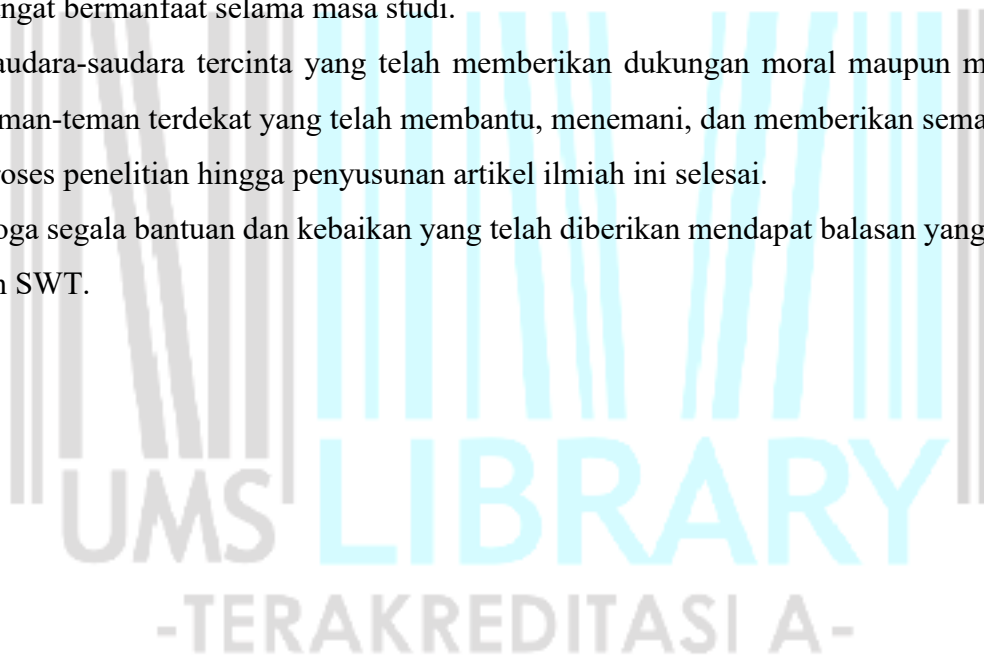
Mengacu pada keterbatasan yang ditemukan, terdapat beberapa saran untuk pengembangan ke depan. Pertama, perlu ditambahkan mode *offline* dengan penyimpanan data lokal agar sistem tetap berfungsi saat koneksi internet terputus. Kedua, modul RFID RC522 dapat diganti dengan jenis berjangkauan lebih jauh. Ketiga, fitur pengiriman OTP melalui SMS atau *WhatsApp* perlu ditambahkan agar pengguna dapat menerima OTP tanpa membuka halaman *web*. Keempat, fitur *push notification* perlu dikembangkan untuk memberikan informasi status loker secara *real-time*. Kelima, kapasitas loker yang saat ini hanya 4 unit perlu diperluas disertai pengembangan sistem manajemen *database* agar dapat melayani lebih banyak pengguna secara bersamaan.

PERSANTUNAN

Alhamdulillahirabbil'alamin, segala puji dan syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT atas limpahan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulisan artikel ilmiah ini dapat terselesaikan dengan baik. Penulis menyampaikan terima kasih kepada berbagai pihak yang telah memberikan dukungan selama proses penyusunan penelitian ini, di antaranya:

1. Orang tua dan keluarga tercinta yang senantiasa memberikan doa, dukungan, dan semangat dalam menyelesaikan penelitian ini.
2. Ibu Umi Fadlilah, S.T., M.Eng, Ph.D selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan dan bimbingan selama proses penelitian dan penyusunan artikel ilmiah.
3. Segenap civitas akademika Program Studi Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Surakarta yang telah mendidik dan membekali penulis dengan ilmu pengetahuan yang sangat bermanfaat selama masa studi.
4. Saudara-saudara tercinta yang telah memberikan dukungan moral maupun material serta teman-teman terdekat yang telah membantu, menemani, dan memberikan semangat selama proses penelitian hingga penyusunan artikel ilmiah ini selesai.

Semoga segala bantuan dan kebaikan yang telah diberikan mendapat balasan yang terbaik dari Allah SWT.



DAFTAR PUSTAKA

- Adedoyin, M., & Olukoya, F. (n.d.). Development of a Smart Lock System using *QR code* Technology. *ABUAD Journal of Engineering Research and Development*. <https://doi.org/10.53982/ajerj>
- Alfonsius, E., Ruitan, A. S., & Liuw, D. (2024). Pengembangan Sistem Keamanan Pintu Menggunakan Metode Prototype Berbasis RFID dan *Keypad* 4x4 dengan Arduino Nano. *Jurnal Ilmiah Informatika Dan Ilmu Komputer (JIMA-ILKOM)*, 3(2), 110–123. <https://doi.org/10.58602/jima-ilkom.v3i2.33>
- Alzhvani, A. A., Balfaqih, M., Alsenani, F., Alharthi, M., Alshehri, A., & Balfagih, Z. (2024). Design and Implementation of an IoT-Integrated *Smart locker* System utilizing Facial Recognition Technology. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 14(4), 16000–16010. <https://doi.org/10.48084/etasr.7737>
- Ananda, F. E., Haurameuthia, S., Widhiantoro, D., & Tejasumirat, M. I. (2023). Perancangan *Smart locker* dengan Implementasi Sistem IoT dan Aplikasi Mobile Android. *Electrician : Jurnal Rekayasa Dan Teknologi Elektro*, 17(1), 92–99. <https://doi.org/10.23960/elc.v17n1.2421>
- Aulia, D., Ridhwan Sufandi, M., Teknologi Rekayasa Sistem Elektronika, P., Teknik Elektro, J., Negeri Pontianak, P., Jenderal Ahmad Yani, J., Laut, B., Pontianak Tenggara, K., Pontianak, K., & Barat, K. (2025). RANCANG BANGUN AUTOMATIC *SMART LOCKER* BERBASIS ARDUINO MEGA2560. *Kohesi: Jurnal Sains Dan Teknologi*, (12). <https://doi.org/10.8734/Kohesi.v1i2.365>
- Bharatiraja, C., Bhargava, Y. V., & Chittoor, P. K. (2023). *Bharatiraja, C., Chittoor, P. K., & Bhargava, Y. V. (2023)*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1063/5.0101139>
- Iftitah Walinda Fujiarti, Satriyo, Muhammad Ridhwan Sufandi, Agus Riyanto, & Eko Mardianto. (2025). Rancang Bangun Automatic *Smart Locker* Dengan Sistem IOT Menggunakan *Database*. *Jurnal Informatika Dan Rekayasa Elektronik*, 8(2), 219–231. <https://doi.org/10.36595/jire.v8i2.1702>
- Permana, A. C., Pradana, A. I., & Hartanti, D. (2025). Smart Loker Berbasis IOT Dengan Autentifikasi *QR Code* Terintegrasi Dengan *Web*. *Jurnal Informatika Dan Teknik Elektro Terapan*, 13(3). <https://doi.org/10.23960/jitet.v13i3.6573>
- Rozaq, A., Irawan, D., & Surya, Y. A. (2023). Sistem Keamanan Rumah Menggunakan RFID dan *Keypad* Matrix Dengan One Time Pad Home Security Systems Using RFID and *Keypad* Matrix With One Time Pad. In *Hal* (Vol. 5, Number 1). <http://jurnalnasional.ump.ac.id/index.php/JRRE>
- Saputra, O., Khalil, F. I., & Widhiantari, I. A. (2024). Rancang Bangun Sistem Kontrol dan Monitoring Tekanan Gas Pada Biodigester Berbasis IoT: Analisis Waktu dan Stabilitas Koneksi ESP32 dan ESP32-S3 (Lilygo T Display S3). *JURNAL SAINS*

