

Sistem Pemantauan Kualitas Udara Real-Time Berbasis IoT Menggunakan WSN 4 Node

Yohanes Sunardi Pai, Aries Boedi Setiawan*, Elta Sonalitha

Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Merdeka Malang, Indonesia
Jl. Terusan Raya Dieng No. 62-64, Karangbesuki, Kec. Sukun, Kota Malang
E-mail: aries@unmer.ac.id

Naskah Masuk: 08 Juni 2026; Diterima: 02 September 2026; Terbit: 30 September 2026

ABSTRAK

Abstrak— Penelitian ini bertujuan merancang dan membangun sistem pemantauan kualitas udara *real-time* berbasis *Internet of Things* (IoT) menggunakan *Wireless Sensor Network* (WSN) empat *node*. Sistem memantau parameter suhu, kelembapan, karbon monoksida (CO), dan karbon dioksida (CO₂) menggunakan sensor DHT22, MQ-7, dan MQ-135. Data dari masing-masing *node* dikirim menggunakan protokol ESP-NOW menuju ESP32-S3 sebagai *master*, kemudian diteruskan ke ThingSpeak untuk visualisasi dan pemantauan data serta Telegram Bot sebagai media notifikasi. Hasil pengujian komunikasi menunjukkan bahwa sistem mampu mengirimkan data dari empat *node* menuju *master* hingga jarak maksimum 40 meter dengan *packet loss* sebesar 0%. Data dari seluruh *node* berhasil diterima oleh *master* dan diteruskan ke ThingSpeak secara *real-time*. Sistem juga mampu memberikan notifikasi melalui Telegram Bot ketika parameter kualitas udara melebihi nilai ambang batas yang telah ditentukan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem dapat melakukan pemantauan kualitas udara pada beberapa titik secara bersamaan dan mendukung penyampaian informasi kondisi lingkungan secara *real-time*. Sistem yang dikembangkan dapat menjadi solusi pemantauan kualitas udara dalam ruangan berbasis IoT dengan arsitektur WSN empat *node*.

Kata kunci: *Internet of Things*, *Wireless Sensor Network*, ESP-NOW, Kualitas Udara, ESP32-S3, ThingSpeak, Telegram.

ABSTRACT

Abstract— This study aims to design and develop a real-time indoor air quality monitoring system based on the Internet of Things (IoT) using a four-node Wireless Sensor Network (WSN). The system monitors temperature, humidity, carbon monoxide (CO), and carbon dioxide (CO₂) using DHT22, MQ-7, and MQ-135 sensors. Data from each sensor node are transmitted using the ESP-NOW protocol to an ESP32-S3 acting as the master, and then forwarded to ThingSpeak for data visualization and monitoring, while Telegram Bot is used as a notification medium. The communication test results show that the system successfully transmitted data from four sensor nodes to the master over a maximum distance of 40 meters with a packet loss of 0%. Data from all nodes were successfully received by the master and forwarded to ThingSpeak in real time. The system also successfully generated Telegram notifications when the monitored air quality parameters exceeded the predetermined threshold values. The test results demonstrate that the developed system is capable of monitoring indoor air quality simultaneously at multiple measurement points and providing real-time environmental information. The developed system can serve as an IoT-based indoor air quality monitoring solution using a four-node WSN architecture.

Keywords: *Internet of Things*, *Wireless Sensor Network*, ESP-NOW, Air Quality, ESP32-S3, ThingSpeak, Telegram.

Copyright © 2026 Jurnal Teknik Elektro dan Komputasi (ELKOM)

1. PENDAHULUAN

Polusi udara merupakan salah satu permasalahan lingkungan yang dapat memengaruhi kesehatan, kenyamanan, dan produktivitas manusia [1]. Kondisi udara yang tidak baik, baik di lingkungan luar maupun dalam ruangan, dapat meningkatkan risiko gangguan kesehatan sehingga kualitas udara dalam ruangan (*Indoor Air Quality*) perlu mendapat perhatian [2], [3]. Mengingat aktivitas manusia banyak dilakukan di dalam ruangan, diperlukan sistem yang mampu memantau kondisi kualitas udara secara berkelanjutan serta memberikan informasi kondisi lingkungan secara cepat [4]. Perkembangan teknologi *Internet of Things* (IoT) memberikan peluang dalam pengembangan sistem pemantauan lingkungan yang dapat bekerja secara *real-time* dan memungkinkan data diakses melalui jaringan internet [3].

Penerapan *Wireless Sensor Network* (WSN) memungkinkan sejumlah node sensor ditempatkan pada beberapa titik pengamatan sehingga data kondisi lingkungan dapat diperoleh secara terdistribusi [5]. Penggunaan beberapa node tersebut dapat memberikan informasi yang lebih representatif dibandingkan sistem yang hanya melakukan pengukuran pada satu titik. Oleh karena itu, kombinasi IoT dan WSN dapat

diterapkan untuk membangun sistem pemantauan kualitas udara yang mampu mengamati kondisi lingkungan pada beberapa lokasi secara bersamaan.[6][7]

Penelitian mengenai pemantauan kualitas udara berbasis IoT telah dilakukan dengan menggunakan berbagai jenis sensor dan metode komunikasi [7]. Sensor DHT22 digunakan untuk memperoleh data suhu dan kelembapan, sedangkan sensor MQ-7 dan MQ-135 dapat digunakan untuk mendeteksi gas karbon monoksida (CO) dan karbon dioksida (CO₂) [8], [9]. Penelitian berbasis WSN juga telah menunjukkan penerapan beberapa node sensor untuk melakukan pemantauan lingkungan secara terdistribusi [7]. Berdasarkan penelitian terdahulu, penelitian ini mengembangkan sistem pemantauan kualitas udara menggunakan empat *node* sensor yang terhubung langsung ke satu *master*, dengan mengintegrasikan komunikasi ESP-NOW, pemantauan berbasis *cloud*, dan notifikasi otomatis.

Pemilihan teknologi komunikasi menjadi salah satu aspek penting dalam perancangan WSN karena harus disesuaikan dengan jumlah node, jarak komunikasi, ukuran data, serta kondisi area pengujian. Pada penelitian ini digunakan ESP-NOW sebagai media komunikasi antara node sensor dan ESP32-S3 *master*. ESP-NOW dipilih karena mendukung komunikasi langsung antarperangkat ESP32 dengan data sensor yang relatif kecil dan sesuai untuk sistem yang menggunakan satu *master* sebagai pusat pengumpulan data. Berbeda dengan ESP-MESH yang memungkinkan komunikasi antar-node melalui jaringan *mesh* dan dapat digunakan untuk membangun jaringan dengan cakupan yang lebih luas, ESP-NOW memungkinkan setiap node mengirimkan data secara langsung kepada *master* sehingga struktur jaringan yang digunakan lebih sederhana. Sementara itu, *LoRa* lebih sesuai untuk kebutuhan komunikasi dengan jangkauan yang lebih jauh, sedangkan *Zigbee* umumnya digunakan pada jaringan perangkat dengan kebutuhan komunikasi dan ekosistem yang berbeda. Dengan mempertimbangkan jumlah empat node, jarak pengujian hingga 40 meter, ukuran data sensor yang relatif kecil, dan kebutuhan komunikasi langsung menuju satu *master*, ESP-NOW dipilih sebagai teknologi komunikasi yang sesuai untuk sistem yang dikembangkan [10],[11],[12].

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan merancang dan membangun sistem pemantauan kualitas udara *real-time* berbasis IoT menggunakan WSN dengan empat node sensor. Setiap node menggunakan sensor DHT22 untuk mengukur suhu dan kelembapan, MQ-7 untuk mendeteksi CO, serta MQ-135 untuk mendeteksi CO₂. Data dari setiap node dikirim melalui ESP-NOW menuju ESP32-S3 sebagai *master*, kemudian diteruskan ke ThingSpeak untuk visualisasi dan pemantauan data serta Telegram sebagai media notifikasi. Kontribusi penelitian ini berupa penerapan WSN empat node untuk melakukan pemantauan kualitas udara pada beberapa titik secara bersamaan dengan komunikasi ESP-NOW serta integrasi sistem pemantauan *real-time* dan notifikasi otomatis. Kebaruan penelitian ini terletak pada pengintegrasian empat node sensor, ESP-NOW, ESP32-S3 sebagai *master*, ThingSpeak, dan Telegram dalam satu sistem pemantauan kualitas udara dalam ruangan.

2. KAJIAN PUSTAKA

2.1. *Internet of Things* (IoT)

Internet of Things (IoT) merupakan teknologi yang memungkinkan berbagai perangkat elektronik saling terhubung melalui jaringan internet untuk melakukan pertukaran data secara otomatis. Dengan adanya IoT, proses pengumpulan, pengolahan, dan penyampaian informasi dapat dilakukan secara *real-time* tanpa memerlukan interaksi manusia secara langsung. Teknologi ini banyak diterapkan pada sistem monitoring lingkungan karena mampu menyediakan akses data yang cepat dan mudah dari berbagai lokasi [13].

2.2. *Wireless Sensor Network* (WSN)

Wireless Sensor Network (WSN) adalah jaringan yang terdiri dari sejumlah node sensor yang berkomunikasi secara nirkabel untuk melakukan pengukuran dan pengiriman data dari lingkungan sekitar. Penggunaan WSN memberikan kemudahan dalam proses pemantauan karena sensor dapat ditempatkan pada beberapa lokasi tanpa memerlukan instalasi kabel yang kompleks. Selain itu, WSN mampu meningkatkan cakupan area pengamatan sehingga data yang diperoleh menjadi lebih representatif [7].

2.3. *Sensor DHT22*

Sensor DHT22 merupakan sensor digital yang digunakan untuk mengukur suhu dan kelembapan udara. Sensor ini banyak digunakan pada sistem monitoring lingkungan karena memiliki tingkat akurasi yang cukup baik serta mampu menghasilkan data pengukuran secara stabil. Data yang diperoleh dari sensor DHT22 dapat digunakan untuk mengetahui kondisi termal suatu ruangan atau lingkungan pengamatan [8].

2.4. *Sensor MQ-7*

Sensor digunakan untuk mendeteksi keberadaan gas karbon monoksida (CO) di udara. Sensor ini bekerja dengan memanfaatkan perubahan karakteristik material sensitif terhadap konsentrasi gas yang terdeteksi. Nilai keluaran sensor kemudian diolah oleh mikrokontroler untuk menghasilkan informasi

konsentrasi karbon monoksida dalam satuan ppm sehingga dapat digunakan sebagai indikator tingkat pencemaran udara [14].

2.5. *Sensor MQ-135*

Sensor MQ-135 merupakan sensor gas yang banyak digunakan dalam sistem pemantauan kualitas udara. Sensor ini mampu mendeteksi berbagai jenis gas, termasuk karbon dioksida (CO₂), amonia, dan beberapa senyawa kimia lainnya. Pada penelitian ini, sensor MQ-135 dimanfaatkan untuk mengukur konsentrasi karbon dioksida sebagai salah satu parameter utama dalam penilaian kualitas udara [1].

2.6. *ESP-NOW*

ESP-NOW merupakan protokol komunikasi nirkabel yang dikembangkan oleh *Espressif* untuk perangkat berbasis ESP32 dan ESP8266. Protokol ini memungkinkan pertukaran data secara langsung antarperangkat tanpa memerlukan *access point* atau router. ESP-NOW dapat diterapkan pada sistem *Wireless Sensor Network* berbasis ESP32 untuk mendukung komunikasi antar-*node* [10], [15].

2.7. *ThingSpeak*

ThingSpeak merupakan platform *cloud* untuk aplikasi *Internet of Things* (IoT) yang dapat digunakan untuk mengumpulkan, menyimpan, memvisualisasikan, dan menganalisis data yang dikirimkan oleh perangkat secara *real-time*. Data sensor yang dikirim ke *ThingSpeak* dapat disimpan dalam *channel* dan ditampilkan dalam bentuk grafik sehingga pengguna dapat memantau data dari jarak jauh melalui jaringan internet [16].

2.8. *Telegram Bot*

Telegram Bot merupakan layanan otomatis yang tersedia pada aplikasi Telegram dan dapat digunakan untuk mengirimkan informasi kepada pengguna secara langsung. Dalam penelitian ini, Telegram Bot dimanfaatkan sebagai media notifikasi ketika parameter kualitas udara melebihi nilai ambang batas yang telah ditentukan sehingga pengguna dapat segera mengetahui perubahan kondisi lingkungan yang terjadi [17].

2.9. *Penelitian Terdahulu*

Penelitian terdahulu digunakan sebagai dasar dalam pengembangan sistem pemantauan kualitas udara berbasis *Internet of Things* (IoT) dan *Wireless Sensor Network* (WSN). Beberapa penelitian yang memiliki keterkaitan dengan penelitian ini adalah sebagai berikut.

- a. **Budianto dan Sumanto (2024)** mengembangkan sistem monitoring kualitas udara dalam ruangan berbasis IoT. Sistem mampu melakukan pemantauan kualitas udara secara jarak jauh dan *real-time*, dengan data hasil pengukuran dikirimkan ke *database* dan ditampilkan melalui *website*. Penelitian ini menunjukkan bahwa IoT dapat digunakan untuk mendukung pemantauan kualitas udara dalam ruangan. Perbedaannya dengan penelitian ini terletak pada penggunaan beberapa *node* sensor yang ditempatkan pada beberapa titik pengamatan [3].
- b. **Silvia dkk. (2020)** mengembangkan *Wireless Sensor Network* menggunakan teknologi multisensor untuk sistem monitoring kualitas udara. Sistem tersebut menggunakan beberapa *node* untuk melakukan pemantauan pada lokasi yang berbeda dan mampu menampilkan data kondisi udara secara *real-time*. Penelitian ini menjadi acuan dalam penerapan beberapa *node* untuk memperoleh data kualitas udara secara terdistribusi. Penelitian ini mengembangkan konfigurasi tersebut menjadi empat *node* sensor dengan ESP32-S3 sebagai *master* [18].
- c. **Muttaqin dkk. (2024)** mengembangkan sistem pemantauan kualitas udara berbasis IoT menggunakan ESP32, sensor DHT11, dan MQ-135. Data suhu, kelembapan, dan gas dikirim melalui jaringan Wi-Fi dan ditampilkan secara *real-time* menggunakan Blynk. Penelitian tersebut menunjukkan penerapan mikrokontroler, sensor lingkungan, dan platform IoT untuk pemantauan kualitas udara. Perbedaannya, penelitian ini menggunakan sensor DHT22, MQ-7, dan MQ-135 serta menerapkan komunikasi ESP-NOW pada empat *node* sensor [19].
- d. **Taufik dkk. (2024)** mengembangkan sistem monitoring kualitas udara dalam ruangan menggunakan sensor MQ-7 untuk parameter CO, MQ-135 untuk CO₂, dan GP2Y1010AU0F untuk partikel debu. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sensor tersebut dapat digunakan untuk memperoleh informasi mengenai parameter kualitas udara. Penelitian ini memiliki kesamaan dalam penggunaan sensor MQ-7 dan MQ-135, sedangkan penelitian yang dilakukan menggunakan empat *node* sensor yang mengirimkan data melalui ESP-NOW menuju satu *master* [20].
- e. **Kurniawaty dkk. (2024)** menerapkan teknologi IoT dalam sistem pemantauan kualitas udara di Politeknik Negeri Bengkalis dengan mengintegrasikan NodeMCU dan sensor MQ serta *dashboard* berbasis web. Sistem mampu memberikan informasi kualitas udara secara *real-time* melalui jaringan internet. Penelitian ini menjadi acuan dalam penerapan IoT untuk pemantauan kualitas udara, sedangkan penelitian ini mengembangkan sistem dengan mengintegrasikan WSN empat *node*, komunikasi ESP-NOW, *ThingSpeak*, dan Telegram.[13]

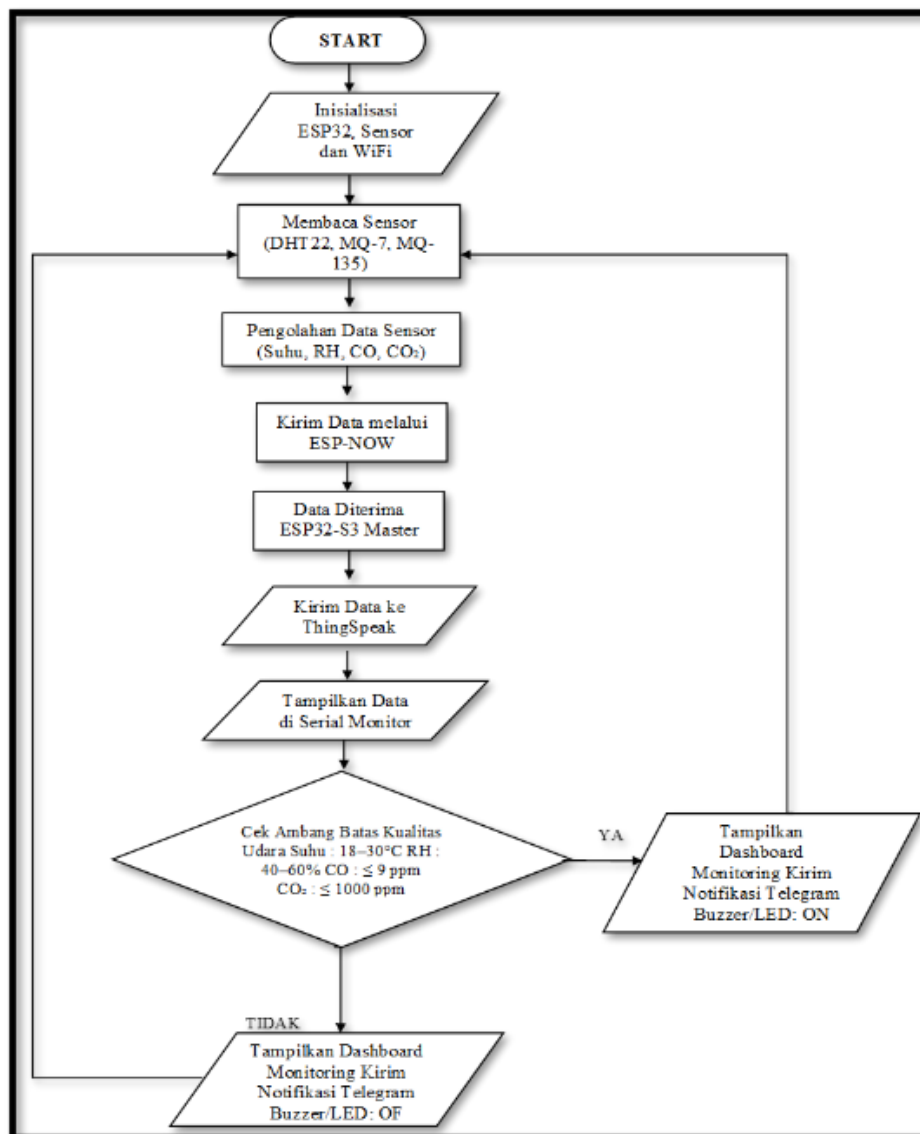
3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menerapkan metode perancangan dan pengembangan sistem pemantauan kualitas udara berbasis *Internet of Things* (IoT) dengan memanfaatkan teknologi *Wireless Sensor Network* (WSN). Sistem dirancang untuk melakukan pengukuran dan pemantauan kondisi kualitas udara secara *real-time* melalui empat *node* sensor yang saling terhubung menggunakan komunikasi nirkabel berbasis ESP-NOW. Parameter yang diamati dalam penelitian ini meliputi suhu udara, kelembapan udara, konsentrasi karbon monoksida (CO), dan karbon dioksida (CO₂). Pengukuran dilakukan menggunakan sensor DHT22, MQ-7, dan MQ-135 yang terpasang pada masing-masing node sensor. Data hasil pengukuran kemudian dikirim menuju ESP32-S3 yang berfungsi sebagai node master untuk diproses dan diteruskan ke platform ThingSpeak sebagai media monitoring dan penyimpanan data.

Selain menampilkan data secara *real-time*, sistem juga dilengkapi dengan fitur notifikasi berbasis Telegram Bot yang berfungsi memberikan peringatan kepada pengguna ketika nilai parameter kualitas udara melebihi batas yang telah ditentukan. Tahapan penelitian meliputi perancangan sistem, perancangan perangkat keras (*hardware*), perancangan perangkat lunak (*software*), perancangan mekanik perangkat, implementasi sistem, serta pengujian terhadap kinerja komunikasi dan monitoring data. Seluruh tahapan tersebut dilakukan untuk memastikan sistem dapat beroperasi dengan baik sesuai dengan tujuan penelitian yang telah ditetapkan.

a. Flowchart Sistem

Gambar 1. menunjukkan alur kerja sistem pemantauan kualitas udara berbasis *Internet of Things* (IoT) menggunakan *Wireless Sensor Network* (WSN).



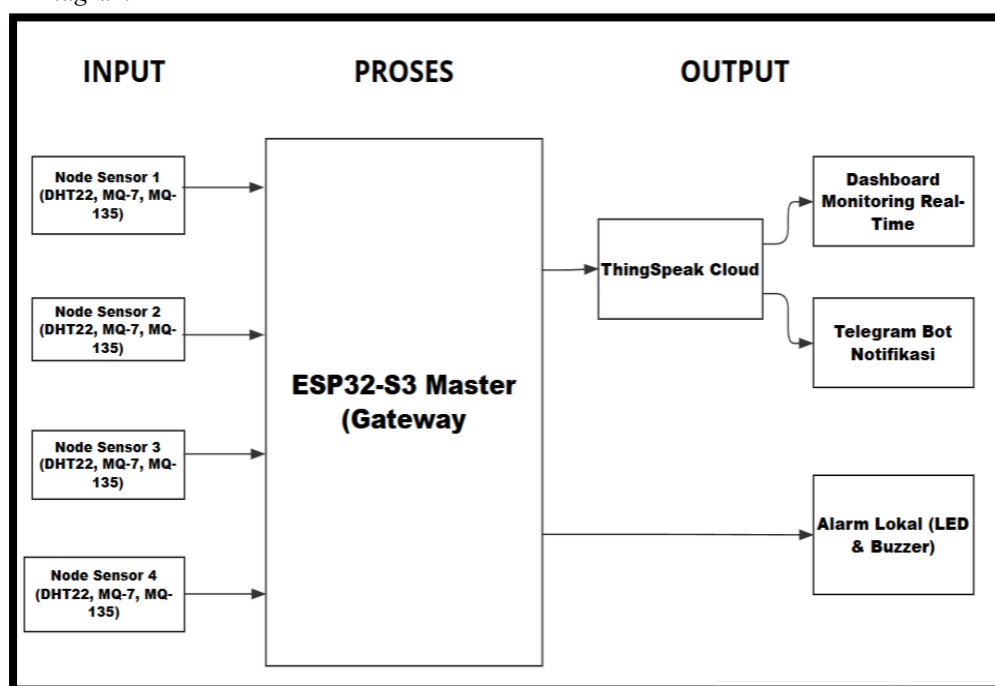
Gambar 1. Flowchart Sistem

Proses diawali dengan inisialisasi ESP32, sensor DHT22, MQ-7, MQ-135, dan koneksi WiFi. Setelah inisialisasi selesai, sistem membaca parameter suhu, kelembapan (RH), karbon monoksida (CO), dan karbon dioksida (CO₂). Data hasil pembacaan kemudian diolah dan dikirim melalui komunikasi ESP-NOW menuju ESP32-S3 Master. Selanjutnya, ESP32-S3 Master menerima data dari seluruh node sensor, menampilkan data pada Serial Monitor, dan meneruskannya ke platform ThingSpeak untuk pemantauan. Data yang diterima kemudian dibandingkan dengan nilai ambang batas kualitas udara yang telah ditentukan, yaitu suhu 18–30°C, kelembapan 40–60% RH, CO ≤ 9 ppm, dan

CO₂ ≤ 1000 ppm. Jika parameter berada dalam kondisi yang ditentukan, data tetap ditampilkan pada dashboard monitoring, sedangkan Telegram tidak mengirimkan notifikasi dan *buzzer*/*LED* berada dalam kondisi OFF. Sebaliknya, jika salah satu parameter melebihi nilai ambang batas, data tetap ditampilkan pada dashboard, kemudian sistem mengirimkan notifikasi melalui Telegram dan mengaktifkan *buzzer* serta *LED* sebagai indikator peringatan.

Proses tersebut berlangsung secara berulang sehingga sistem dapat melakukan pemantauan kualitas udara secara *real-time* dan memberikan peringatan secara otomatis ketika terdeteksi parameter yang melebihi nilai ambang batas.

b. Blok Diagram Sistem

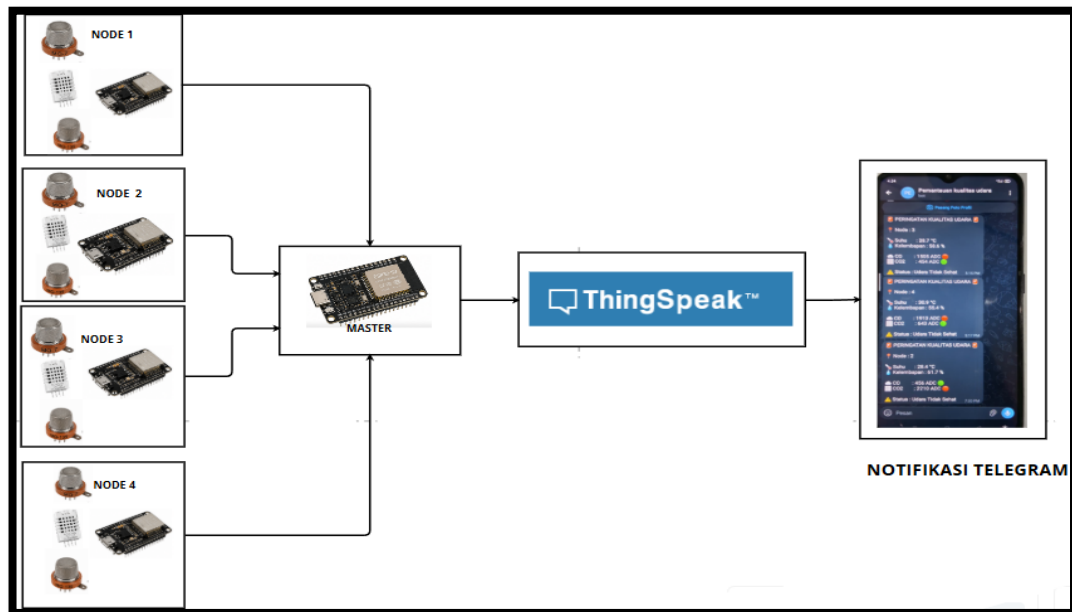


Gambar 2. Blok Diagram Sistem

Gambar 2. menunjukkan rancangan sistem pemantauan kualitas udara berbasis *Internet of Things* (IoT) menggunakan jaringan *Wireless Sensor Network* (WSN). Sistem terdiri atas empat node sensor dan satu ESP32-S3 yang berfungsi sebagai *master* atau *gateway*. Secara umum, sistem terbagi menjadi tiga bagian utama, yaitu input, proses, dan output. Pada bagian input, setiap node sensor dilengkapi dengan sensor DHT22 untuk mengukur suhu dan kelembapan, MQ-7 untuk mendeteksi karbon monoksida (CO), dan MQ-135 untuk mendeteksi karbon dioksida (CO₂). Data hasil pengukuran dari setiap sensor dibaca dan diproses oleh ESP32 pada masing-masing node. Pada bagian proses, data dari keempat node sensor dikirimkan ke ESP32-S3 *master* melalui komunikasi ESP-NOW. ESP32-S3 menerima dan mengumpulkan data dari seluruh node, kemudian meneruskannya melalui jaringan WiFi ke platform ThingSpeak untuk penyimpanan dan visualisasi data. Pada bagian output, data ditampilkan pada dashboard ThingSpeak secara *real-time* sehingga kondisi kualitas udara dapat dipantau. Sistem juga terintegrasi dengan Telegram Bot untuk mengirimkan notifikasi apabila parameter kualitas udara melebihi ambang batas yang telah ditentukan. Dengan demikian, sistem memungkinkan pemantauan kualitas udara pada beberapa titik secara bersamaan melalui jaringan WSN dan platform IoT.

c. Arsitektur jaringan WSN

Arsitektur jaringan WSN pada Gambar 3. menggunakan topologi star yang terdiri atas empat node sensor dan satu ESP32-S3 Master.



Gambar 3. Arsitektur jaringan WSN

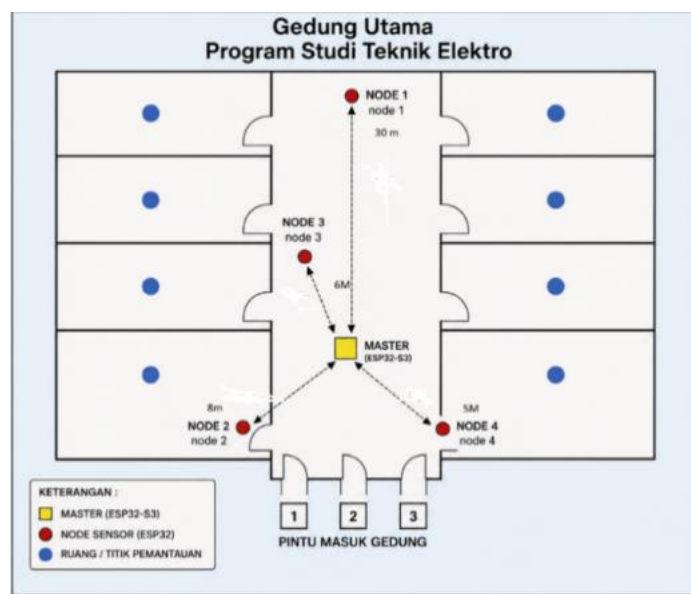
Setiap node sensor menggunakan ESP32 sebagai mikrokontroler dan dilengkapi sensor DHT22, MQ-7, dan MQ-135 untuk memperoleh data suhu, kelembapan, CO, dan CO₂. Masing-masing node memiliki Node ID yang berbeda sehingga data yang diterima oleh Master dapat diidentifikasi berdasarkan sumbernya. Data dari Node 1, Node 2, Node 3, dan Node 4 dikirimkan secara langsung menuju ESP32-S3 Master menggunakan protokol ESP-NOW. Master berfungsi sebagai pusat pengumpulan dan pengolahan data dari seluruh node. Setelah data diterima, ESP32-S3 Master meneruskan data melalui koneksi WiFi ke platform ThingSpeak untuk penyimpanan dan visualisasi, serta menggunakan Telegram sebagai media notifikasi ketika kondisi kualitas udara melebihi ambang batas yang ditentukan. Data dari empat node sensor dikirimkan ke ESP32-S3 Master menggunakan protokol ESP-NOW dengan struktur *payload struct_message*. Struktur *payload* yang digunakan terdiri atas lima data utama, yaitu *nodeID*, suhu, kelembapan, co, dan co₂. Setiap node menggunakan struktur *payload* yang sama, tetapi memiliki nilai *nodeID* yang berbeda, yaitu Node 1, Node 2, Node 3, dan Node 4. Dengan adanya *nodeID*, ESP32-S3 Master dapat mengidentifikasi sumber data yang diterima dari masing-masing node. Pada sisi node, hasil pembacaan sensor dimasukkan ke dalam struktur dataKirim, kemudian dikirimkan menggunakan fungsi *esp_now_send()* menuju alamat ESP32-S3 Master. Dengan demikian, data dari setiap node dikirim dalam format *payload* yang seragam. Pada sisi Master, data yang diterima kemudian dikelompokkan berdasarkan *nodeID* sehingga data Node 1, Node 2, Node 3, dan Node 4 dapat diproses dan ditampilkan secara terpisah. Master selanjutnya meneruskan data tersebut ke ThingSpeak untuk visualisasi dan menggunakan data tersebut sebagai dasar proses notifikasi Telegram serta pengaktifan *LED* dan *buzzer*.

d. Penempatan Perangkat pada Lingkungan Implementasi

Gambar 4. Menunjukkan penempatan perangkat sistem pemantauan kualitas udara di lorong Gedung Utama Program Studi Teknik Elektro Universitas Merdeka Malang. Lokasi tersebut dipilih karena merupakan area yang sering dilalui dan digunakan sebagai tempat berkumpul mahasiswa maupun dosen, sehingga dapat merepresentasikan kondisi kualitas udara dalam ruangan.

Pada implementasi sistem, ESP32-S3 Master ditempatkan pada bagian lorong sisi kanan bawah, sesuai dengan titik berwarna kuning pada Gambar 4. Empat *node* sensor ditempatkan pada beberapa titik pengamatan di sepanjang lorong. Node 1 ditempatkan di lorong bagian bawah sisi kiri dengan jarak sekitar 30 meter dari Master, Node 2 di lorong bagian bawah sisi kanan dengan jarak sekitar 5 meter, Node 3 di lorong bagian tengah dengan jarak sekitar 6 meter, dan Node 4 di lorong bagian atas dengan jarak sekitar 8 meter dari Master.

Penempatan node pada beberapa titik bertujuan memperoleh data kualitas udara dari lokasi dengan karakteristik aktivitas yang berbeda. Setiap node mengukur suhu, kelembapan, CO, dan CO₂, kemudian mengirimkan data secara nirkabel menggunakan ESP-NOW menuju ESP32-S3 Master. Selanjutnya, Master meneruskan data melalui WiFi ke ThingSpeak untuk pemantauan secara *real-time* dan mengirimkan notifikasi melalui Telegram apabila parameter kualitas udara melebihi ambang batas yang telah ditentukan.



Gambar 4. Tata Letak Titik Peletakan Sensor

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Implementasi Sistem

Pada tahap ini dilakukan implementasi sistem pemantauan kualitas udara berbasis *Internet of Things* (IoT) menggunakan *Wireless Sensor Network* (WSN) empat node. Setiap *node* sensor dilengkapi dengan sensor DHT22, MQ-7, dan MQ-135 yang terhubung dengan mikrokontroler ESP32. Data hasil pengukuran dari setiap *node* dikirim menuju ESP32-S3 sebagai *master* menggunakan protokol ESP-NOW.



Gambar 5. Implementasi Perangkat WSN 4 Node

Gambar 1 menunjukkan hasil implementasi perangkat yang terdiri atas empat *node* sensor dan satu *node master*. Hasil implementasi menunjukkan bahwa seluruh komponen dapat terintegrasi sesuai dengan rancangan, sehingga setiap *node* dapat melakukan pembacaan parameter suhu, kelembapan, CO, dan CO₂ serta mengirimkan data menuju *master*. ESP32-S3 kemudian berfungsi sebagai pusat penerimaan data dari keempat *node* untuk proses pemantauan dan pengolahan data lebih lanjut.

4.2 Hasil Monitoring Kualitas Udara

Hasil pengukuran kualitas udara dari setiap *node* sensor ditampilkan pada Tabel 1 sampai Tabel 4. Parameter yang diamati meliputi suhu, kelembapan udara, karbon monoksida (CO), dan karbon dioksida (CO₂).

Tabel 1. Hasil Monitoring Udara Node 1

NODE 1				
Jam	Suhu (°C)	Kelembapan (%)	CO (ppm)	CO ₂ (ppm)
03.02	27,8	60,1	1	400
05.00	26,8	60,2	1	400
07.00	25,9	62,7	1	400
09.00	28,6	59,2	1	400
11.00	30,9	53,8	2	400
13.00	31,9	54,3	1	400
17.00	31,3	56,3	1	400
19.00	30,2	59,5	1	400
20.00	29,6	62,2	1	400
22.00	28,7	64,8	1	400

Berdasarkan hasil pengukuran pada Node 1, perubahan suhu menunjukkan pola meningkat dari pagi menuju siang hari dan kembali menurun pada sore hingga malam hari. Peningkatan suhu terjadi bersamaan dengan penurunan kelembapan relatif, sedangkan ketika suhu menurun, kelembapan kembali meningkat. Kondisi tersebut menunjukkan adanya hubungan berlawanan antara suhu dan kelembapan selama periode pengamatan. Suhu tertinggi sebesar 31,9°C terjadi pada pukul 13.00, sehingga melebihi batas 30°C yang digunakan dalam sistem. Kondisi ini menunjukkan bahwa perubahan kondisi termal lingkungan pada periode siang menjadi faktor yang menyebabkan parameter suhu masuk ke kondisi peringatan. Sementara itu, nilai CO hanya berada pada rentang 1–2 ppm dan CO₂ tetap sekitar 400 ppm, sehingga tidak menunjukkan adanya peningkatan konsentrasi gas yang signifikan selama pengamatan.

Tabel 2. Hasil Monitoring Udara Node 2

NODE 2				
Jam	Suhu (°C)	Kelembapan (%)	CO (ppm)	CO ₂ (ppm)
03.02	26,1	59,8	2	400
05.00	25,6	61,5	2	400
07.00	25,4	62,8	2	400
09.00	27,2	58,7	2	400
11.00	29,6	54,9	2	400
13.00	30,7	53,4	2	400
17.00	30,1	58,5	2	400
19.00	29,2	61,9	2	409
20.00	28,6	66	2	400
22.00	27,8	67,3	2	400

Berdasarkan hasil pengukuran pada Node 2, suhu meningkat dari 25,4°C pada pukul 07.00 menjadi 30,7°C pada pukul 13.00, kemudian kembali menurun hingga 27,8°C pada pukul 22.00. Peningkatan suhu pada periode siang diikuti oleh penurunan kelembapan dari 62,8% menjadi 53,4%. Pola tersebut menunjukkan bahwa perubahan kondisi termal lingkungan berpengaruh terhadap perubahan kelembapan relatif pada titik pengukuran. Suhu maksimum sebesar 30,7°C pada pukul 13.00 telah melewati batas 30°C, sehingga kondisi termal menjadi parameter yang perlu diperhatikan pada periode tersebut. Sebaliknya, konsentrasi CO tetap berada pada 2 ppm dan CO₂ berada pada kisaran 400–409 ppm. Peningkatan CO₂ menjadi 409 ppm pada pukul 19.00 belum menunjukkan perubahan konsentrasi yang besar dibandingkan kondisi pengukuran lainnya.

Tabel 3. Hasil Monitoring Udara Node 3

NODE 3				
Jam	Suhu (°C)	Kelembapan (%)	CO (ppm)	CO ₂ (ppm)
03.02	27,0	57,6	0	400
05.00	26,4	58,9	1	400
07.00	26,1	60,3	1	400
09.00	27,2	56,5	0	400
11.00	29,8	53,9	1	400

NODE 3				
Jam	Suhu (°C)	Kelembapan (%)	CO (ppm)	CO ₂ (ppm)
13.00	31,3	52,8	0	400
17.00	30,7	55,1	0	400
19.00	29,8	58,3	1	400
20.00	29,3	61,3	1	400
22.00	28,7	63	1	400

Berdasarkan hasil pengukuran pada Node 3, suhu meningkat dari 26,1°C pada pukul 07.00 hingga mencapai 31,3°C pada pukul 13.00, kemudian menurun secara bertahap hingga 28,7°C pada pukul 22.00. Peningkatan suhu tersebut diikuti oleh penurunan kelembapan dari 60,3% menjadi 52,8%, sedangkan ketika suhu kembali menurun, kelembapan meningkat hingga 63%. Pola tersebut menunjukkan hubungan berlawanan antara suhu dan kelembapan pada titik pengukuran. Suhu maksimum sebesar 31,3°C melebihi batas 30°C sehingga kondisi termal pada periode siang menjadi parameter yang perlu diperhatikan. Sementara itu, CO berada pada rentang 0–1 ppm dan CO₂ stabil pada sekitar 400 ppm. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa perubahan parameter gas selama pengamatan relatif kecil dibandingkan perubahan parameter suhu.

Tabel 4. Hasil Monitoring Udara Node 4

NODE 4				
Jam	Suhu (°C)	Kelembapan (%)	CO (ppm)	CO ₂ (ppm)
03.02	27,4	61,2	2	400
05.00	26,9	61,7	2	400
07.00	26,7	61,4	2	400
09.00	26,7	62	2	400
11.00	28,8	53,7	2	400
13.00	30,8	48,9	2	400
17.00	29,9	59	2	400
19.00	28,6	63,6	2	400
20.00	28,2	64,8	2	400
22.00	27,6	64,3	2	400

Berdasarkan hasil pengukuran pada Node 4, suhu meningkat dari 26,7°C pada pukul 07.00 menjadi 30,8°C pada pukul 13.00, kemudian menurun hingga 27,6°C pada pukul 22.00. Peningkatan suhu pada siang hari disertai penurunan kelembapan dari 61,4% menjadi 48,9%. Setelah suhu menurun pada sore hingga malam hari, kelembapan kembali meningkat hingga 64,3%. Pola tersebut menunjukkan adanya hubungan berlawanan antara suhu dan kelembapan selama pengamatan. Suhu maksimum 30,8°C pada pukul 13.00 melewati batas 30°C yang digunakan sistem sehingga kondisi termal menjadi parameter yang memicu perhatian sistem. Sementara itu, konsentrasi CO tetap sebesar 2 ppm dan CO₂ berada sekitar 400 ppm sepanjang pengamatan. Stabilitasnya konsentrasi gas menunjukkan bahwa perubahan kondisi pada Node 4 selama periode pengamatan lebih dominan terlihat pada parameter suhu dan kelembapan.

4.3 Hasil Pengujian Komunikasi ESP-NOW

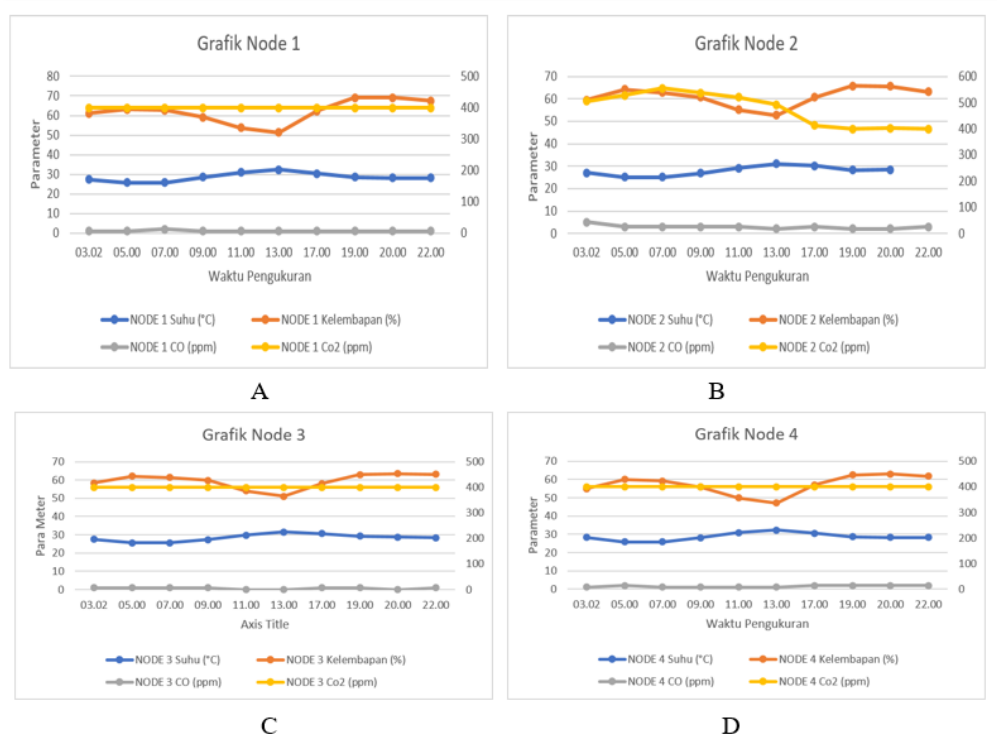
Pengujian komunikasi dilakukan untuk mengetahui kemampuan protokol ESP-NOW dalam mengirimkan data dari node sensor menuju ESP32-S3 *master*. Pengujian dilakukan di lorong Teknik Elektro Universitas Merdeka Malang pada jarak 5 hingga 40 meter dengan interval 5 meter. Pada setiap titik pengujian dikirimkan 10 paket data untuk mengetahui tingkat keberhasilan transmisi dan *delay* komunikasi. Hasil pengujian komunikasi ESP-NOW ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil Pengujian Komunikasi ESP-NOW

Jarak (m)	Paket Dikirim	Paket Diterima	Packet Loss (%)	Delay Rata-rata (detik)
5	10	10	0	10,12
10	10	10	0	10,12
15	10	10	0	10,12
20	10	10	0	10,11
25	10	10	0	10,11
30	10	10	0	10,12

Jarak (m)	Paket Dikirim	Paket Diterima	Packet Loss (%)	Delay Rata-rata (detik)
35	10	10	0	10,12
40	10	10	0	10,11

Berdasarkan Tabel 5, seluruh paket data berhasil diterima pada setiap jarak pengujian sehingga diperoleh *packet loss* sebesar 0%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pada kondisi pengujian, peningkatan jarak dari 5 hingga 40 meter belum menyebabkan kehilangan paket data. Nilai *delay* rata-rata juga relatif konstan pada rentang 10,11–10,12 detik. Kondisi ini menunjukkan bahwa pada area dan kondisi pengujian tersebut, perubahan jarak hingga 40 meter belum memberikan pengaruh yang berarti terhadap keberhasilan penerimaan paket maupun nilai *delay*. Dengan demikian, ESP-NOW mampu mendukung komunikasi langsung dari node sensor menuju ESP32-S3 *master* hingga jarak 40 meter pada lingkungan pengujian penelitian ini. Namun, hasil tersebut berlaku pada kondisi dan lokasi pengujian yang digunakan sehingga belum dapat digunakan untuk menyatakan jangkauan maksimum ESP-NOW secara umum.



Gambar 6. Grafik Hasil Implementasi (A) Node 1, (B) Node 2, (C) Node 3, dan (D) Node 4

Berdasarkan Gambar 6, pola perubahan suhu pada keempat node menunjukkan kecenderungan yang relatif sama, yaitu meningkat pada periode pagi menuju siang dan menurun kembali pada sore hingga malam hari. Perubahan suhu tersebut diikuti oleh perubahan kelembapan dengan pola yang berlawanan. Node 1 memiliki suhu maksimum 31,9°C, Node 2 sebesar 30,7°C, Node 3 sebesar 31,3°C, dan Node 4 sebesar 30,8°C. Dengan demikian, seluruh node mengalami suhu di atas batas 30°C pada periode siang. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa peningkatan suhu tidak hanya terjadi pada satu titik, tetapi merupakan pola yang terjadi pada area pengujian. Sebaliknya, parameter CO dan CO₂ relatif stabil pada seluruh node, sehingga selama periode pengamatan tidak terlihat adanya perubahan sumber emisi gas yang signifikan.

4.4 Hasil Monitoring ThingSpeak

Data hasil pengukuran dari empat node sensor yang diterima oleh ESP32-S3 *master* diteruskan ke platform ThingSpeak melalui jaringan WiFi. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui keberhasilan proses pengiriman dan visualisasi data secara *real-time*. Parameter yang ditampilkan meliputi suhu, kelembapan, karbon monoksida (CO), dan karbon dioksida (CO₂).

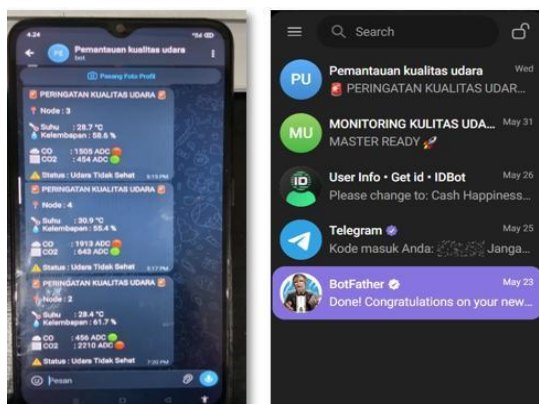


Gambar 7. Tampilan Dashboard ThingSpeak

Berdasarkan hasil pengujian, data dari seluruh node berhasil ditampilkan pada dashboard ThingSpeak. Keberhasilan tersebut menunjukkan bahwa proses komunikasi dari node sensor melalui ESP-NOW menuju master, kemudian diteruskan melalui WiFi ke platform ThingSpeak, dapat berjalan secara terintegrasi. Tampilan data dalam bentuk grafik memungkinkan perubahan parameter kualitas udara pada masing-masing node diamati secara langsung, sehingga ThingSpeak dapat digunakan sebagai media pemantauan kondisi lingkungan secara *real-time*.

4.5 Hasil Notifikasi Telegram

Pengujian notifikasi Telegram dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam memberikan peringatan secara otomatis ketika parameter kualitas udara melebihi batas yang telah ditentukan. Pada kondisi tersebut, ESP32-S3 master memproses data yang diterima dari node dan mengirimkan informasi peringatan melalui Telegram kepada pengguna.



Gambar 8. Tampilan Notifikasi Telegram

Berdasarkan hasil pengujian, sistem berhasil mengirimkan notifikasi Telegram ketika kondisi parameter kualitas udara memenuhi kondisi peringatan yang telah ditentukan. Hal ini menunjukkan bahwa data yang diterima oleh master tidak hanya digunakan untuk pemantauan, tetapi juga dapat digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan untuk memberikan peringatan kepada pengguna. Dengan demikian, integrasi Telegram membantu pengguna memperoleh informasi kondisi kualitas udara tanpa harus terus memantau dashboardThingSpeak.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian yang telah dilakukan, sistem pemantauan kualitas udara berbasis *Internet of Things* (IoT) menggunakan *Wireless Sensor Network* (WSN) empat node berhasil direalisasikan sesuai dengan tujuan penelitian. Sistem mampu melakukan pengukuran suhu, kelembapan, karbon monoksida (CO), dan karbon dioksida (CO₂) secara *real-time* menggunakan sensor DHT22, MQ-7, dan MQ-135 pada setiap node sensor. Hasil pengujian menunjukkan bahwa komunikasi data antara node sensor dan ESP32-S3 master menggunakan protokol ESP-NOW dapat berjalan dengan baik hingga jarak 40 meter dengan *packet loss* 0%. Data hasil pengukuran dari seluruh node berhasil diterima oleh master dan diteruskan ke ThingSpeak untuk pemantauan secara *real-time*, serta sistem mampu mengirimkan notifikasi melalui Telegram ketika parameter kualitas udara melebihi ambang batas yang telah ditentukan. Penggunaan empat node pada beberapa titik pengamatan memungkinkan kondisi kualitas udara dipantau secara lebih representatif dibandingkan pengukuran pada satu titik. Keterbatasan penelitian ini adalah pengujian sistem dilakukan pada area implementasi yang terbatas dan menggunakan sensor MQ-7 serta MQ-135 yang hasil pengukurannya masih dapat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan dan karakteristik sensor. Penelitian selanjutnya disarankan untuk memperluas area dan jumlah node, menggunakan sensor gas dengan akurasi dan selektivitas yang lebih tinggi, serta mengembangkan metode kalibrasi dan komunikasi jaringan yang sesuai untuk cakupan area yang lebih luas.

REFERENSI

- [1] A. J. Taufiq, L. Hayat, B. Muchtasjar, Iskahar, D. G. Romandolo, and R. B. Amarudin, "Sistem Monitoring Polusi Udara Berbasis Sensor MQ-135 Untuk Deteksi Gas CO₂ dan CO: Studi Kasus di Lingkungan Perkotaan," *Techno*, vol. 25, no. 2, pp. 131–138, 2024, doi: 10.30595/techno.v25i2.24100.
- [2] and A. M. F. Haya, K. Nisa, R. F. Ladipasa, A. Suriani, "Dampak Polusi Udara terhadap Kesehatan Manusia," *WISSEN J. Ilmu Sos. dan Hum.*, vol. 3, no. 2, pp. 180–190, 2025.
- [3] H. Budianto and B. Sumanto, "Perancangan Sistem Monitoring Kualitas Udara dalam Ruangan Berbasis Internet of Things," *J. List. Instrumentasi, dan Elektron. Terap.*, vol. 5, no. 1, pp. 9–17, 2024, doi: 10.22146/juliet.v5i1.87423.
- [4] W. P. Arisusanto, C. Anwar, and E. Sunarsih, "Kualitas Udara Dalam Ruangan Rumah Sakit: Study Literatur Review," *J. Ilm. Permas J. Ilm. STIKES Kendal*, vol. 14, no. 2, pp. 737–748, 2024, doi: 10.32583/pskm.v14i2.1864.
- [5] C. R. O. N. C. Onuekwusi, "Wireless Sensor Networks (WSN): An Overview," *Am. Sci. Res. J. Eng. Technol. Sci.*, vol. 64, no. 1, pp. 53–63, 2020.
- [6] A. Sabiq, T. Alfari, and Y. A. Pratama, "Purwarupa Sistem Pemantauan Kualitas Udara dan Cuaca Melalui Web Berbasis Wireless Sensor Network," *JST (Jurnal Sains dan Teknol.)*, vol. 6, no. 2, pp. 248–257, 2017, doi: 10.23887/jstundiksha.v6i2.11250.
- [7] Y. Arya, Tri Fidrian, Faiqurahman, Mahar, Azhar, "Aplikasi Wireless Sensor Network untuk Sistem Monitoring dan Klasifikasi Kualitas Udara," *J. Sist. Inf.*, vol. 14, no. 2, pp. 74–82, 2018, doi: 10.21609/jsi.v14i2.652.
- [8] M. Muthmainnah, A. Syaifudin, and N. Chamidah, "Prototipe Alat Monitoring Suhu dan Kelembaban pada Rumah Penyimpan Tembakau Berbasis Internet of Thing (IoT)," *J. Pendidik. MIPA*, vol. 13, pp. 177–182, 2023, doi: 10.37630/jpm.v13i1.853.
- [9] M. N. I. Veronika Asri T. , Khoirul Warits Darwisy, "Pengembangan Sistem Monitoring Kualitas Udara Dalam Ruangan Berbasis IoT dengan Sensor MQ-135 dan DHT22," *J. Renew. Energy Smart Device*, vol. 2, no. 1, pp. 35–42, 2024, doi: 10.61220/joresd.v2i1.246.
- [10] N. A. Sholicha and A. S. Budi, "Implementasi Protokol AODV Menggunakan ESP-NOW pada Wireless Sensor Network Berbasis ESP32," *J. Teknol. Inf. dan Ilmu Komput.*, vol. 11, no. 4, pp. 771–776, 2024, doi: 10.25126/jtiik.1148398.
- [11] dan T. I. Anwar Ulla Khan, Mohammad Ehtisham Khan, Mashhood Hasan, Waleed Zakri, Waleed Alhazmi, "An Efficient Wireless Sensor Network Based on the ESP-MESH Protocol for Indoor and Outdoor Air Quality Monitoring," *Sustainability*, vol. 14, no. 24, 2022, doi: 10.3390/su142416630.

- [12] A. Fahmi, I. Kurniawan, and J. A. Prasetyo, "Performance Evaluation of IoT Communication Protocols (LoRa , Wi-Fi and Zigbee) for Smart Environment," vol. 08, no. 01, pp. 1–10, 2026.
- [13] E. Kurniawaty, Muhamad Nasir, and M.Khairul, "Implementasi Teknologi IoT dalam Sistem Pemantauan Kualitas Udara di Politeknik Negeri Bengkalis," *Bul. Ilm. Inform. Teknol.*, vol. 3, no. 1, pp. 10–16, 2024, doi: 10.58369/biit.v3i1.81.
- [14] S. dan I. H. Rian Widiyanto, "Perancangan Alat Pendeteksi Gas Karbon Monoksida di Udara Menggunakan Sensor Gas MQ-7 dan Modul Bluetooth HC-05," *JTEIN J. Tek. Elektro Indones.*, vol. 3, no. 2, pp. 326–333, 2022, doi: DOI: 10.24036/jtein.v3i2.251.
- [15] F. Puri, A. Wagya, T. Elektro, and P. N. Jakarta, "Analisis Performansi ESP-NOW Sebagai Protokol Komunikasi Efisien Antar Multi-node dan Gateway dalam Sistem IoT," vol. 4, no. 1, pp. 607–614.
- [16] T. N. Hakim, M. F. Susanto, and K. Kunci, "Sistem Monitoring Kualitas Udara Berbasis Internet of Things," no. 1, pp. 26–27, 2023, doi: 10.35313/irwns.v1i1.2056.
- [17] A. Pariama and R. Efendi, "Pengembangan Sistem Deteksi Kualitas Udara Berbasis Sensor IoT Menggunakan Fitur Notifikasi Telegram di Terminal Tingkir, Salatiga," *J. Indones. Manaj. Inform. dan Komun.*, vol. 6, no. 2, pp. 1025–1034, 2025, doi: 10.63447/jimik.v6i2.1384.
- [18] A. Silvia, R. . Halimatussa'diyah2, R. Rizky Aldi, and N. Latifah, "Perancangan Wireless Sensor Network Menggunakan Teknologi Multisensor Sebagai Sistem Monitoring Kualitas Udara," *J. Qua Tek.*, vol. 10, no. 2, pp. 1–13, 2020, doi: 10.35457/quateknika.v10i2.1189.
- [19] Rodhotul Muttaqin, Wasi Sakti Wiwit Prayitno, Natalia Erna Setyaningsih, "Rancang Bangun Sistem Pemantauan Kualitas Udara Berbasis IoT (Internet of Things) dengan Sensor DHT11 dan Sensor MQ135," *J. Pengelolaan Lab. Pendidik.*, vol. 6, no. 2, pp. 102–115, 2024, doi: 0.14710/jplp.6.2.102-115.
- [20] M. Taufik, Hilmansyah, and A. W. Aditya, "Sistem Monitoring Kualitas Udara Dalam Ruangan Berbasis IoT di Gedung Layanan Unit Terpadu Politeknik Negeri Balikpapan," *JIMREK J. Ilm. Rekayasa Elektro*, vol. 1, no. 1, pp. 29–37, 2024, doi: 10.32487/jimrek.v1i1.32.