

Pemanfaatan Teknologi *Long Range Gateway* Untuk Sistem Monitoring Kualitas Udara Pasca Letusan Gunung Berapi

¹Bloko Budi R, ²Muhammad Fadilah R, ³Agustini Rodiah M

Teknik Elektro, Universitas Pakuan, Bogor

¹bloko.budirijadi@unpak.ac.id, ²mfadilahr@gmail.com, ³agustini.rodiah@unpak.ac.id

Article Info

Keyword:

Long Range gateway
kualitas udara,
RSSI,
Node-RED

Copyright © 2025 -SNTE
All rights reserved

ABSTRACT

Abstrak - Indonesia merupakan negara dengan jumlah gunung berapi aktif terbanyak di dunia, sehingga berisiko tinggi terhadap letusan yang berdampak serius pada kualitas udara. Pemantauan kualitas udara pasca letusan sangat penting untuk mendukung mitigasi bencana, namun sering terkendala oleh keterbatasan infrastruktur komunikasi di wilayah terpencil. Penelitian ini mengembangkan sistem pemantauan kualitas udara berbasis Internet of Things (IoT) dengan komunikasi LoRa Gateway yang memiliki jangkauan luas dan konsumsi daya rendah. Metode penelitian menggunakan pendekatan rancang-bangun-uji dengan memanfaatkan sensor MQ-135 untuk deteksi gas berbahaya dan DHT22 untuk pengukuran suhu serta kelembapan. Dua node pemancar mengirimkan data menuju ESP32 gateway, sebelum diteruskan ke MQTT Broker dan divisualisasikan secara real-time melalui Node-RED. Pengujian dilakukan melalui verifikasi akurasi sensor, uji jangkauan LoRa pada beberapa skenario jarak, serta analisis *Received Signal Strength Indicator* (RSSI). Hasil penelitian menunjukkan adanya selisih pengukuran suhu sebesar $\pm 1,2$ °C dibandingkan alat pembanding, serta respon MQ-135 yang semakin cepat pada konsentrasi asap lebih tinggi. Uji lapangan membuktikan sistem mampu melakukan transmisi data hingga jarak $\pm 1,9$ km pada kondisi *semi-Line of Sight*, dengan penurunan RSSI yang konsisten sesuai model *log-distance path loss*. Sistem ini dapat diimplementasikan untuk pemantauan kualitas udara di daerah terdampak erupsi, meskipun kondisi geografis pegunungan dapat membatasi jangkauan LoRa. Oleh karena itu, penggunaan repeater atau jaringan mesh LoRa direkomendasikan untuk meningkatkan cakupan, sehingga sistem ini berpotensi mendukung mitigasi bencana berbasis data real-time.

Corresponding Author:

Bloko Budi Rijadi,
Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Pakuan, Bogor,
Jl. Pakuan, Tegallega
Email: bloko.budirijadi@unpak.ac.id

I. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan salah satu negara dengan jumlah gunung berapi aktif terbanyak di dunia, sehingga berisiko tinggi terhadap letusan yang dapat menimbulkan dampak serius pada kualitas udara di sekitarnya.

Letusan gunung berapi menghasilkan emisi gas berbahaya seperti sulfur dioksida (SO₂), karbon dioksida (CO₂), dan partikel debu vulkanik yang dapat mengancam kesehatan manusia, merusak lingkungan, dan mengganggu aktivitas masyarakat [1]. Pemantauan kualitas udara secara *real-time* di wilayah terdampak menjadi hal yang sangat penting, terutama menjadi dasar pengungsi yang akan kembali ke tempat tinggalnya. Namun, upaya ini sering terkendala oleh sulitnya akses lokasi dan keterbatasan infrastruktur komunikasi di daerah rawan bencana.

Perkembangan teknologi komunikasi Low Power Wide Area Network (LPWAN), khususnya Long Range (LoRa), menawarkan solusi yang andal untuk pemantauan lingkungan di wilayah terpencil. LoRa memiliki keunggulan dalam jangkauan komunikasi yang jauh dan konsumsi daya yang rendah, sehingga cocok untuk sistem pemantauan jarak jauh dengan infrastruktur terbatas [2].

Penelitian sebelumnya telah memanfaatkan LoRa dan IoT untuk pemantauan kualitas udara di berbagai konteks. Misalnya, penelitian oleh [3] mengembangkan monitoring kualitas udara berbasis sensor gas, sensor suhu dan kelembaban dengan LoRa untuk wilayah perkotaan, sedangkan [4] studi sebelumnya telah mengeksplorasi penerapan teknologi IoT dan jaringan sensor nirkabel untuk pemantauan suhu tanah di zona anomaly termal di gunung Teide (Tenerife). Penelitian lain juga menunjukkan bahwa integrasi LoRa dengan MQTT dapat meningkatkan efisiensi pengiriman data *real time* dalam kondisi keterbatasan infrastruktur jaringan [5].

Berbeda dengan penelitian sebelumnya pengembangan pada penelitian ini lebih diarahkan untuk skenario pasca letusan gunung berapi dengan cakupan pemantauan kualitas udara secara menyeluruh, melibatkan pengukuran multi-parameter (gas berbahaya, suhu, dan kelembapan), penggunaan LoRa *gateway* berbasis ESP32, serta dilengkapi dengan sistem peringatan dini berbasis notifikasi otomatis untuk mendukung pengambilan keputusan cepat di daerah terdampak

II. METODE PENELITIAN

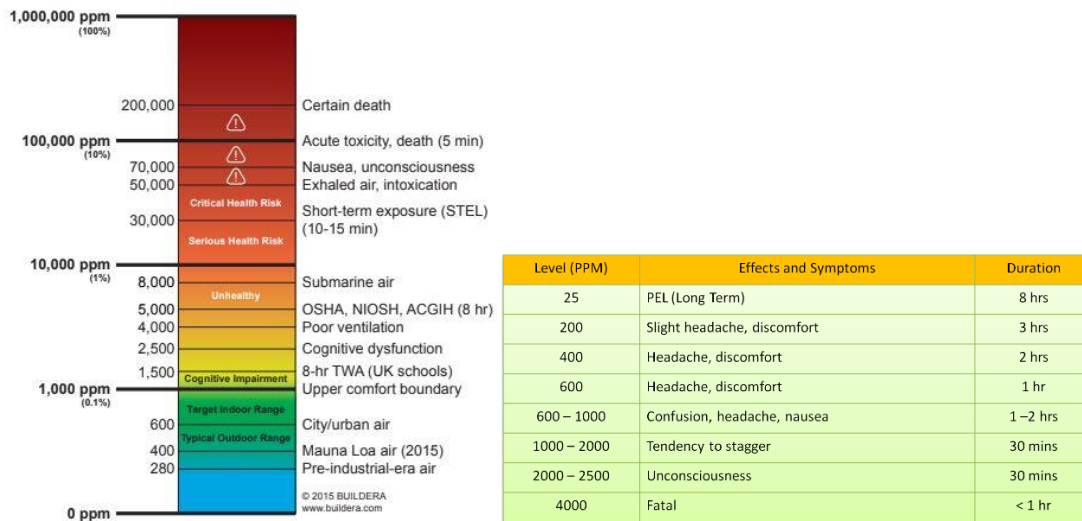
Penelitian ini menggunakan metode eksperimen dengan pendekatan rancang–bangun–uji untuk mengembangkan sistem pemantauan suhu, kelembapan, dan kualitas udara berbasis LoRa *gateway*. Metodologi penelitian dibagi menjadi tiga tahap utama, yaitu perancangan sistem, implementasi, dan pengujian.

Pada tahap perancangan sistem, ditetapkan spesifikasi perangkat keras dan lunak sesuai kebutuhan pemantauan lingkungan di daerah rawan bencana gunung berapi. Sistem dirancang menggunakan node sensor yang dilengkapi dengan DHT22 untuk mengukur suhu dan kelembapan, serta MQ-135 untuk mendeteksi gas berbahaya di udara. Modul komunikasi LoRa RA-02 digunakan untuk mengirimkan data ke *gateway* berbasis ESP32, yang kemudian meneruskan informasi ke server [6],[7].

Tahap implementasi meliputi perakitan komponen utama sesuai rancangan, pemrograman mikrokontroler, dan konfigurasi server Node-RED yang terhubung ke broker MQTT. Dashboard web dibangun untuk menampilkan data pengukuran secara real-time, dengan akses publik melalui layanan tunneling Ngrok [8].

Tahap pengujian dilakukan untuk mengevaluasi akurasi sensor untuk mengukur konsentrasi zat pencemar seperti karbon dioksida (CO₂) dan karbon monoksida (CO) menggunakan satuan parts per million (PPM). Untuk CO₂, konsentrasi normal di udara terbuka berkisar antara 350–450 PPM, dan peningkatan hingga 1000 PPM masih dianggap dapat ditoleransi [9]. Pengujian LoRa mencakup pengukuran Received Signal Strength Indicator (RSSI) pada beberapa variasi jarak dengan kondisi semi-Line of Sight. Nilai RSSI maksimum adalah -30 dBm, semakin mendekati angka minimum -120 dBm maka kualitas sinyal semakin buruk [10]. Analisis dilakukan menggunakan model propagasi log-distance path loss, yang secara teori menyatakan bahwa kekuatan sinyal akan berkurang secara logaritmis seiring bertambahnya jarak antara pemancar dan penerima [11]. Hasil pengujian ini digunakan untuk mengukur performa sistem dalam mentransmisikan data pada jarak yang berbeda.

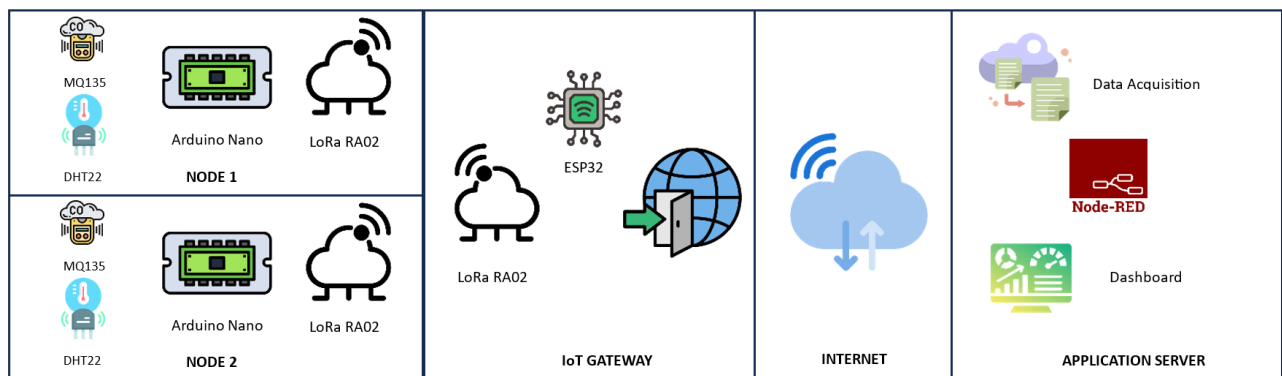
Carbon Dioxide (CO₂) Hazard Scale



Gbr. 1 Infografis Tingkat Bahaya CO₂ dengan standar PPM

III. PERANCANGAN ALAT

Sistem pemantauan kualitas udara pasca letusan gunung berapi ini dirancang untuk memantau parameter suhu, kelembapan, dan konsentrasi gas berbahaya secara real-time dengan memanfaatkan teknologi LoRa Gateway berbasis *Internet of Things* (IoT). Sistem ini menggunakan dua *node transmitter* yang ditempatkan di lokasi berbeda untuk memperluas cakupan pemantauan, serta satu *node receiver* yang berfungsi sebagai *gateway*. Setiap *node transmitter* dilengkapi dengan Arduino Nano yang terhubung dengan sensor MQ-135 untuk deteksi gas berbahaya dan sensor DHT22 untuk mengukur suhu serta kelembapan. Data dari sensor dikirimkan melalui modul LoRa RA-02 menuju ESP32 yang berfungsi sebagai *gateway*. *Gateway* ini kemudian mengirimkan data ke MQTT Broker melalui koneksi Wi-Fi, sehingga informasi dapat divisualisasikan secara real-time melalui dashboard Node-RED. Tampilan dashboard menyediakan grafik, indikator status, dan notifikasi otomatis jika kualitas udara melewati ambang batas yang ditentukan.



Gbr. 2 Blok diagram LoRa Gateway

Proses kerja sistem dimulai dari inisialisasi perangkat keras dan perangkat lunak, kemudian dilanjutkan dengan pembacaan data dari sensor MQ-135 dan DHT22. Data yang telah terbaca diolah dan dikemas dalam format tertentu untuk kemudian dikirimkan menggunakan protokol komunikasi LoRa. Gateway ESP32 menerima data tersebut, memprosesnya, dan meneruskannya ke broker MQTT yang terhubung dengan internet. Node-RED mengambil data dari broker MQTT untuk divisualisasikan dalam bentuk antarmuka grafis yang mudah dipahami pengguna. Alur keseluruhan proses ini digambarkan secara jelas dalam blok diagram sistem pada gambar 2.

Perancangan perangkat keras dilakukan melalui pembuatan skema wiring yang menghubungkan semua komponen utama, mulai dari sensor, mikrokontroler, modul komunikasi LoRa, hingga catu daya. Untuk

memastikan stabilitas dan keandalan sistem, rangkaian prototipe pada breadboard dikembangkan menjadi desain *Printed Circuit Board* (PCB) khusus yang dirancang sesuai kebutuhan *node transmitter* dan *gateway*. Selain itu, dibuat desain kotak pelindung berbasis cetak 3D untuk melindungi perangkat dari debu dan kondisi lingkungan sekitar, seperti ditunjukkan pada gambar 3.



Gbr. 3 Design 3D alat

Pada sisi *transmitter*, kode program mengatur proses pembacaan data sensor MQ-135 dan DHT22, kemudian mengirimkannya melalui modul LoRa. Sementara itu, pada sisi *receiver* atau *gateway*, program mengatur penerimaan data LoRa, koneksi ke jaringan Wi-Fi, dan pengiriman data ke MQTT Broker. Di sisi server, Node-RED diatur untuk menerima data dari broker, mengolahnya, menampilkannya dalam dashboard, serta memicu notifikasi otomatis apabila nilai sensor melebihi ambang batas.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Kerja Sistem

Pengoperasian sistem dimulai dengan menyalakan perangkat transmitter dan receiver, memastikan koneksi jaringan Wi-Fi pada modul ESP32, kemudian menjalankan server Node-RED melalui Command Prompt. Untuk memberikan akses publik, digunakan layanan Ngrok sehingga dashboard Node-RED dapat diakses secara real-time dari luar jaringan lokal. Proses ini memastikan data suhu, kelembapan, dan kualitas udara dapat dipantau secara langsung melalui antarmuka dashboard. Tampilan fisik perangkat ditunjukkan pada Gambar 4.

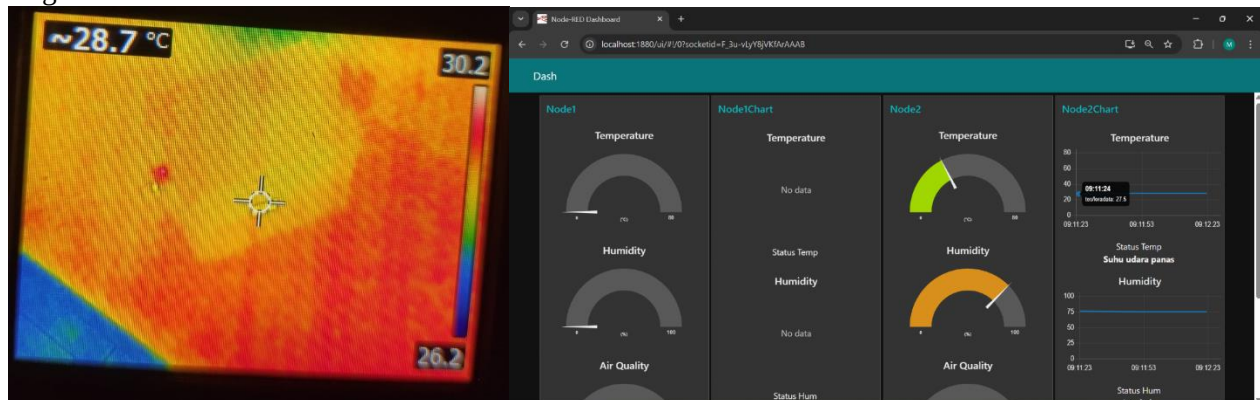


Gbr. 4 Hasil akhir alat

B. Pengujian Alat dalam Mengukur Suhu dan Kualitas Udara

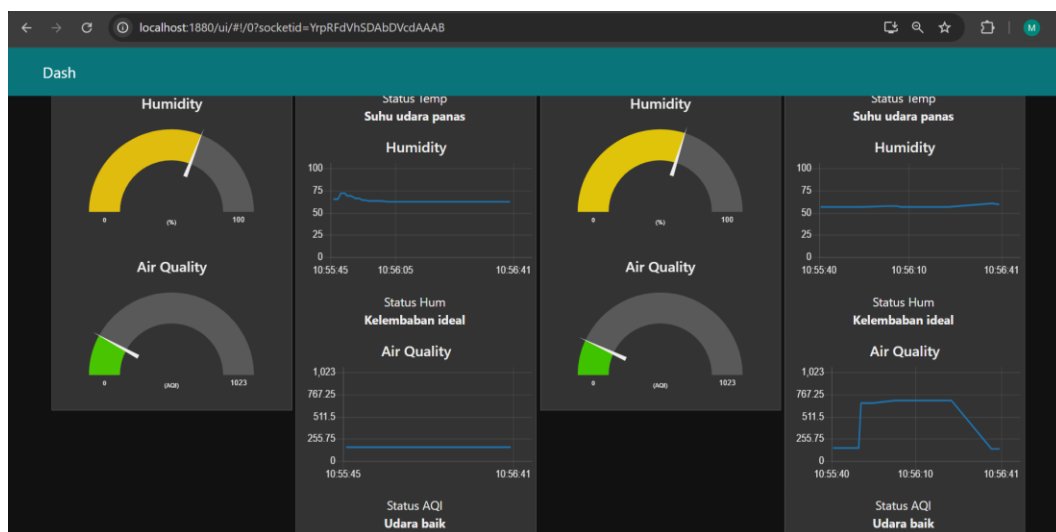
Pengujian suhu dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan sensor DHT22 dengan perangkat eksternal berupa thermal gun. Hasil menunjukkan pembacaan sensor sebesar 27,5 °C dan thermal gun

sebesar 28,7 °C, dengan selisih 1,2 °C yang masih berada pada batas toleransi akurasi $\pm 1-2$ °C, ditunjukkan pada gambar 5.



Gbr. 5 Perbandingan hasil pengukuran dengan theramal gun dan pembacaan alat

Sedangkan pengujian kualitas udara menggunakan sensor MQ-135 berdasarkan hasil pembacaan kualitas udara yang diperoleh dari alat pemantau seperti terlihat pada gambar 6, berdasarkan tingkat kepadatan asap yang divariasikan menjadi tiga kategori, yaitu asap rendah, asap sedang, dan asap tinggi. Pengujian pada masing-masing kategori dengan rentang kenaikan konsentrasi gas sebesar 86–1000 PPM, yang masih berada dalam ambang batas paparan jangka pendek terhadap karbon dioksida (CO₂).



Gbr. 6 Pembacaan kualitas udara dari alat

Hasil pengujian dirangkum pada Tabel 1, yang menunjukkan bahwa waktu respon rata-rata sensor semakin cepat seiring meningkatnya konsentrasi asap.

TABEL I
TABEL PENGUJIAN SENSOR MQ-135

Pengujian	Kenaikan PPM	Tingkat Pengujian (detik)		
		Asap Rendah	Asap Sedang	Asap Tinggi
1	86 - 1000	27,39	22,79	17,55
2		26,20	22,17	17,11
3		25,13	21,56	16,78
4		25,78	20,23	16,46

5		25,56	21,11	16,79
6		24,98	21,56	16,88
7		25,76	22,11	16,57
8		26,23	22,56	17,98
9		25,30	21,77	16,23
10		25,66	21,89	16,66
Rata-rata		25,80	21,77	16,90

C. Pengujian Long Range

Pengujian ini dilakukan di jalur sepanjang 1.9 km pada kondisi lingkungan terbuka. yang secara geografis tergolong area perkotaan terbuka dengan sedikit hambatan visual (*semi-Line of Sight*). Lingkungan ini dipilih untuk mensimulasikan kondisi nyata di mana wilayah terdampak letusan mengalami kerusakan infrastruktur, vegetasi yang terbakar, serta ruang terbuka yang luas, sehingga relevan untuk menguji keandalan komunikasi LoRa dalam skenario bencana. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa nilai RSSI menurun secara bertahap dari -71 dBm pada jarak 138 meter hingga -118 dBm pada jarak 1.903 meter. Data hasil pengujian disajikan pada Tabel 2.

TABEL II
PENGUJIAN LONG RANGE

No	Jarak (m)	RSSI Node 1 (dBm)	RSSI Node 2 (dBm)
1	138	-71	-72
2	252	-78.4	-76.8
3	355	-83	-84
4	495	-88.2	-89
5	588	-92	-90.8
6	822	-95.8	-97
7	1.06	-101	-102
8	1.214	-107	-107
9	1.363	-109	-109
10	1.696	-115	-115
11	1.903	-118	-118

Hasil pengujian di atas menunjukkan bahwa sistem tetap andal digunakan untuk komunikasi jarak jauh di wilayah terdampak bencana, meskipun jangkauan LoRa hanya mencapai 1,9 km. Keandalan tersebut didukung oleh penggunaan gateway yang berperan menampilkan data secara langsung melalui website.

V. PENUTUP

Penelitian ini berhasil merancang dan mengimplementasikan sistem pemantauan suhu, kelembapan, dan kualitas udara berbasis LoRa Gateway yang dapat diakses secara real-time melalui dashboard berbasis web. Dari hasil pengujian, sistem menunjukkan kinerja yang andal dan akurat. Sensor DHT22 mampu mengukur suhu dengan selisih hanya $\pm 1,2$ °C dibandingkan alat ukur pembanding, sedangkan sensor MQ-135 merespons perubahan kualitas udara dengan waktu deteksi yang semakin cepat seiring meningkatnya konsentrasi asap. Modul komunikasi LoRa RA-02 mampu mentransmisikan data hingga jarak 1,9 km pada kondisi semi-Line of Sight, yang berpotensi berkurang jaraknya apabila memperhitungkan perbedaan kontur ketinggian di pegunungan.

Dalam implementasinya penggunaan repeater atau pengembangan sistem LoRa berbasis Mesh dibutuhkan untuk kestabilan komunikasi di medan ekstrem serta mengatasi keterbatasan jangkauan LoRa, dimana jarak aman bagi pengungsi gunung berapi bervariasi antara 5-20 Km. Penambahan sensor pendeteksi getaran seperti accelerometer atau geophone diusulkan agar sistem ini dapat diimplementasikan untuk mitigasi bencana dan pemantauan kondisi lingkungan secara holistik dan berkelanjutan.

REFERENSI

- [1] International Volcanic Health Hazard Network (IVHHN), “Health impacts of volcanic gases,” 2021. [Online]. Available: <https://www.ivhnn.org/information/health-impacts-volcanic-gases>
- [2] R. S. Adji and H. Nurwasito, “Pengembangan sistem pengiriman data menggunakan LoRa multipoint menggunakan simple LoRa protokol sebagai kontrol kebakaran kandang ayam,” *Jurnal Pengembangan Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer*, vol. 6, no. 4, pp. 1984–1993, Apr. 2022.
- [3] M. Fadhli, A. Asriyadi, L. Lindawati, A. N. Hidayat, and D. Darmawan, “Low Cost Air Quality Monitoring System Using LoRa Communication Technology,” *Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknologi Informasi (JNTETI)*, vol. 11, no. 1, pp. 1–8, 2022.
- [4] S. Awadallah, D. Moure, and P. Torres-González, “An Internet of Things (IoT) Application on Volcano Monitoring,” *Sensors*, vol. 19, no. 21, p. 4651, 2019.
- [5] K. Nakamura, P. Manzoni, M. Zennaro, J.-C. Cano, and C. T. Calafate, “Integrating an MQTT Proxy in a LoRa-Based Messaging System for Generic Sensor Data Collection BT - Ad-Hoc, Mobile, and Wireless Networks,” L. A. Grieco, G. Boggia, G. Piro, Y. Jararweh, and C. Campolo, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 282–294.
- [6] P. M. Ridwan, *Alat ukur kualitas udara berbasis mikrokontroler ATmega328*, Doctoral dissertation, Politeknik Negeri Padang, 2016.
- [7] F. Puspasari, T. P. Satya, U. Y. Oktawati, I. Fahrurrozi, and H. Prisyanti, “Analisis akurasi sistem sensor DHT22 berbasis Arduino terhadap thermohygrometer standar,” *Jurnal Fisika dan Aplikasinya*, vol. 16, no. 1, pp. 40–45, 2020.
- [8] M. Z. S. Sirait, E. Sonalitha, and W. Dirgantara, “Kontrol prototipe ruang monitoring kesehatan berbasis Node-RED,” *Jurnal Teknik Elektro dan Komputer TRIAC*, vol. 9, no. 2, pp. 135–140, 2022.
- [9] S. Morawska et al., “The relation between CO₂ and indoor air quality in schools and offices: A critical review,” *Science of The Total Environment*, vol. 856, no. 2, p. 159098, 2023.
- [10] K. Benkic, M. Malajner, P. Planinsic, and Z. Cucej, “Using RSSI value for distance estimation in wireless sensor networks based on ZigBee,” in *2008 15th International Conference on Systems, Signals and Image Processing*, 2008, pp. 303–306.
- [11] B. B. Rijadi and A. R. Machdi, *Distance testing on point-to-point communication with LoRa based on RSSI and log normal shadowing model*, *Jurnal Energy and Electrical Engineering*, vol. 5, no. 2, pp. 89–93, Apr. 2024.