

PERANCANGAN SISTEM *SMARTHOME* DENGAN KONSEP *IOT* BERBASIS *ESP32* DI PERUMAHAN CITRALAND MANADO**Marcelino Michel Fredrik Mamengko¹, Janne Deivy Ticoh², I Gede Budi Mahendra³**Universitas Negeri Manado¹²³e-mail: michelmamengko007@gmail.com

Diterima: 31/12/2025; Direvisi: 6/1/2026; Diterbitkan: 20/1/2026

ABSTRAK

Perkembangan teknologi Internet of Things (IoT) mendorong hadirnya sistem smarthome yang mampu meningkatkan keamanan, kenyamanan, dan efisiensi energi di lingkungan perumahan. Penelitian ini bertujuan merancang dan mengembangkan prototipe sistem smarthome berbasis mikrokontroler ESP32 yang diimplementasikan dalam konteks Perumahan Citraland Manado. Sistem ini mengintegrasikan berbagai sensor, seperti PIR untuk deteksi gerakan, DHT22 untuk pemantauan suhu dan kelembapan, serta MQ-2 untuk deteksi gas berbahaya, dengan aktuator seperti relay, solenoid lock, dan buzzer. Komunikasi data antara perangkat dan pengguna dilakukan melalui protokol MQTT dengan broker HiveMQ Cloud, sedangkan antarmuka pengguna dibangun sebagai Progressive Web App (PWA) berbasis web yang dapat diakses secara real-time dari perangkat mobile maupun desktop. Metode penelitian yang digunakan adalah Research and Development (R&D) dengan pendekatan pengembangan sistem secara iteratif. Hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh komponen berfungsi sesuai rancangan, komunikasi data berjalan stabil dengan latensi di bawah 1 detik, dan antarmuka PWA responsif serta mudah digunakan. Meski demikian, sistem masih memiliki keterbatasan dalam hal notifikasi push dan penyimpanan data jangka panjang. Secara keseluruhan, prototipe ini terbukti layak sebagai solusi smarthome yang terjangkau, mandiri, dan dapat dikembangkan lebih lanjut untuk implementasi skala nyata.

Kata Kunci: *Smarthome, ESP32, MQTT, Progressive Web App, Internet of Things***ABSTRACT**

The advancement of Internet of Things (IoT) technology has spurred the development of smart home systems that enhance security, comfort, and energy efficiency in residential environments. This study aims to design and develop a smart home prototype based on the ESP32 microcontroller, implemented within the context of Citraland Manado housing. The system integrates multiple sensors, including PIR for motion detection, DHT22 for temperature and humidity monitoring, and MQ-2 for hazardous gas detection, with actuators such as relays, solenoid locks, and buzzers. Data communication between devices and users is facilitated via the MQTT protocol using the HiveMQ Cloud broker, while the user interface is developed as a web-based Progressive Web App (PWA) accessible in real time from both mobile and desktop devices. The research employs a Research and Development (R&D) methodology with an iterative system development approach. Testing results demonstrate that all components function as designed, data communication remains stable with latency under one second, and the PWA interface is responsive and user-friendly. Nevertheless, the system still faces limitations regarding push notifications and long-term data storage. Overall, this prototype proves to be a viable, affordable, and self-reliant smart home solution with potential for further development and real-world implementation.

Keywords: *Smarthome, ESP32, MQTT, Progressive Web App, Internet of Things*

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi yang sangat pesat, khususnya di bidang *Internet of Things* (IoT), telah menjadi katalisator utama dalam mendorong transformasi konsep hunian dari yang semula bersifat konvensional menjadi sebuah ekosistem *smart home* yang cerdas dan terintegrasi. Transformasi digital ini menawarkan berbagai keunggulan signifikan, mulai dari peningkatan standar keamanan, kenyamanan penghuni, hingga efisiensi penggunaan energi yang lebih baik. Di tengah dinamika kehidupan modern, khususnya di lingkungan perumahan elit seperti Citraland Manado, urgensi terhadap implementasi teknologi ini semakin dirasakan. Para penghuni di kawasan perumahan modern kini tidak hanya membutuhkan tempat tinggal sebagai tempat berteduh, melainkan juga menuntut adanya sistem keamanan yang terintegrasi penuh, kemampuan otomatisasi pada berbagai perangkat rumah tangga, serta fitur pemantauan jarak jauh yang dapat diakses kapan saja. Fenomena ini menunjukkan adanya pergeseran paradigma kebutuhan masyarakat urban yang menginginkan kontrol penuh atas aset properti mereka, meskipun mereka sedang tidak berada di lokasi fisik rumah tersebut, guna memastikan ketenangan pikiran dalam menjalani aktivitas sehari-hari di luar rumah.

Meskipun kebutuhan akan teknologi cerdas semakin meningkat, realitas di lapangan menunjukkan bahwa sistem keamanan yang bersifat konvensional masih mendominasi sebagian besar hunian di Indonesia. Penggunaan perangkat keamanan tradisional seperti kunci mekanik standar atau sistem alarm manual sering kali menjadi satu-satunya pertahanan yang dimiliki oleh pemilik rumah. Sayangnya, sistem konvensional ini memiliki keterbatasan fundamental karena belum mampu memberikan respons secara *real-time* terhadap berbagai potensi ancaman yang dapat terjadi sewaktu-waktu. Ancaman fatal seperti kebocoran gas yang tidak terdeteksi dini, adanya pergerakan mencurigakan dari orang tak dikenal, atau gangguan instalasi listrik sering kali terlambat disadari oleh penghuni rumah, yang pada akhirnya dapat berujung pada kerugian materi maupun keselamatan jiwa (Nguyen & Tran, 2017; Fadhil & Yusuf, 2021). Keterlambatan informasi ini menjadi titik lemah utama sistem konvensional, di mana tindakan pencegahan atau penanggulangan tidak dapat dilakukan dengan segera karena absennya notifikasi instan kepada pemilik rumah saat insiden baru saja dimulai.

Sebagai respons terhadap kelemahan sistem konvensional, pasar teknologi sebenarnya telah menyediakan berbagai solusi *smart home* komersial yang siap pakai. Namun, adopsi teknologi ini sering kali terhambat oleh berbagai faktor teknis dan ekonomis yang memberatkan pengguna. Solusi *smart home* pabrikan yang tersedia di pasaran sering kali dibanderol dengan harga yang sangat mahal dan memiliki tingkat kompleksitas instalasi yang tinggi, sehingga sulit dijangkau oleh masyarakat awam. Selain itu, banyak dari sistem ini yang sangat bergantung pada *platform* pihak ketiga, seperti penggunaan aplikasi Blynk atau *server* proprietary lainnya. Ketergantungan ini tidak hanya membatasi fleksibilitas pengguna dalam memodifikasi sistem sesuai kebutuhan spesifik mereka, tetapi juga menimbulkan isu privasi dan kontrol data karena arsitektur sistem sepenuhnya dikendalikan oleh penyedia layanan eksternal (Sharma & Singh, 2018). Akibatnya, pengguna tidak memiliki kedaulatan penuh atas sistem keamanan rumah mereka sendiri dan harus terus bergantung pada keberlangsungan layanan dari pihak ketiga tersebut.

Di ranah akademis dan pengembangan purwarupa, berbagai penelitian sebelumnya telah berupaya memecahkan masalah ini, namun masih ditemukan berbagai kekurangan yang cukup mendasar. Mayoritas penelitian terdahulu umumnya hanya berfokus pada integrasi satu atau dua jenis sensor saja, sehingga sistem yang dihasilkan belum mampu memberikan perlindungan yang komprehensif dan menyeluruh bagi sebuah hunian. Selain itu, banyak solusi yang ditawarkan masih menggunakan antarmuka berbasis aplikasi *native* yang mengharuskan

pengguna melakukan proses instalasi khusus di perangkat *smartphone* mereka (Hassan et al., 2018; Jang et al., 2019). Keharusan mengunduh dan menginstal aplikasi tambahan ini sering kali dianggap tidak praktis, memakan ruang penyimpanan perangkat, dan menciptakan hambatan kompatibilitas antar sistem operasi yang berbeda (seperti Android dan iOS). Hal ini menunjukkan bahwa fokus pengembangan sebelumnya masih terpaku pada aspek fungsionalitas sensor secara parsial, belum menyentuh aspek kemudahan pengalaman pengguna atau *user experience* yang memadai untuk adopsi massal yang lebih luas dan mudah.

Kondisi-kondisi yang telah dipaparkan di atas menciptakan sebuah kesenjangan yang nyata atau *gap* antara apa yang diidealkan dengan apa yang terjadi secara nyata di lapangan. Di satu sisi, terdapat idealisasi mengenai sistem *smart home* yang canggih, terjangkau, mandiri, dan mudah diakses oleh berbagai lapisan masyarakat. Namun, di sisi lain, realitas implementasi, khususnya di kawasan perumahan kelas menengah di Indonesia, masih jauh dari harapan tersebut karena terkendala biaya dan kerumitan teknis. Diperlukan sebuah jembatan solusi yang mampu menyeimbangkan antara kecanggihan fitur dengan kemudahan aksesibilitas tanpa mengorbankan keandalan sistem keamanan itu sendiri. Tantangan utamanya adalah bagaimana menghadirkan teknologi yang selama ini dianggap mewah dan eksklusif menjadi sesuatu yang inklusif dan dapat diterapkan secara praktis dengan infrastruktur yang ada. Oleh karena itu, penelitian ini hadir untuk mengisi ruang kosong tersebut dengan menawarkan pendekatan yang lebih adaptif terhadap kondisi lokal dan kebutuhan spesifik masyarakat perumahan di Indonesia.

Untuk menjawab tantangan tersebut secara konkret, penelitian ini mengusung pendekatan inovatif dengan merancang sebuah prototipe *smart home* yang dibangun berbasis mikrokontroler ESP32. Sistem ini dirancang secara terpadu dengan mengintegrasikan empat sensor utama yang merepresentasikan kebutuhan keamanan vital, yaitu sensor PIR untuk deteksi gerakan penyusup, sensor DHT22 untuk pemantauan suhu dan kelembapan ruangan, sensor MQ-2 untuk deteksi dini kebocoran gas berbahaya, serta modul RFID RC522 untuk kontrol akses pintu otomatis. Keunggulan teknis dari sistem ini didukung oleh mekanisme komunikasi data yang handal antara perangkat keras dan pengguna melalui protokol MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*) dengan memanfaatkan *broker* HiveMQ Cloud. Penggunaan protokol ini menjamin pengiriman data yang ringan dan cepat meskipun dalam kondisi jaringan internet yang fluktuatif, sehingga notifikasi keamanan dapat diterima oleh pengguna dengan latensi yang sangat minim, memastikan respons yang lebih tanggap terhadap situasi darurat.

Nilai kebaruan dan inovasi utama dari penelitian ini tidak hanya terletak pada pemilihan perangkat kerasnya, melainkan pada integrasi sistem secara *end-to-end* yang bersifat mandiri. Inovasi ini terlihat jelas pada pengembangan antarmuka pengguna yang dibangun sebagai *Progressive Web App* (PWA). Teknologi PWA memungkinkan sistem kendali dan pemantauan rumah dapat diakses langsung melalui *browser* web standar tanpa perlu melakukan instalasi aplikasi tambahan apa pun, menjadikannya lintas *platform* dan sangat ringan. Pendekatan ini mencakup integrasi total mulai dari perangkat keras sensor, penggunaan protokol komunikasi ringan MQTT, hingga antarmuka *user-friendly* berbasis PWA, yang semuanya dirancang dalam konteks lokal perumahan di Indonesia. Strategi ini secara signifikan mengurangi ketergantungan pada *platform* eksternal berbayar, sekaligus meningkatkan aksesibilitas, skalabilitas sistem untuk pengembangan lebih lanjut, serta memperbesar potensi adopsi teknologi ini oleh masyarakat luas karena kemudahan penggunaan yang ditawarkannya.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menerapkan pendekatan *Research and Development* (R&D) yang mengadaptasi model pengembangan sistematis untuk menghasilkan produk teknologi terapan yang solutif. Prosedur pelaksanaan dibagi menjadi lima tahapan krusial yang saling berkesinambungan, dimulai dengan analisis kebutuhan mendalam melalui studi lapangan di lokasi studi kasus, yakni Perumahan Citraland Manado, guna memetakan masalah keamanan dan kenyamanan penghuni secara akurat. Tahap selanjutnya meliputi perancangan arsitektur sistem yang dituangkan dalam diagram blok, *flowchart*, dan skema rangkaian elektronik, yang kemudian dilanjutkan dengan pengembangan purwarupa perangkat keras dan lunak. Proses ini diteruskan dengan uji coba fungsional secara bertahap, mulai dari pengujian komponen individual hingga integrasi sistem secara menyeluruh, dan diakhiri dengan evaluasi performa untuk penyempurnaan akhir. Pendekatan iteratif ini dipilih untuk memastikan bahwa prototipe yang dihasilkan tidak hanya berfungsi secara teknis, tetapi juga relevan dengan kebutuhan kontekstual lingkungan perumahan sasaran.

Pengembangan sistem ini didukung oleh serangkaian perangkat keras dan lunak yang terintegrasi untuk membentuk ekosistem *smarthome* yang handal. Instrumen utama yang digunakan adalah mikrokontroler *ESP32* sebagai pusat pemrosesan data, yang dihubungkan dengan berbagai modul sensor presisi, meliputi sensor *PIR* untuk deteksi gerak, *DHT22* untuk pengukuran suhu dan kelembapan, serta *MQ-2* untuk mendeteksi kebocoran gas. Sistem keamanan fisik diperkuat dengan modul *RFID RC522*, *solenoid lock* 12V, dan *relay* 5V, sementara antarmuka visual lokal menggunakan layar *OLED* 0.96 inci. Untuk stabilitas daya, digunakan modul *step-down LM2596* dan adaptor 12V/5A. Dari sisi perangkat lunak, *firmware* dikembangkan menggunakan *Arduino IDE*, sedangkan antarmuka pengguna dibangun berbasis web menggunakan *HTML*, *JavaScript*, dan *Chart.js* untuk membentuk *Progressive Web App* (PWA). Komunikasi data antara perangkat keras dan antarmuka pengguna difasilitasi oleh protokol *MQTT* dengan bantuan *broker HiveMQ Cloud* untuk menjamin pertukaran data yang ringan dan cepat.

Teknik pengumpulan data dilakukan melalui serangkaian pengujian teknis, observasi langsung, dan dokumentasi visual terhadap kinerja prototipe dalam berbagai skenario. Validasi komponen dilakukan dengan membandingkan pembacaan sensor terhadap alat ukur standar, seperti kalibrasi sensor *DHT22* menggunakan termometer digital referensi dan pengujian respons sensor *MQ-2* menggunakan simulasi paparan gas amonia rumah tangga. Selain pengujian perangkat keras, stabilitas komunikasi data diuji dengan mengukur latensi pengiriman pesan melalui protokol *MQTT* serta responsivitas antarmuka *PWA* pada peramban *Chrome* di perangkat seluler. Data kualitatif yang diperoleh dari hasil uji coba fungsional dan wawancara semi-terstruktur dengan calon pengguna dianalisis menggunakan teknik analisis konten untuk mengidentifikasi aspek keandalan, efisiensi energi, dan kemudahan penggunaan. Keabsahan data penelitian ini dipastikan melalui triangulasi sumber data serta mekanisme pengujian ulang (*re-test*) pada komponen-komponen kritis sistem untuk menjamin konsistensi hasil.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

Penelitian ini berhasil merancang dan merealisasikan sebuah prototipe sistem *smarthome* yang canggih dengan menggunakan mikrokontroler *ESP32* sebagai otak pemrosesan utama. *ESP32* dipilih karena kemampuan dual-core dan konektivitas Wi-Fi bawaannya yang andal. Sistem ini mengintegrasikan empat sensor krusial untuk pemantauan

komprehensif: sensor PIR untuk keamanan melalui deteksi gerakan, DHT22 untuk pemantauan kondisi lingkungan (suhu dan kelembapan), MQ-2 untuk keselamatan dari kebocoran gas berbahaya, serta modul RFID RC522 sebagai mekanisme otentikasi akses pintu. Selain sensor, sistem dikendalikan oleh tiga aktuator utama, yaitu relay 5V, solenoid lock 12V, dan buzzer aktif 3.3V. Seluruh komponen elektronika ini dirakit secara presisi pada breadboard, dengan manajemen daya yang ditangani oleh modul step-down LM2596 untuk menstabilkan input catu daya 12V menjadi tegangan yang aman bagi komponen mikro. Teknik penyatuan ground (GND) diterapkan secara ketat untuk meminimalisir intervensi noise sinyal, sehingga menjamin stabilitas pembacaan data dan kinerja sistem secara keseluruhan.

Dalam aspek pemantauan lingkungan, sensor DHT22 menunjukkan kinerja yang sangat memuaskan dengan kemampuan membaca parameter suhu dan kelembapan udara secara presisi, memiliki tingkat akurasi masing-masing $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ dan $\pm 3\%$ RH. Mekanisme pengiriman data dirancang secara periodik, di mana ESP32 mengambil sampel data setiap 10 detik dan mentransmisikannya melalui protokol komunikasi ringan MQTT ke broker berbasis cloud, HiveMQ. Data yang diterima oleh broker kemudian diteruskan dan divisualisasikan secara real-time pada antarmuka pengguna berbasis Progressive Web App (PWA). Pada dashboard PWA tersebut, informasi tidak hanya ditampilkan dalam format numerik mentah yang informatif, tetapi juga direpresentasikan dalam bentuk grafik garis interaktif. Fitur visualisasi ini memungkinkan pengguna untuk memantau tren perubahan suhu dan kelembapan dari waktu ke waktu dengan mudah, memberikan wawasan yang jelas mengenai kenyamanan termal ruangan serta memastikan kondisi lingkungan rumah tetap terjaga dalam batas ideal.

Fokus utama pada keselamatan penghuni diwujudkan melalui implementasi sensor gas MQ-2, yang telah melalui serangkaian pengujian ketat menggunakan simulasi kebocoran gas nyata dari korek api serta paparan uap bahan pembersih rumah tangga yang mengandung amonia. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor mampu memberikan respons yang sangat cepat dan sensitif melalui pin digital output (DO) ketika konsentrasi gas melampaui ambang batas aman yang ditetapkan. Respons sistem dirancang bersifat ganda dan simultan untuk urgensi maksimal: secara lokal, sistem langsung mengaktifkan buzzer sebagai alarm peringatan dini bagi penghuni di dalam rumah. Secara bersamaan, sistem mengirimkan sinyal darurat ke server yang memicu notifikasi peringatan bertuliskan “GAS BERBAHAYA TERDETEKSI!” pada dashboard aplikasi PWA pengguna. Integrasi peringatan audio visual dan notifikasi jarak jauh ini memastikan tindakan pencegahan dapat segera diambil, meminimalisir risiko kebakaran atau keracunan gas yang fatal.

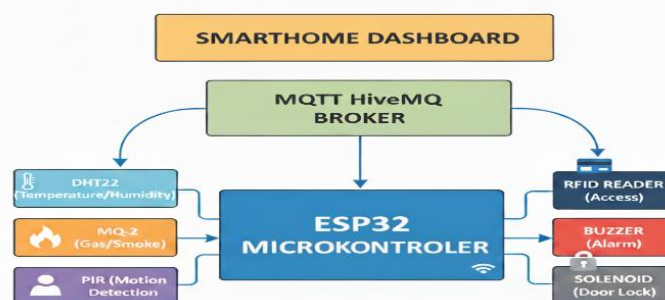
Sektor keamanan fisik diperkuat oleh sensor PIR (Passive Infrared) yang dikalibrasi untuk mendeteksi keberadaan dan pergerakan manusia dalam radius efektif hingga 5 meter. Sensor ini bekerja dengan memantau perubahan radiasi inframerah yang dipancarkan oleh tubuh manusia. Segera setelah gerakan mencurigakan terdeteksi, mikrokontroler ESP32 mengeksekusi serangkaian protokol keamanan otomatis. Pertama, sistem mengirimkan status “Gerakan Terdeteksi” ke topik MQTT yang relevan untuk pencatatan log aktivitas. Kedua, secara lokal, buzzer dinyalakan selama durasi 2 detik sebagai bentuk efek kejutan atau deteren bagi penyusup. Ketiga, antarmuka pada dashboard PWA diperbarui secara instan untuk memberitahu pemilik rumah mengenai adanya aktivitas di area yang dipantau. Respons yang cepat dan berlapis ini menjadikan sistem sangat efektif sebagai alat pengawasan rumah mandiri, memberikan rasa aman tambahan bagi penghuni baik saat berada di rumah maupun saat bepergian.

Mekanisme kontrol akses pintu otomatis diimplementasikan menggunakan teknologi RFID RC522 yang berfungsi sebagai verifikator identitas digital. Sistem diprogram untuk

membaca dan memvalidasi Unique Identifier (UID) dari kartu akses yang ditempelkan. Apabila kartu yang digunakan terdaftar dalam basis data sistem (valid), mikrokontroler akan memicu relay selama 3 detik, yang kemudian mengalirkan daya untuk menarik tuas solenoid lock 12V sehingga pintu terbuka. Sebagai umpan balik bagi pengguna, layar OLED lokal dan dashboard aplikasi PWA secara serentak menampilkan status “Pintu: TERBUKA”. Sebaliknya, jika kartu yang tidak terdaftar atau ilegal digunakan, sistem dirancang untuk mengabaikan input tersebut sepenuhnya tanpa memicu aktuator apa pun, menjaga pintu tetap terkunci rapat. Logika keamanan ini memastikan bahwa hanya individu dengan otorisasi yang sah yang dapat mengakses ruangan, mencegah upaya penyusupan melalui manipulasi kunci fisik konvensional.

Interaksi antara pengguna dan sistem smarthome difasilitasi oleh aplikasi berbasis Progressive Web App (PWA) yang dikembangkan dengan teknologi web modern meliputi HTML, JavaScript, dan pustaka visualisasi Chart.js. Aplikasi ini dirancang agar berjalan mulus dan responsif pada browser Google Chrome di perangkat Android. Dashboard aplikasi menyajikan fitur yang komprehensif, mulai dari pemantauan data sensor secara real-time, log riwayat aktivitas akses pintu, tombol kontrol manual untuk mematikan alarm PIR, hingga indikator status konektivitas ESP32 (Online/Offline). Salah satu keunggulan utama teknologi PWA ini adalah kemampuannya untuk diinstal langsung ke layar utama ponsel (Add to Home Screen) layaknya aplikasi native, serta dukungan fitur service worker yang memungkinkan aplikasi tetap dapat dibuka dan menampilkan antarmuka dasar (UI shell) meskipun perangkat pengguna sedang dalam kondisi offline atau tidak terhubung ke internet.

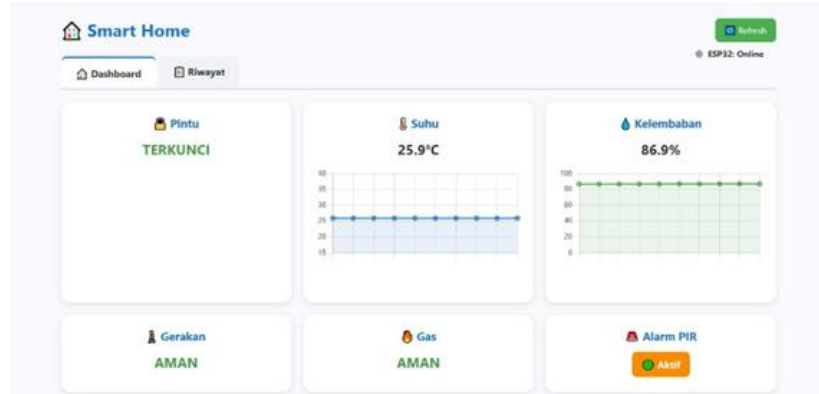
Tulang punggung komunikasi data antara perangkat keras ESP32 dan antarmuka dashboard dibangun di atas protokol MQTT over WebSocket Secure (wss://) yang terhubung ke infrastruktur cloud HiveMQ. Penggunaan protokol ini menjamin keamanan transmisi data melalui enkripsi, serta efisiensi bandwidth yang tinggi. Struktur topik MQTT diorganisir secara hierarkis dan logis, meliputi smarthome/sensor/data, smarthome/door/status, smarthome/pir/control, dan smarthome/status untuk memudahkan manajemen pesan. Berdasarkan hasil pengujian jaringan, sistem mencatatkan performa yang impresif dengan latensi rata-rata pengiriman data kurang dari 1 detik, serta tingkat keberhasilan proses publish-subscribe mencapai 100% tanpa adanya paket data yang hilang (packet loss). Selain itu, fitur Last Will & Testament (LWT) diimplementasikan dengan sukses, memungkinkan sistem backend untuk mendeteksi dan menginformasikan pengguna secara otomatis apabila perangkat ESP32 kehilangan daya atau terputus dari koneksi internet secara tiba-tiba.



Gambar 1. Diagram Sistem Smarthome Berbasis ESP32

Secara keseluruhan, seluruh komponen perangkat keras, firmware, dan antarmuka lunak berfungsi sesuai rancangan, dan integrasi sistem berjalan stabil selama pengujian berlangsung.

Gambar 1 ini menggambarkan arsitektur keseluruhan sistem smarthome yang dikembangkan, terdiri dari tiga lapisan utama: (1) perangkat keras berbasis ESP32 yang terhubung dengan sensor (DHT22, MQ-2, PIR) dan aktuator (RFID Reader, Buzzer, Solenoid Lock), (2) lapisan komunikasi menggunakan protokol MQTT dengan broker HiveMQ Cloud, dan (3) antarmuka pengguna berupa Smarthome Dashboard yang menerima data dan mengirim perintah kontrol secara real-time.



Gambar 2. Tampilan dashboard Progressive Web App (PWA) sistem Smarthome

Dashboard pada gambar 2 menampilkan status real-time dari seluruh sensor dan aktuator sistem, termasuk status pintu (TERKUNCI/TERBUKA), suhu (25.9°C), kelembapan (86.9%), deteksi gerakan (AMAN/TIDAK AMAN), deteksi gas (AMAN/TIDAK AMAN), serta status alarm PIR (Aktif/Nonaktif). Antarmuka dirancang responsif dan dapat diakses melalui browser, dengan indikator koneksi ESP32 (Online/Offline) dan tombol refresh untuk memperbarui data secara manual juga memungkinkan pengguna untuk memantau kondisi sistem secara interaktif dan responsif.

Pembahasan

Integrasi mikrokontroler ESP32 dengan empat jenis sensor: PIR, DHT22, MQ-2, dan RFID RC522, dalam satu prototipe smarthome menunjukkan kemampuan sistem untuk menjawab kebutuhan multifaset penghuni rumah modern, khususnya dalam aspek keamanan, kenyamanan, dan respons terhadap ancaman lingkungan. Temuan ini sejalan dengan penelitian Hassan et al. (2018), yang menyatakan bahwa ESP32 sangat cocok untuk sistem IoT berbiaya rendah karena arsitektur dual-core-nya serta dukungan bawaan terhadap Wi-Fi dan Bluetooth. Namun, berbeda dari studi sebelumnya yang umumnya fokus pada satu fungsi (misalnya hanya efisiensi energi atau hanya deteksi gerakan), penelitian ini berhasil mengintegrasikan empat dimensi fungsional utama dalam satu ekosistem terpadu: (1) keamanan fisik melalui kontrol akses RFID, (2) deteksi ancaman lingkungan (gas dan suhu), (3) otomatisasi berbasis keberadaan penghuni, dan (4) pemantauan jarak jauh melalui antarmuka web. Pendekatan holistik ini menjawab kesenjangan penelitian yang diidentifikasi oleh Fadhil & Yusuf (2021), yang menekankan pentingnya sistem smarthome yang tidak hanya efisien, tetapi juga relevan secara kontekstual di lingkungan perumahan menengah Indonesia.

Penggunaan protokol MQTT sebagai lapisan komunikasi terbukti efektif dalam mengatasi keterbatasan bandwidth dan stabilitas jaringan, sebagaimana ditegaskan oleh Hansen & Truong (2015). Latensi di bawah 1 detik dan tingkat keberhasilan publish-subscribe 100% menunjukkan bahwa MQTT, dengan model publish-subscribe dan overhead minimal, sangat sesuai untuk aplikasi smarthome berbasis ESP32 (Dzakie et al., 2022; Hijazi et al., 2020; Shah, 2024; Widodo et al., 2020). Fitur Last Will & Testament (LWT) yang diimplementasikan juga memberikan nilai tambah dalam hal keandalan, karena memungkinkan dashboard segera

mengetahui saat perangkat offline, suatu aspek yang jarang diperhatikan dalam studi serupa (Sharma & Singh, 2018). Hal ini menunjukkan bahwa sistem tidak hanya dirancang untuk berfungsi dalam kondisi ideal, tetapi juga mampu memberikan feedback yang informatif saat terjadi gangguan.

Antarmuka berbasis Progressive Web App (PWA) menjadi inovasi utama yang membedakan penelitian ini dari pendekatan konvensional yang mengandalkan platform pihak ketiga seperti Blynk. Sebagaimana dijelaskan oleh Rahman & Ahmad (2022), PWA menawarkan akses lintas platform tanpa instalasi, dukungan offline, dan kemampuan add to home screen, semua fitur ini berhasil diwujudkan dalam prototipe ini. Namun, keterbatasan dalam notifikasi push memang menjadi kelemahan teknis, karena PWA memerlukan integrasi Service Worker dan layanan seperti Firebase Cloud Messaging (FCM) untuk mencapai fungsionalitas tersebut (Sembiring et al., 2022). Hal ini merefleksikan kompromi antara kemandirian arsitektur dan kenyamanan pengguna, suatu tantangan yang juga diakui dalam penelitian Rahmadani & Arief (2020). Dari sisi keamanan, sistem ini telah menerapkan autentikasi pada level MQTT dan enkripsi TLS, namun belum mencakup perlindungan end-to-end atau manajemen sesi pengguna yang ketat. Padahal, Liu et al. (2018) menekankan bahwa kerentanan data pengguna merupakan risiko utama dalam sistem smarthome. Oleh karena itu, meski prototipe ini aman untuk skala demonstrasi, implementasi nyata memerlukan peningkatan lapisan keamanan, seperti autentikasi dua faktor dan enkripsi data lokal, sebagaimana direkomendasikan pula oleh Priyono & Mahendra (2019).

Secara keseluruhan, sistem ini berhasil menjawab celah penelitian (research gap) yang diidentifikasi dalam integrasi multi-sensor, kemandirian arsitektur (tanpa Blynk), antarmuka berbasis web yang ringan, serta relevansi kontekstual di perumahan Citraland Manado. Dengan pendekatan Research and Development yang sistematis, prototipe ini tidak hanya valid secara teknis, tetapi juga memiliki potensi adopsi yang tinggi karena biaya rendah, modularitas, dan kemudahan penggunaan; sebagaimana ditegaskan oleh Fadhil & Yusuf (2021) sebagai faktor kunci keberhasilan teknologi smarthome di pasar menengah. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya memberikan kontribusi praktis dalam bentuk solusi teknis, tetapi juga memperkaya literatur akademik tentang penerapan IoT dalam konteks lokal Indonesia.

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang dan mengimplementasikan sistem smarthome mandiri berbasis mikrokontroler ESP32 yang terintegrasi secara penuh dengan protokol komunikasi MQTT dan antarmuka Progressive Web App untuk menjawab tantangan keamanan di Perumahan Citraland Manado. Berdasarkan hasil pengujian fungsional yang ekstensif, prototipe menunjukkan kinerja teknis yang sangat superior dengan stabilitas tinggi, di mana rata-rata latensi pengiriman data tercatat impresif di bawah 1 detik dan tingkat keberhasilan transmisi paket data publish-subscribe mencapai angka sempurna 100 persen tanpa packet loss. Akurasi pembacaan sensor terbukti presisi dengan sensor DHT22 yang mampu memantau suhu lingkungan dengan deviasi hanya $\pm 0,5$ derajat Celcius serta kelembapan ± 3 persen RH, sementara sensor PIR bekerja efektif mendeteksi intrusi dalam radius 5 meter yang secara otomatis memicu alarm buzzer selama 2 detik. Sistem keamanan akses fisik yang memanfaatkan RFID RC522 juga berfungsi optimal dengan mekanisme buka kunci solenoid selama 3 detik untuk kartu yang valid. Capaian data kuantitatif ini membuktikan bahwa arsitektur sistem yang dibangun mampu menghilangkan ketergantungan pada platform berbayar pihak ketiga, menghadirkan solusi pengawasan real-time yang efisien bandwidth, dan memiliki kecepatan respons taktis yang tinggi terhadap anomali lingkungan.

Penerapan antarmuka berbasis Progressive Web App menjadi nilai inovasi utama yang membedakan penelitian ini karena menawarkan aksesibilitas lintas platform yang fleksibel tanpa memerlukan instalasi aplikasi native yang membebani penyimpanan perangkat pengguna. Dashboard pemantauan yang memvisualisasikan data sensor dengan pembaruan setiap 10 detik terbukti sangat responsif dan mudah digunakan, memungkinkan penghuni untuk memantau status keamanan rumah secara transparan dari berbagai perangkat seluler maupun desktop. Meskipun sistem beroperasi dengan andal, evaluasi kritis menemukan adanya keterbatasan teknis seperti absennya notifikasi push instan dan belum adanya enkripsi end-to-end yang ketat, yang menjadi catatan penting untuk pengembangan fitur keamanan di masa depan. Namun demikian, penelitian ini menyimpulkan bahwa prototipe yang dihasilkan memiliki kelayakan tinggi untuk diadopsi sebagai produk komersial skala mikro karena biaya implementasi yang terjangkau dan sifat modularnya. Temuan ini memberikan kontribusi strategis berupa alternatif teknologi tepat guna yang tidak hanya meningkatkan standar keamanan hunian kelas menengah di Indonesia, tetapi juga mendukung efisiensi energi dan transformasi digital menuju konsep kota cerdas yang berkelanjutan dengan infrastruktur yang mandiri dan adaptif.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, S., Hafeez, A., & Zafar, A. (2019). Design and implementation of solenoid-based smart door locking system using IoT. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 8(6S3), 1–5. <https://www.ijeat.org/wp-content/uploads/papers/v8i6s3/F10300986S319.pdf>
- Dzakie, M. N., Bhawiyuga, A., & Basuki, A. (2022). Sistem Berbasis Private Blockchain sebagai Penyedia Layanan Autentikasi Publisher-Broker-Subscriber Pada Protokol Message Queue Telemetry Transport. *Jurnal Teknologi Informasi Dan Ilmu Komputer*, 9(4), 675. <https://doi.org/10.25126/jtiik.2022945752>
- Fadhil, M., & Yusuf, I. (2021). Evaluasi konsumsi energi pada sistem rumah pintar berbasis mikrokontroler ESP32. *Jurnal Teknologi Energi dan Lingkungan*, 8(2), 12–22. <https://jurnal.untan.ac.id/index.php/jtel/article/view/49876>
- Hansen, R., & Truong, K. (2015). MQTT protocol for constrained IoT devices: Performance and scalability analysis. *Proceedings of the 2nd International Conference on IoT in Urban Space*, 45–50. <https://doi.org/10.1145/2811782.2811797>
- Hassan, M. H., Aji, A. A., & Yang, L. (2018). Low-cost smart home design based on ESP32 microcontroller for energy monitoring and control. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 9(6), 210–216. <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2018.090628>
- Hijazi, G., Habaebi, M. H., Al-Haddad, A., & Zyoud, A. (2020). Stress Testing MQTT Server for Private IOT Networks. *International Journal of Electronics and Telecommunications*, 229. <https://doi.org/10.24425/ijet.2021.135969>
- Jang, S., Kim, D., & Lee, H. (2019). Energy management using smart home sensors for efficient consumption. *Sustainable Cities and Society*, 48, 101563. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101563>
- Liu, Y., Wang, L., & Chen, H. (2018). Privacy protection and security framework for smart home IoT systems. *IEEE Internet of Things Journal*, 5(6), 4734–4742. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2868612>
- Nguyen, H. T., & Tran, V. H. (2017). Smart home automation system based on IoT for security and energy efficiency. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 12(4), 1301–1309. <https://doi.org/10.5370/JEET.2017.12.4.1301>



- Priyono, J., & Mahendra, R. (2019). *Panduan mikrokontroler ESP32: Aplikasi pada Internet of Things (IoT)*. Andi Offset. <https://books.google.co.id/books?id=PriyonoESP32>
- Rahmadani, I., & Arief, T. (2020). Penerapan solenoid lock pada sistem keamanan rumah berbasis ESP32. *Jurnal Ilmiah Rekayasa Elektronika*, 6(1), 15–22.
- Rahman, M. M., & Ahmad, M. (2022). Smart home automation using IoT: A comprehensive review. *Journal of Network and Computer Applications*, 198, 103289. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2021.103289>
- Sembiring, R. P., Ginting, G., & Siregar, D. (2022). Internet of Things untuk otomasi rumah: Studi implementasi berbasis ESP32 dan PWA. *Jurnal Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer*, 9(3), 601–610. <https://doi.org/10.25126/jtiik.202293567>
- Shah, P. H. (2024). MQTT Systems: A Survey. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 12(3), 1063. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2024.59000>
- Sharma, A., & Singh, G. (2018). Blynk: A mobile IoT platform for real-time IoT-based applications. *International Journal of Computer Applications*, 180(15), 1–5. <https://doi.org/10.5120/ijca2018916688>
- Widodo, Y. B., Ichsan, A. M., & Sutabri, T. (2020). Perancangan Sistem Smart Home Dengan Konsep Internet Of Things Hybrid Berbasis Protokol Message Queuing Telemetry Transport. *Jurnal Teknologi Informatika Dan Komputer*, 6(2), 123. <https://doi.org/10.37012/jtik.v6i2.302>