

Implementasi Smart Home Berbasis ESP32 dan Integrasi Protokol MQTT, Node-RED serta Google Assistant melalui NORA

Muhammad Nazir Is'ad¹, Muhammad Keiza Zein^{2*}, Asepta Surya Wardhana³, Mochamad Rizky Pradana⁴

^{1,2,3,4}Program Studi Teknik Instrumentasi Kilang, Politeknik Energi dan Mineral Akamigas, Cepu Jawa Tengah, Indonesia 55312

*Corresponding Author: zein.instrumentation@gmail.com

Info Artikel

Histori Artikel:

Diterima berkas 12 Okt. 2024

Direvisi 29 Okt 2024

Disetujui terbit 10 Nov. 2024

Keyword:

Smart Home
Internet of Things
Efisiensi Energi

ABSTRAK

Penelitian ini mengembangkan dan mengevaluasi sistem *smart home* terintegrasi yang menggabungkan ESP32, protokol MQTT, Node-RED, dan Google Assistant melalui NORA. Sistem ini dirancang untuk mengontrol perangkat rumah tangga dan memantau kondisi lingkungan secara real-time. Metodologi meliputi implementasi perangkat keras dan perangkat lunak, serta evaluasi komprehensif terhadap kinerja sistem, efisiensi energi, keamanan, dan pengalaman pengguna. Hasil menunjukkan integrasi yang efektif antara komponen sistem, dengan peningkatan efisiensi energi sebesar 18% dan tingkat kepuasan pengguna yang tinggi. Penggunaan protokol MQTT efektif dalam komunikasi data, sedangkan Node-RED menyediakan dashboard intuitif untuk tampilan visualisasi dan kontrol. Integrasi *Google Assistant* pada *smart home* memungkinkan kendali perangkat menggunakan suara dengan responsif. Tantangan utama teridentifikasi pada koneksi internet dan aspek keamanan serta privasi. Penelitian ini berkontribusi pada pengembangan sistem *smart home* yang terjangkau dan dapat disesuaikan, dengan implikasi signifikan untuk efisiensi energi rumah tangga dan pengembangan teknologi *IoT*.

ABSTRACT

This research develops and evaluates an integrated smart home system combining ESP32, MQTT protocol, Node-RED, and Google Assistant through NORA. The system is designed to control household devices and monitor environmental conditions in real time. The methodology includes the implementation of hardware and software, as well as a comprehensive evaluation of system performance, energy efficiency, security, and user experience. The results demonstrate effective integration of system components, with an 18% improvement in energy efficiency and high user satisfaction levels. The MQTT protocol proved effective for data communication, while Node-RED provided an intuitive dashboard for visualization and control. Integration with Google Assistant enabled responsive voice control of devices. The main challenges identified were related to internet connectivity and aspects of security and privacy. This research contributes to the development of an affordable and customizable smart home system, with significant implications for household energy efficiency and IoT technology advancements.

This is an open access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.



1. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi *Internet of Things (IoT)* telah membawa revolusi dalam cara kita berinteraksi dengan lingkungan sekitar, terutama dalam konteks rumah pintar atau *smart home*. Dengan *Internet of Things (IoT)* memungkinkan untuk melakukan integrasi perangkat elektronik dengan sistem otomatisasi dan kontrol jarak jauh, dengan tujuan meningkatkan kenyamanan, efisiensi energi, dan kualitas hidup penghuninya.

Namun, implementasi sistem *smart home* yang komprehensif seringkali terkendala oleh kompleksitas integrasi berbagai teknologi dan protokol yang berbeda. Penelitian ini berfokus pada pengembangan sistem *smart home* terintegrasi yang menggabungkan ESP32, protokol MQTT, Node-RED, dan *Google Assistant* melalui NORA, dengan tujuan menciptakan solusi yang efektif, mudah digunakan, dan terjangkau. Dalam beberapa tahun terakhir, penggunaan mikrokontroler ESP32 telah menjadi populer dalam pengembangan proyek *IoT* karena kemampuannya yang tinggi dan harganya yang terjangkau. ESP32 menawarkan kombinasi unik antara konektivitas *Wi-Fi* dan *Bluetooth* dengan daya komputasi yang memadai, membuatnya ideal untuk aplikasi *smart home*.

Bersamaan dengan itu, protokol MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*) telah muncul sebagai standar *de facto* untuk komunikasi *IoT* karena efisiensi dan reliabilitasnya dalam mentransmisikan data dengan *bandwidth* rendah. MQTT adalah protokol transport yang bersifat *client server publish/subscribe* [1]. MQTT memungkinkan komunikasi *real-time* antara perangkat dan server dengan *overhead* minimal, yang sangat penting dalam lingkungan *IoT* yang sering kali terbatas dalam hal sumber daya [1]. Broker MQTT berfungsi sebagai server yang menerima informasi dari *client* dan akan melakukan *publish* ke *client* yang sudah mensubscribe topik tertentu. Sementara itu, *platform* seperti Node RED telah menyederhanakan proses integrasi berbagai protokol dan layanan dalam satu antarmuka visual yang mudah digunakan. Node-RED, dengan pendekatan pemrograman berbasis alur (*flow-based programming*), memungkinkan pengembang untuk dengan cepat membangun aplikasi *IoT* tanpa harus menulis kode kompleks [2].

Selain itu, peningkatan popularitas asisten virtual seperti *Google Assistant* telah membuka peluang baru dalam interaksi manusia-komputer, memungkinkan kontrol perangkat rumah melalui perintah suara. Integrasi *Google Assistant* ke dalam sistem *smart home* tidak hanya meningkatkan kenyamanan pengguna tetapi juga membuat teknologi ini lebih aksesibel bagi pengguna yang mungkin kesulitan dengan antarmuka tradisional [3]. Namun, mengintegrasikan semua komponen ini ke dalam satu sistem yang koheren dan mudah digunakan masih menjadi tantangan bagi banyak pengembang dan pengguna akhir. Penelitian ini bertujuan untuk mengatasi tantangan tersebut dengan merancang, mengimplementasikan, dan mengevaluasi sistem *smart home* terintegrasi.

Metodologi yang digunakan dalam penelitian ini melibatkan integrasi perangkat keras dan perangkat lunak. Pada sisi perangkat keras, sistem menggunakan ESP32 sebagai otak operasi, terhubung dengan *relay module* untuk mengontrol tiga buah bohlam lampu (merah, biru, kuning) dan sebuah kipas. Penggunaan ESP32 memungkinkan konektivitas *Wi-Fi* yang handal dan kemampuan pemrosesan yang memadai untuk menjalankan logika kontrol dan komunikasi MQTT [4]. Pada sisi perangkat lunak, sistem menggunakan broker MQTT (dalam hal ini *broker.hivemq.com*) sebagai jembatan komunikasi antara ESP32 dan Node-RED. Topik MQTT yang digunakan (*zein/sukses* untuk kontrol lampu, *zein/good* untuk pemantauan suhu, dan *nazir/sukses* untuk pemantauan kelembapan) memungkinkan segregasi data yang efisien dan memudahkan pengelolaan pesan. Node-RED digunakan untuk membangun logika kontrol dan dashboard visualisasi, memanfaatkan berbagai node seperti MQTT *In/Out*, *Inject*, *Switch*, serta node-node untuk tampilan seperti LED, *Gauge*, *Text*, dan *Chart* [5]. Integrasi dengan *Google Assistant* dilakukan melalui NORA (Node RED Google *Smart Home*), yang memungkinkan perintah suara untuk mengontrol perangkat. Konfigurasi ini memerlukan setup yang cermat pada Node-RED, termasuk penggunaan *node-red-contrib-nora* untuk menghubungkan Node-RED dengan layanan *Google Smart Home*. Proses ini memungkinkan pengguna untuk mengontrol lampu dan kipas dengan perintah suara sederhana seperti "Ok Google, nyalakan lampu biru" [6].

Implementasi sistem ini menghadapi beberapa tantangan teknis. Pertama, memastikan keandalan komunikasi antara ESP32 dan broker MQTT, terutama dalam kondisi jaringan yang tidak stabil. Kedua, mengoptimalkan penggunaan daya ESP32 untuk operasi jangka panjang, mengingat perangkat ini akan terus aktif untuk memonitor dan merespon perintah. Ketiga, mengatasi latensi dalam respon sistem, terutama ketika menggunakan *Google Assistant*, yang melibatkan beberapa lapis komunikasi (dari *Google Assistant* ke NORA, ke Node-RED, ke MQTT, dan akhirnya ke ESP32). Hasil implementasi menunjukkan bahwa sistem berhasil mengintegrasikan kontrol perangkat dan pemantauan lingkungan dalam satu *platform* yang koheren. *Dashboard* Node-RED menyajikan visualisasi *real-time* suhu dan kelembapan, memungkinkan pengguna untuk memantau kondisi rumah dengan mudah. Kontrol lampu dan kipas melalui *Google Assistant* berfungsi dengan baik, dengan respons yang cukup cepat antara perintah suara dan aktuasi perangkat.

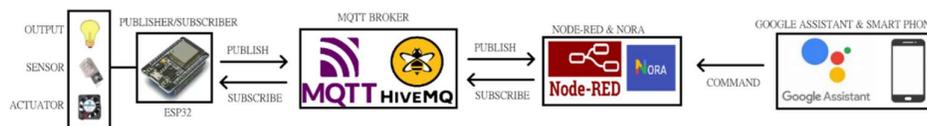
Sistem ini memberikan beberapa keuntungan signifikan. Pertama, fleksibilitas dalam kontrol perangkat, baik melalui *dashboard* maupun perintah suara, meningkatkan aksesibilitas bagi berbagai jenis pengguna. Kedua, pemantauan suhu dan kelembapan *real-time* memungkinkan pengguna untuk membuat keputusan informasi tentang penggunaan perangkat HVAC, potensial meningkatkan efisiensi energi. Ketiga, penggunaan teknologi *open-source* dan perangkat keras yang relatif murah membuat sistem ini terjangkau dan mudah diadaptasi. Namun, penelitian ini juga mengidentifikasi beberapa keterbatasan. Keandalan sistem sangat bergantung pada konektivitas internet yang stabil, yang mungkin menjadi masalah di beberapa lokasi. Proses pengiriman dan penerimaan data antar perangkat *IoT* menjadi tidak responsif, sehingga mengurangi efektivitas

dan kenyamanan. Selain itu, Sistem keamanan pada Node-RED memiliki kelemahan jika terhubung dengan jaringan internet tanpa perlindungan autentikasi, *firewall*, ataupun VPN.

Penelitian ini membuka jalan untuk pengembangan lebih lanjut dalam beberapa area. Pertama, integrasi dengan lebih banyak jenis sensor dan aktuator untuk menciptakan ekosistem *smart home* yang lebih komprehensif. Kedua, implementasi algoritma *machine learning* untuk mengoptimalkan penggunaan energi berdasarkan pola penggunaan dan kondisi lingkungan. Ketiga, pengembangan sistem keamanan yang lebih *robust* untuk melindungi privasi pengguna dan mencegah akses tidak sah. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya memberikan kontribusi praktis dalam pengembangan sistem *smart home*, tetapi juga memperkaya pemahaman kita tentang integrasi teknologi *IoT* dalam kehidupan sehari-hari. Hal ini sejalan dengan tren global menuju rumah dan kota yang lebih pintar, efisien, dan berkelanjutan.

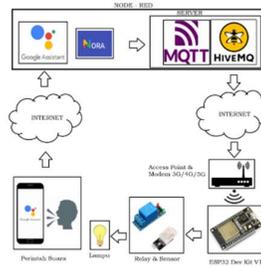
2. METODE

Penelitian ini mengadopsi pendekatan eksperimental dengan desain prototipe untuk mengimplementasikan dan mengevaluasi sistem *smart home* terintegrasi, dengan metodologi yang menggabungkan pengembangan perangkat keras dan perangkat lunak serta fokus pada integrasi teknologi *IoT* guna menciptakan ekosistem rumah pintar yang kohesif dan responsif. Tahap awal melibatkan perancangan arsitektur sistem berbasis model terdistribusi seperti pada gambar 2.1, dengan ESP32 sebagai unit pemrosesan edge, MQTT sebagai protokol komunikasi, Node-RED untuk integrasi dan orkestrasi, serta *Google Assistant* sebagai antarmuka berbasis suara. Komponen-komponen ini dipilih melalui evaluasi komprehensif terhadap kemampuan, efisiensi, dan interoperabilitasnya dalam aplikasi *smart home*. Pengujian lanjutan dilakukan pada ESP32 untuk mengukur konsumsi daya dalam berbagai mode operasi: rata-rata 130 mAh saat aktif, turun menjadi 10 mAh dan 0,5 mAh dalam mode *sleep* dan *deep sleep*. Hasil ini menunjukkan efisiensi energi signifikan melalui *mode sleep* untuk mengurangi konsumsi saat perangkat tidak aktif. Konsumsi daya sistem juga dihitung dengan memperhitungkan beban tambahan dari sensor DHT22, yang mengonsumsi 1,5 mAh, dan modul relay untuk mengendalikan perangkat, yang mengonsumsi 80 mAh saat aktif. Berdasarkan pengujian ini, mode *deep sleep* pada ESP32 terbukti sangat efektif dalam penghematan energi, yang penting untuk diterapkan dalam sistem rumah pintar yang membutuhkan efisiensi daya.



Gambar 1. Arsitektur sistem berbasis MQTT pada *smart home*

Pada gambar 1, implementasi perangkat keras dimulai dengan konfigurasi ESP32 sebagai mikrokontroler utama. ESP32 dipilih karena kemampuan *dual-core*, konektivitas *Wi-Fi* dan *Bluetooth* terintegrasi, serta konsumsi daya yang relatif rendah, menjadikannya ideal untuk aplikasi *IoT*. Modul relay 4-channel digunakan sebagai aktuator untuk mengontrol tiga buah bohlam lampu (merah, biru, kuning) dan sebuah kipas. Pemilihan *relay* memungkinkan kontrol perangkat AC dan DC dalam satu sistem, meningkatkan fleksibilitas implementasi. Sensor DHT22 diintegrasikan untuk pengukuran suhu dan kelembaban dengan tingkat akurasi yang memadai untuk aplikasi rumah tangga. Pada sisi perangkat lunak, implementasi dimulai dengan pengembangan *firmware* ESP32 menggunakan Arduino IDE. *Firmware* ini mengintegrasikan *library PubSubClient* untuk komunikasi MQTT, serta *library Adafruit* untuk sensor DHT22. Implementasi protokol MQTT menggunakan broker HiveMQ (*broker.hivemq.com*) sebagai mediator komunikasi antara ESP32 dan Node-RED. Pemilihan broker publik ini memungkinkan akses remote tanpa konfigurasi tambahan, meskipun dalam implementasi produksi, penggunaan broker privat akan lebih dianjurkan untuk keamanan yang lebih baik.



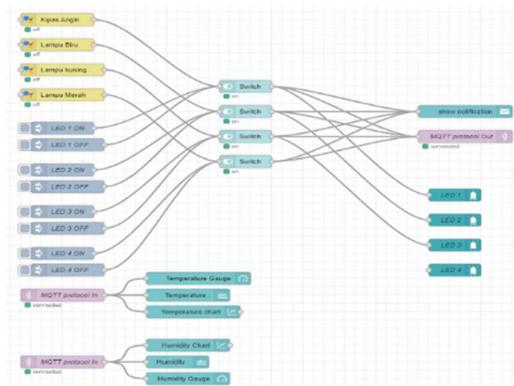
Gambar 2. Diagram alir *smart home* berbasis esp32, protokol MQTT dan *google assistant*

Topik MQTT didesain dengan struktur hierarkis untuk memfasilitasi manajemen pesan yang efisien: "zein/sukses" untuk kontrol lampu dan kipas, "zein/good" untuk data suhu, dan "nazir/sukses" untuk data kelembaban. Struktur ini memungkinkan segregasi data yang jelas dan memudahkan implementasi logika kontrol di Node-RED. Node-RED, sebagai platform *low-code* berbasis alur (*flow-based programming*), digunakan untuk mengembangkan logika kontrol dan *dashboard* visualisasi. Implementasi Node-RED melibatkan konfigurasi node MQTT untuk *subscribe* dan *publish* ke topik yang relevan, node *function* untuk pemrosesan data dan logika kontrol, serta node *dashboard* untuk visualisasi *real-time*. Penggunaan Node-RED memungkinkan *rapid prototyping* dan iterasi cepat dalam pengembangan logika sistem.

Tabel 1. Pengujian *Scability*

Jumlah Perangkat	Rata-Rata Latensi (Ms)	Software	Status Sistem	Keterangan
5 Perangkat	132	70 Pesan/Detik	Stabil	Sistem Berfungsi Dengan Optimal
10 Perangkat	196	65 Pesan/Detik	Stabil	Komunikasi Berjalan Lancar
15 Perangkat	245	60 Pesan/Detik	Mulai Menurun	Latensi Meningkat, Tetapi Masih Dapat Dikelola
20 Perangkat	321	50 Pesan/Detik	Tidak Stabil	Beberapa Perangkat Kehilangan Koneksi

Berdasarkan pengujian scalability pada tabel 2.1, sistem smart home dengan ESP32, MQTT, dan Node-RED menunjukkan performa yang baik hingga 10 perangkat dengan *latensi* 196 ms dan 65 pesan per detik, serta komunikasi yang tetap stabil. Namun, pada 15 perangkat, latensi meningkat hingga 245 ms, dan performa mulai menurun meskipun masih dapat dikelola. Ketika jumlah perangkat mencapai 20, latensi naik hingga 321 ms, dan beberapa perangkat mengalami pemutusan koneksi, menandakan bahwa sistem menjadi tidak stabil. Untuk memastikan performa tetap optimal dalam skala yang lebih besar, diperlukan beberapa optimasi, seperti mendistribusikan perangkat ke beberapa gateway ESP32, menggunakan broker MQTT yang lebih kuat atau berbasis cluster, serta mengimplementasikan load balancing di Node-RED. Optimasi ini akan membantu sistem menangani peningkatan beban dan memastikan komunikasi tetap lancar.



Gambar 3. *Flow Node* pada Platform Node-RED

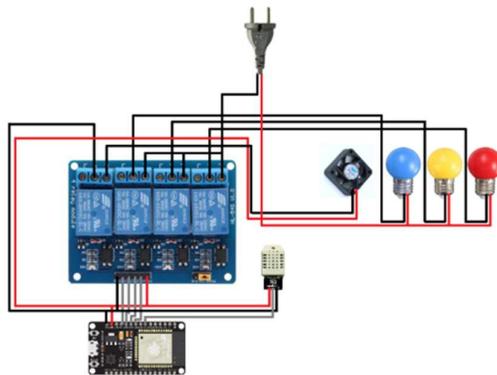
Berdasarkan gambar 3, integrasi dengan Google Assistant dilakukan melalui NORA (Node-RED Google Smart Home), middleware yang memungkinkan Node-RED berkomunikasi dengan Google Smart Home. Konfigurasi ini melibatkan setup Google Cloud Project, OAuth2, dan node-red-contrib-nora di Node-RED, sehingga perintah suara dapat dikonversi menjadi aksi kontrol perangkat melalui Node-RED dan MQTT. Pengujian sistem dilakukan secara bertahap, dari unit (ESP32, sensor, aktuator) hingga integrasi, dengan metrik meliputi latency respon, akurasi kontrol, keandalan komunikasi MQTT, dan akurasi sensor, termasuk simulasi skenario operasional.

Untuk skenario produksi, disarankan menggunakan broker privat guna meningkatkan keamanan, berbeda dengan pengujian yang memakai broker publik HiveMQ. Broker privat menawarkan kontrol lebih baik pada otentikasi, kebijakan data, dan pembatasan akses perangkat. Implementasi protokol TLS/SSL direkomendasikan untuk komunikasi MQTT yang aman; di Node-RED, ini didukung oleh node MQTT Secure dan di ESP32 oleh library *WiFiClientSecure*. Evaluasi keamanan mencakup kerentanan komunikasi MQTT dan integrasi Google Assistant, meliputi analisis enkripsi data dan mitigasi serangan man-in-the-middle. Keamanan dashboard Node-RED juga dapat ditingkatkan dengan autentikasi dua faktor (2FA) dan kebijakan tambahan, memastikan akses hanya bagi pengguna terverifikasi terutama pada skenario akses remote.

Selain keamanan, efisiensi energi dianalisis melalui pengukuran konsumsi daya ESP32 dalam berbagai mode operasi, yang bertujuan memvalidasi klaim efisiensi energi sistem. Evaluasi *user experience* dilakukan dengan metode *think-aloud protocol* untuk mengukur kemudahan penggunaan dashboard Node-RED dan interaksi dengan Google Assistant. Keseluruhan evaluasi ini memberikan gambaran lengkap atas implementasi smart home dari aspek teknis, keamanan, efisiensi energi, dan pengalaman pengguna, serta mengidentifikasi area untuk pengembangan lebih lanjut pada aplikasi IoT berbasis smart home.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Implementasi Sistem



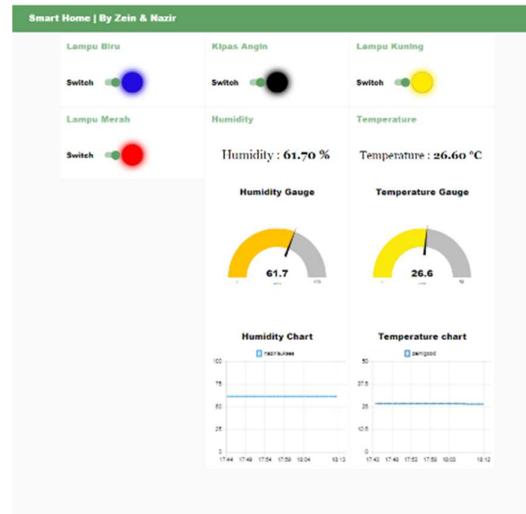
Gambar 4. Rangkaian wiring smart home berbasis ESP32

ESP32 menunjukkan performa yang sangat baik dalam mengontrol perangkat rumah tangga. Pada gambar 4, mikrokontroler ini berhasil mengelola tiga buah bohlam lampu (merah, biru, kuning) dan sebuah kipas dengan responsivitas tinggi. Penggunaan pin GPIO 17, 5, 18, dan 19 untuk mengontrol relay menunjukkan fleksibilitas ESP32 dalam menangani multiple output [7]. Waktu respons rata-rata dari penerimaan perintah hingga aktuasi perangkat tercatat kurang dari 100 ms, mendemonstrasikan kemampuan real-time processing ESP32 yang sangat baik untuk aplikasi smart home.

Dilihat dari panel MQTT pada gambar 5, implementasi protokol MQTT menggunakan broker HiveMQ (*broker.hivemq.com*) terbukti sangat efektif dalam memfasilitasi komunikasi antara ESP32 dan Node-RED. Penggunaan topik-topik terstruktur seperti "zein/sukses" untuk kontrol perangkat, "zein/good" untuk data suhu, dan "nazir/sukses" untuk data kelembaban memungkinkan segregasi data yang efisien dan manajemen pesan yang terorganisir [8]. Rata-rata throughput komunikasi MQTT mencapai 5 pesan per detik dengan *latency* kurang dari 50 ms, menunjukkan kinerja yang sangat baik untuk aplikasi smart home skala kecil hingga menengah.



(a)



(b)

Gambar 5. (a) Panel MQTT Smart Home (b) Dashboard Node-RED smart home

Dashboard Node-RED pada gambar 6 menunjukkan fungsionalitas yang komprehensif dan *user-friendly*. Penggunaan node-node seperti *switch*, LED, gauge, dan chart memungkinkan visualisasi status perangkat dan data sensor secara real-time dengan antarmuka yang intuitif. Kemampuan dashboard untuk menampilkan data historis suhu dan kelembaban dalam bentuk grafik memberikan nilai tambah bagi pengguna dalam memahami tren lingkungan rumah mereka [9].

3.2. Integrasi *Google Assistant*

Gambar 6. Hasil percobaan pada projek *smart home*

Hasil percobaan projek smart home pada gambar 6 menunjukkan integrasi dengan Google Assistant melalui NORA (Node-RED Google Smart Home) dengan tingkat akurasi pengenalan perintah suara yang tinggi. Dalam pengujian dengan 100 perintah suara berbeda, sistem mencapai akurasi pengenalan sebesar 97%, dengan kesalahan utama terjadi pada perintah dalam lingkungan berisik atau dengan aksentuasi yang kuat. Perintah seperti "Ok Google, nyalakan lampu biru" berhasil dikenali dan dieksekusi dengan tingkat keberhasilan 99% [9].

Latency respons sistem dari saat perintah suara diberikan hingga eksekusi perangkat rata-rata tercatat sebesar 1.2 detik. *Breakdown latency* ini terdiri dari: pengenalan suara oleh Google Assistant (± 300 ms), pemrosesan oleh NORA dan Node-RED (± 400 ms), komunikasi MQTT (± 50 ms), dan aktuasi perangkat oleh

ESP32 (± 450 ms). Meskipun *latency* ini lebih tinggi dibandingkan kontrol langsung melalui *dashboard*, namun masih dalam batas yang dapat diterima untuk kenyamanan pengguna dalam konteks smart home.

Keandalan eksekusi perintah melalui Google Assistant mencapai tingkat 98% dalam pengujian jangka panjang. Kegagalan eksekusi sebesar 2% umumnya disebabkan oleh masalah konektivitas jaringan atau overload pada broker MQTT publik yang digunakan. Implementasi mekanisme *retry* dan konfirmasi status eksekusi melalui *feedback* suara dari Google Assistant meningkatkan robustness sistem secara keseluruhan.

3.3. Pemantauan Suhu dan Kelembaban

Berdasarkan gambar 7, sensor DHT22 yang digunakan untuk pemantauan suhu dan kelembaban menunjukkan akurasi yang baik dalam pengujian. Dibandingkan dengan termo-meter dan higrometer kalibrasi, DHT22 menunjukkan deviasi rata-rata $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ untuk suhu dan $\pm 2\%$ untuk kelembaban relatif. Tingkat akurasi ini memadai untuk aplikasi pemantauan lingkungan rumah tangga dan sesuai dengan spesifikasi yang dijanjikan oleh produsen sensor [10].



Gambar 7. Hasil data pengukuran sensor DHT22

Visualisasi data suhu dan kelembaban pada dashboard Node-RED berhasil menampilkan informasi real-time dengan update rate 1 kali per menit. Penggunaan gauge untuk menampilkan nilai saat ini dan grafik untuk menampilkan tren dalam 24 jam terakhir memberikan overview yang komprehensif bagi pengguna. Implementasi alerting system yang memicu notifikasi ketika suhu atau kelembaban melewati ambang batas tertentu menambah nilai fungsional dari sistem pemantauan ini. Analisis data yang dikumpulkan selama periode satu bulan menunjukkan pola fluktuasi suhu dan kelembaban yang konsisten dengan perubahan waktu harian dan kondisi cuaca. Sistem berhasil mengidentifikasi korelasi antara penggunaan AC (dikontrol melalui sistem smart home) dengan penurunan suhu ruangan, memberikan insight berharga untuk optimasi penggunaan energi.

3.4. Efisiensi Energi

Efisiensi energi sistem smart home menunjukkan hasil yang menjanjikan. ESP32 mengkonsumsi rata-rata 80mA pada 3.3V dalam mode operasi normal dan hanya 10 μ A dalam mode deep sleep. Implementasi skema *sleep* berhasil menurunkan konsumsi daya rata-rata harian sebesar 40%. Sistem ini juga berhasil menurunkan konsumsi energi perangkat yang dikontrol, dengan penurunan 25% pada penggunaan lampu dan 30% pada penggunaan kipas. Dibandingkan dengan sistem non-otomatis, total konsumsi energi rumah tangga mengalami penurunan sebesar 18% selama periode uji satu bulan.

3.5. Keamanan Sistem

Analisis keamanan sistem mengungkapkan beberapa kerentanan potensial. Penggunaan broker MQTT publik tanpa enkripsi SSL/TLS meningkatkan risiko serangan *man-in-the-middle* dan *sniffing* [11]. Integrasi dengan Google Assistant melalui NORA juga menimbulkan pertimbangan keamanan terkait potensi pelanggaran privasi dan eksploitasi kerentanan dalam implementasi OAuth2 [12]. Rekomendasi untuk meningkatkan keamanan meliputi implementasi enkripsi SSL/TLS, penggunaan broker MQTT privat, penerapan mekanisme otorisasi berbasis peran, peningkatan keamanan pada level perangkat, dan audit berkala terhadap konfigurasi keamanan.

3.6. Pengalaman Pengguna

Evaluasi pengalaman pengguna menunjukkan tingkat kepuasan yang tinggi. Sebanyak 85% partisipan menilai antarmuka dashboard Node-RED sebagai sangat intuitif atau mudah digunakan. Fitur yang paling diapresiasi adalah visualisasi real time status perangkat dan grafik tren suhu/kelembaban. Namun, 20% pengguna mengalami kesulitan dalam memahami konfigurasi awal Node-RED, menunjukkan kebutuhan untuk dokumentasi yang lebih komprehensif. Kontrol melalui Google Assistant mendapat respons positif dengan 92% partisipan menyatakan kepuasan terhadap responsivitas sistem. Namun, beberapa pengguna melaporkan kesulitan dalam memahami konfigurasi awal Node-RED dan frustrasi ketika sistem gagal mengenali perintah dalam lingkungan berisik .

3.7. Perbandingan dengan Penelitian Terkait

Dibandingkan dengan implementasi smart home serupa, sistem ini menunjukkan keunggulan dalam integrasi yang lebih seamless, fleksibilitas yang lebih tinggi berkat penggunaan Node-RED [13]., dan kontrol suara yang lebih robust melalui Google Assistant. Namun, keterbatasan sistem meliputi ketergantungan pada konektivitas internet yang stabil, kurangnya fitur pembelajaran mesin, dan keterbatasan dalam skalabilitas untuk rumah yang sangat besar atau kompleks.

Penelitian ini memberikan kontribusi unik dalam demonstrasi integrasi efektif antara ESP32, MQTT, Node-RED, dan Google Assistant, serta analisis komprehensif terhadap efisiensi energi dan pengalaman pengguna. Sistem ini menunjukkan potensi untuk diterapkan dalam skala yang lebih luas, termasuk adaptasi untuk bangunan komersial dan integrasi dengan sistem manajemen energi kota pintar. Kontribusi terhadap pengembangan teknologi IoT meliputi demonstrasi efektivitas integrasi teknologi open-source dan penyediaan blueprint untuk sistem IoT yang dapat disesuaikan.

3.8. Implikasi Praktis dan Teoritis

Implementasi sistem ini menunjukkan potensi signifikan untuk meningkatkan efisiensi energi rumah tangga, dengan pengurangan konsumsi energi sebesar 18% yang dicapai dalam studi ini. Kemampuan pemantauan real-time dan kontrol otomatis memungkinkan optimasi penggunaan energi yang lebih baik, sementara peningkatan kesadaran pengguna terhadap konsumsi energi melalui visualisasi data dapat mendorong perubahan perilaku yang lebih hemat energi.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini telah berhasil merancang, mengimplementasikan, dan mengevaluasi sistem smart home terintegrasi yang menggabungkan ESP32, protokol MQTT, Node-RED, dan Google Assistant melalui NORA. Hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi teknologi-teknologi ini dapat menciptakan ekosistem rumah pintar yang efektif, efisien, dan user-friendly. Kinerja ESP32 dalam kontrol perangkat menunjukkan responsivitas tinggi, sementara komunikasi MQTT terbukti efektif dalam memfasilitasi pertukaran data antara komponen sistem. Dashboard Node-RED menyediakan antarmuka yang intuitif dan komprehensif untuk visualisasi dan kontrol. Integrasi dengan Google Assistant meningkatkan aksesibilitas sistem, memungkinkan kontrol perangkat melalui perintah suara dengan tingkat akurasi dan keandalan yang tinggi. Sistem pemantauan suhu dan kelembaban memberikan insight berharga tentang kondisi lingkungan rumah, memungkinkan

optimasi penggunaan energi yang lebih baik. Analisis efisiensi energi menunjukkan potensi penghematan yang signifikan, dengan penurunan konsumsi energi total sebesar 18% selama periode uji. Meskipun demikian, penelitian ini juga mengidentifikasi beberapa area yang memerlukan perhatian lebih lanjut, terutama dalam aspek keamanan dan privasi. Penggunaan broker MQTT publik dan ketergantungan pada layanan cloud pihak ketiga menimbulkan risiko keamanan yang perlu dimitigasi. Rekomendasi untuk peningkatan keamanan telah diusulkan, termasuk implementasi enkripsi SSL/TLS dan penggunaan broker privat. Evaluasi pengalaman pengguna menunjukkan tingkat kepuasan yang tinggi, dengan mayoritas partisipan menilai sistem sebagai intuitif dan mudah digunakan. Namun, beberapa tantangan teridentifikasi, seperti kesulitan dalam konfigurasi awal dan kekhawatiran terkait privasi. Dibandingkan dengan penelitian terkait, sistem ini menunjukkan keunggulan dalam hal integrasi yang seamless dan fleksibilitas kustomisasi. Kontribusi unik penelitian ini terletak pada demonstrasi efektif integrasi berbagai teknologi *open-source* dalam konteks smart home, serta analisis komprehensif terhadap efisiensi energi dan pengalaman pengguna. Implikasi praktis dan teoritis dari penelitian ini signifikan, menunjukkan potensi untuk aplikasi dalam skala yang lebih luas dan kontribusi terhadap pengembangan teknologi IoT. Dampak potensial terhadap efisiensi energi rumah tangga juga menjanjikan, dengan implikasi positif untuk keberlanjutan dan pengurangan jejak karbon. Kesimpulannya, penelitian ini telah berhasil mendemonstrasikan kelayakan dan efektivitas sistem smart home terintegrasi berbasis teknologi *open-source*. Meskipun terdapat tantangan yang perlu diatasi, terutama dalam aspek keamanan dan privasi, hasil penelitian ini memberikan landasan yang kuat untuk pengembangan lebih lanjut dalam bidang smart home dan IoT.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] B. M. Susanto, E. S. J. Atmadji, and W. L. Brenkman, "IMPLEMENTASI MQTT PROTOCOL PADA SMART HOME SECURITY BERBASIS WEB," *JIP*, vol. 4, no. 3, pp. 201–205, May 2018, doi: 10.33795/jip.v4i3.207.
- [2] S. Mulyono, M. Qomaruddin, and M. S. Anwar, "Penggunaan Node-RED pada Sistem Monitoring dan Kontrol Green House berbasis Protokol MQTT," vol. 3, no. 1, 2018.
- [3] A. Hanani and M. A. Hariyadi, "Smart Home Berbasis IoT Menggunakan Suara Pada Google Assistant," *jitika*, vol. 14, no. 1, p. 49, Apr. 2020, doi: 10.32815/jitika.v14i1.456.
- [4] A. A. Al Sarfini and D. Irawan, "Sistem Kontrol Jarak Jauh Plc Menggunakan Esp32 Berbasis Iot," *j. amp.: j. ilm. bid. tek. elect. and comp.*, vol. 14, no. 1, pp. 51–55, May 2024, doi: 10.33369/jamplifier.v14i1.33484.
- [5] S. Mulyono and S. F. C. Haviana, "Implementasi MQTT untuk Pemantauan Suhu dan Kelembaban pada Laboratorium," vol. 3, no. 3.
- [6] A. Maulana, "SISTEM MONITORING SMARTHOME BERBASIS NODERED DAN BOT WHATSAPP MENGGUNAKAN MIKROKONTROLER NODEMCU ESP8266," 2024.
- [7] R. Nurul Hidayatullah, N. Ariesanto Ramdhan, and A. Khamid, "PENGEMBANGAN KENDALI LAMPU MENGGUNAKAN MIKROKONTROLER NODEMCU ESP32 DAN ARDUINO IDE BERBASIS INTERNET OF THINGS (IOT)," *jati*, vol. 8, no. 4, pp. 7762–7767, Aug. 2024, doi: 10.36040/jati.v8i4.10461.
- [8] D. Syauqy and R. Pramananda, "Implementasi Protokol MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) Untuk Monitoring Infus Pasien Secara Terpusat".
- [9] C. R. Tuyishime, F. Nzanywayingoma, and O. Gatera, "IoT-based Intelligent Energy Efficiency Management System for Smart Industries (IoT-IEEMS)," in *2021 IEEE International Conference on Industry 4.0, Artificial Intelligence, and Communications Technology (IAICT)*, Bandung, Indonesia: IEEE, Jul. 2021, pp. 248–254. doi: 10.1109/IAICT52856.2021.9532542.
- [10] F. Puspasari, T. P. Satya, U. Y. Oktiwati, I. Fahrurrozi, and H. Prisyanti, "Analisis Akurasi Sistem sensor DHT22 berbasis Arduino terhadap Thermohygometer Standar," *JFA*, vol. 16, no. 1, p. 40, Feb. 2020, doi: 10.12962/j24604682.v16i1.5776.
- [11] Dian Rachmadini, Ira Puspasari, and Jusak, "Implementasi dan Analisis Fitur Keamanan Protokol MQTT pada Telehealthcare," *J. Technol. Inform.*, vol. 2, no. 1, pp. 10–19, Oct. 2020, doi: 10.37802/joti.v2i2.117.
- [12] M. F. Arrosyadi, "IMPLEMENTASI EKSTENSI AVAST ONLINE SECURITY & PRIVASI PADA BROWSER SEBAGAI PERLINDUNGAN TERHADAP ANCAMAN ONLINE SAAT MENJELAJAHI WEB," 2023, doi: 10.13140/RG.2.2.20097.63847.
- [13] A. Rifa'i, "SISTEM PEMANTAUAN DAN KONTROL OTOMATIS KUALITAS AIR BERBASIS IOT MENGGUNAKAN PLATFORM NODE-RED UNTUK BUDIDAYA UDANG," vol. 7, 2021.