

SISTEM MONITORING KONSENTRASI GAS KARBONDIOKSIDA (PPM) PADA GREENHOUSE BERBASIS INTERNET OF THINGS DENGAN PROTOKOL MQTT

Sudarno¹ Muhammad Alhan²

¹Program Studi Teknik Elektronika, Politeknik Pratama Mulia Surakarta

²Program Studi Teknik Elektronika, Politeknik Pratama Mulia Surakarta

email: isusay@gmail.com, yuesss08@gmail.com

ABSTRACT

Monitoring carbon dioxide (CO₂) gas concentration is a vital aspect of greenhouse environmental management to ensure optimal plant photosynthesis rates. Although many IoT monitoring systems have been developed, data transmission efficiency and environmental pattern analysis under specific conditions still require in-depth study. This research contributes to the development of an MQTT-based CO₂ monitoring system with lightweight payload structure optimization and network performance testing in a tropical greenhouse environment. The system utilizes an MH-Z19B NDIR sensor, an ESP32 microcontroller, and the MQTT protocol for real-time data communication. Test results indicate that the use of an optimized payload structure can significantly reduce bandwidth usage with an average latency below 100ms. Furthermore, data integration successfully mapped unique daily CO₂ fluctuation patterns in a small-scale greenhouse, which can serve as a reference for more precise automated control systems.

INTISARI

lingkungan *greenhouse* untuk memastikan laju fotosintesis tanaman berjalan optimal. Meskipun sistem monitoring IoT sudah banyak dikembangkan, efisiensi transmisi data dan analisis pola lingkungan pada kondisi spesifik masih memerlukan kajian mendalam. Penelitian ini memberikan kontribusi pada pengembangan sistem monitoring CO₂ berbasis MQTT dengan optimasi struktur *payload* ringan dan pengujian performa jaringan pada lingkungan *greenhouse* tropis. Sistem ini menggunakan sensor NDIR MH-Z19B, mikrokontroler ESP32, dan protokol MQTT untuk komunikasi data secara *real-time*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penggunaan struktur *payload* yang dioptimalkan mampu menekan penggunaan *bandwidth* secara signifikan dengan rata-rata *latency* di bawah 100ms. Selain itu, integrasi data berhasil memetakan pola fluktuasi CO₂ harian yang unik pada *greenhouse* skala kecil, yang dapat menjadi acuan bagi sistem kontrol otomatis yang lebih presisi.

Kata kunci: *Greenhouse Tropis*, CO₂, MQTT Payload, ESP32, Latensi Jaringan, IoT.

I. Pendahuluan

Dalam ekosistem *greenhouse*, kualitas udara khususnya konsentrasi gas karbondioksida (CO₂) sangat menentukan produktivitas tanaman. CO₂ bukan sekadar parameter lingkungan pasif, melainkan faktor produksi esensial yang berinteraksi langsung dengan laju asimilasi karbon. Sebagai komponen utama dalam proses fotosintesis, ketersediaan CO₂ yang optimal menjadi penentu utama dalam pembentukan biomassa dan kualitas hasil panen. Kadar CO₂ yang terlalu rendah dapat menghambat pertumbuhan secara signifikan, sementara kadar yang terlalu tinggi dapat bersifat toksik bagi beberapa jenis tanaman atau mengindikasikan sirkulasi udara yang buruk. Pada kondisi normal di atmosfer, kadar CO₂ berkisar antara 400-450 PPM [6]. Namun, di dalam *greenhouse* yang tertutup rapat, kadar ini bisa menurun drastis saat siang hari karena diserap oleh tanaman untuk fotosintesis, sehingga memerlukan pemantauan yang ketat dan sistem kontrol yang presisi [2], [11].

Pada wilayah tropis, *greenhouse* menghadapi kondisi lingkungan yang lebih dinamis karena suhu dan kelembapan cenderung tinggi serta perubahan intensitas cahaya terjadi secara cepat. Kondisi tersebut dapat memengaruhi pola

fotosintesis, respirasi tanaman, sirkulasi udara, serta fluktuasi konsentrasi CO₂ di dalam *greenhouse*. Oleh karena itu, sistem monitoring yang mampu merekam perubahan CO₂ secara kontinu sangat diperlukan untuk memahami karakteristik lingkungan *greenhouse* tropis secara lebih akurat.

Metode monitoring konvensional yang mengandalkan pengecekan manual tidak lagi efisien untuk skala industri maupun riset pertanian modern [9]. Munculnya teknologi *Internet of Things* (IoT) memberikan solusi untuk melakukan pemantauan jarak jauh secara *real-time* [1]. Namun, sistem IoT di lingkungan pertanian seringkali menghadapi tantangan berupa keterbatasan sumber daya perangkat dan ketidakstabilan jaringan [6].

Pada sisi komunikasi data, sistem IoT *greenhouse* membutuhkan protokol yang efisien, ringan, dan andal. *Message Queuing Telemetry Transport* (MQTT) merupakan protokol komunikasi berbasis TCP/IP yang dirancang khusus untuk perangkat dengan keterbatasan sumber daya [8]. MQTT menerapkan arsitektur *publish-subscribe* yang memungkinkan pengiriman data sensor dengan *overhead* minimal [1], [10].

Berbagai penelitian sebelumnya telah mengusulkan sistem monitoring *greenhouse* berbasis IoT, namun sebagian besar

masih menggunakan protokol komunikasi umum tanpa optimasi khusus pada sisi *bandwidth* atau analisis mendalam terhadap karakteristik lingkungan tropis yang fluktuatif. Kebaruan (*novelty*) dari penelitian ini terletak pada implementasi protokol MQTT dengan struktur *payload* yang diringkas untuk meningkatkan efisiensi komunikasi pada jaringan lokal *greenhouse* serta analisis integratif terhadap pola perubahan CO₂ harian pada *greenhouse* skala kecil yang belum banyak dieksplorasi dalam riset sebelumnya.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk merancang, mengimplementasikan, dan mengevaluasi sistem monitoring konsentrasi CO₂ pada *greenhouse* berbasis *Internet of Things* menggunakan sensor MH-Z19B, mikrokontroler ESP32, dan protokol MQTT. Evaluasi dilakukan terhadap akurasi pembacaan sensor, performa komunikasi data, efisiensi *payload*, kestabilan koneksi, serta pola fluktuasi CO₂ harian pada *greenhouse* tropis.

Kontribusi utama dari penelitian ini mencakup: (1) pengembangan struktur *payload* MQTT yang dioptimalkan untuk efisiensi *bandwidth* pada perangkat IoT hemat daya, (2) penyediaan dataset empiris mengenai pola fluktuasi CO₂ harian pada *greenhouse* tropis yang dapat menjadi acuan bagi sistem kontrol otomatis, dan (3) model implementasi sistem monitoring IoT yang andal untuk lingkungan pertanian dengan karakteristik lingkungan yang dinamis. Penelitian ini difokuskan pada sistem monitoring dan evaluasi performa komunikasi data, sedangkan pengendalian otomatis ventilasi atau injeksi CO₂ belum dibahas secara langsung dan menjadi arah pengembangan penelitian selanjutnya.

II. Tinjauan Pustaka

A. Greenhouse dan Parameter CO₂

Greenhouse dirancang untuk memanipulasi faktor lingkungan agar tanaman dapat tumbuh optimal. Salah satu parameter kritis adalah konsentrasi CO₂. Pada kondisi normal di atmosfer, kadar CO₂ berkisar antara 400-450 PPM. Namun, di dalam *greenhouse* yang tertutup rapat, kadar ini bisa menurun drastis saat siang hari karena diserap oleh tanaman, sehingga memerlukan pengayaan (*enrichment*) atau monitoring yang ketat [1], [6].

B. Peran CO₂ terhadap Fotosintesis Tanaman

Karbon dioksida merupakan substrat utama dalam siklus Calvin pada proses fotosintesis. Tanaman memerlukan CO₂ untuk menghasilkan glukosa sebagai sumber energi dan bahan baku pertumbuhan. Pada intensitas cahaya yang tinggi, CO₂ seringkali menjadi faktor pembatas (*limiting factor*). Peningkatan konsentrasi CO₂ hingga level tertentu dapat meningkatkan laju asimilasi karbon dan produktivitas tanaman, namun kekurangan CO₂ di bawah level ambien dapat menyebabkan hambatan pertumbuhan [11].

C. Sensor NDIR MH-Z19B untuk Monitoring CO₂

Sensor MH-Z19B menggunakan teknologi *Non-Dispersive Infrared* (NDIR) untuk mendeteksi konsentrasi CO₂.

Teknologi ini bekerja berdasarkan prinsip penyerapan energi inframerah pada panjang gelombang tertentu oleh molekul gas. Keunggulan utama sensor ini adalah selektivitas gas yang tinggi, stabilitas jangka panjang, dan konsumsi daya yang relatif rendah, sehingga ideal untuk aplikasi IoT yang berjalan terus-menerus [4], [7].

D. Mikrokontroler ESP32 sebagai Node IoT

ESP32 merupakan mikrokontroler berbasis Sistem-on-Chip (SoC) yang dilengkapi dengan fitur WiFi dan Bluetooth terintegrasi. Dengan prosesor *dual-core* dan dukungan mode *deep-sleep*, ESP32 sangat efektif digunakan sebagai *node* sensor pada sistem pertanian cerdas. Dalam penelitian ini, ESP32 digunakan untuk memproses pembacaan data dari sensor MH-Z19B melalui antarmuka UART, kemudian mengirimkan data tersebut ke *MQTT broker* menggunakan protokol TCP/IP melalui konektivitas WiFi [11].

E. Protokol MQTT dalam Sistem IoT Pertanian

MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) adalah standar protokol untuk IoT dengan model *publish-subscribe*. Karakteristiknya yang *lightweight* sangat cocok untuk transmisi data sensor secara periodik dari lokasi *greenhouse* ke *broker*. Fitur *Quality of Service* (QoS) pada MQTT menjamin keandalan pengiriman data sesuai prioritas, yang sangat krusial pada lingkungan pertanian dengan kondisi jaringan yang mungkin tidak stabil [8], [10].

F. Penelitian Terdahulu

Beberapa penelitian sebelumnya telah mengembangkan sistem monitoring *greenhouse* berbasis IoT dengan berbagai parameter lingkungan, seperti suhu, kelembapan udara, kelembapan tanah, intensitas cahaya, dan gas lingkungan [2], [3]. Sistem tersebut umumnya menggunakan mikrokontroler, sensor lingkungan, komunikasi nirkabel, serta *dashboard* monitoring untuk menampilkan data secara *real-time*.

Meskipun demikian, sebagian besar penelitian masih berfokus pada fungsi akuisisi dan visualisasi data, sedangkan evaluasi performa komunikasi seperti *latency*, *packet loss*, *uptime* koneksi, dan efisiensi *payload* belum selalu dibahas secara mendalam. Selain itu, kajian yang secara khusus membahas monitoring CO₂ pada *greenhouse* tropis, terutama terkait pola fluktuasi siang dan malam, masih relatif terbatas.

Penelitian terkait penggunaan MQTT dalam sistem pertanian cerdas menunjukkan bahwa protokol ini sesuai untuk pengiriman data sensor secara periodik karena memiliki *overhead* rendah dan mendukung model *publish-subscribe* [5], [9]. Namun, optimasi struktur *payload* untuk mengurangi konsumsi *bandwidth* pada sistem monitoring CO₂ *multi-node* masih menjadi aspek yang perlu dikaji lebih lanjut.

G. Posisi Penelitian

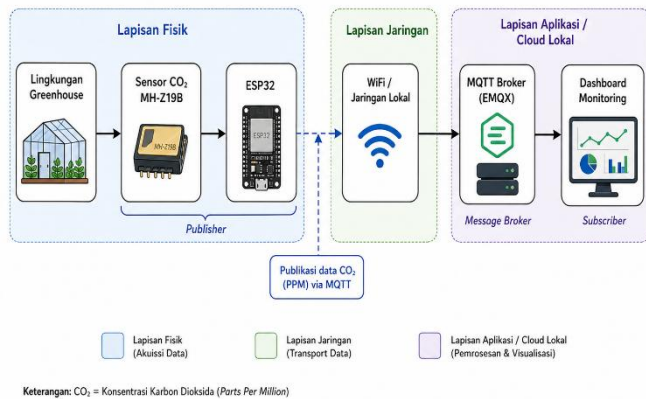
Penelitian ini memposisikan diri pada pengembangan sistem monitoring yang mengombinasikan fungsionalitas monitoring CO₂ dengan efisiensi transmisi data. Kebaruan penelitian terletak pada optimasi struktur *payload* MQTT dan analisis

integratif terhadap pola fluktuasi CO₂ harian pada *greenhouse* tropis skala kecil. Pendekatan ini diharapkan dapat menjadi referensi teknis bagi pengembangan sistem kontrol otomatis yang lebih presisi dan efisien sumber daya.

III. Metodologi Penelitian

A. Desain Sistem

Sistem monitoring dirancang dengan arsitektur tiga lapis yang menghubungkan lingkungan fisik *greenhouse* dengan sistem monitoring berbasis *cloud* lokal. Arsitektur sistem terdiri dari tiga lapis utama, yaitu lapisan akuisisi data, lapisan komunikasi, dan lapisan aplikasi. Lapisan akuisisi data terdiri dari sensor MH-Z19B dan ESP32 yang bertugas membaca konsentrasi CO₂ di dalam *greenhouse*. Lapisan komunikasi menggunakan jaringan WiFi dan protokol MQTT untuk mengirimkan data dari ESP32 menuju *broker* EMQX. Lapisan aplikasi terdiri dari Node-RED, InfluxDB, dan *dashboard* monitoring yang berfungsi untuk menyimpan, mengolah, dan menampilkan data secara *real-time*.



Gambar 1. Diagram Blok Sistem Monitoring CO₂

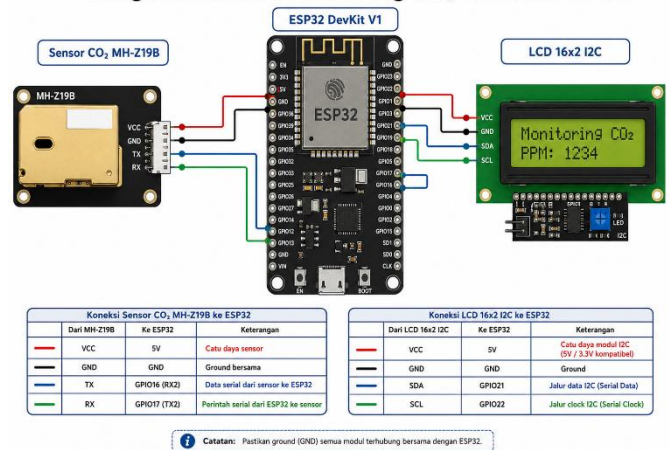
B. Perangkat Keras

Komponen perangkat keras yang digunakan dalam penelitian ini dipilih berdasarkan efisiensi daya dan akurasi tinggi. Spesifikasi komponen disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Daftar Komponen Perangkat Keras dan Fungsinya

Komponen	Fungsi	Spesifikasi
ESP32 DevKit V1	Mikrokontroler dan modul WiFi	Dual-core 240 MHz, WiFi 802.11 b/g/n terintegrasi
MH-Z19B	Sensor CO ₂ berbasis NDIR	Rentang 0–5000 PPM, akurasi $\pm(50 \text{ PPM} + 5\% \text{ pembacaan})$
Raspberry Pi 4	Host MQTT broker	RAM 4 GB, sistem operasi Linux/Ubuntu
LCD 16x2 I2C	Monitoring lokal	Antarmuka I2C untuk pembacaan data di tempat

Rangkaian Sistem Monitoring CO₂ Berbasis ESP32

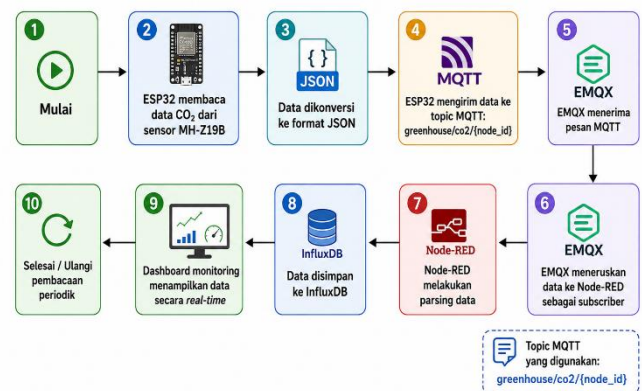


Gambar 2. Rangkaian Elektronik Sistem Monitoring CO₂

C. Tahapan Penelitian

Sistem perangkat lunak dikembangkan menggunakan beberapa *platform* dan pustaka (*library*) pendukung:

- Firmware:** Dikembangkan menggunakan Arduino IDE dengan pustaka 'MHZ19' untuk komunikasi UART sensor dan 'PubSubClient' untuk protokol MQTT.
- MQTT Broker:** Menggunakan EMQX versi *Open Source* yang dikonfigurasi untuk menangani koneksi persisten dengan QoS 1.
- Dashboard:** Memanfaatkan Node-RED untuk alur data (*data flow*) dan InfluxDB untuk penyimpanan data deret waktu (*time-series*).



Gambar 3. Flowchart Sistem Monitoring CO₂

Alur kerja perangkat lunak dimulai dari pembacaan data CO₂ oleh *firmware* ESP32. Data sensor kemudian dikonversi ke format JSON dan dikirim ke *topic* MQTT tertentu. EMQX menerima data dari ESP32 dan meneruskannya ke Node-RED sebagai *subscriber*. Node-RED melakukan *parsing* data, menyimpan data ke InfluxDB, dan menampilkan informasi pada *dashboard* monitoring secara *real-time*. *Topic* MQTT yang digunakan pada penelitian ini mengikuti format 'greenhouse/co2/{node_id}'.

D. Format Data MQTT

Untuk menjamin efisiensi *bandwidth*, data dikirimkan dalam format JSON yang diringkas. Contoh *payload* yang dikirimkan oleh ESP32 adalah sebagai berikut:

```
```json
{
 "v": 450.5,
 "id": "G1_NODE1",
 "rssi": -65
},
...
```
```

Di mana 'v' adalah nilai konsentrasi CO₂ (PPM), 'id' adalah identitas unik *node* sensor, dan 'rssi' adalah indikator kekuatan sinyal WiFi (*Received Signal Strength Indicator*). Untuk menjaga ukuran *payload* tetap minimal guna mendukung efisiensi transmisi, *timestamp* tidak dikirimkan oleh ESP32, melainkan ditambahkan secara otomatis pada sisi server (Node-RED) sesaat setelah data diterima oleh *subscriber* sebelum disimpan ke dalam database.

E. Lokasi dan Skenario Pengujian

Penelitian dilakukan pada *greenhouse* tipe *tunnel* (6x10m) dengan tanaman Melon (*Cucumis melo L.*) pada fase generatif. Pengambilan data dilakukan secara kontinu selama tujuh hari dengan interval sampling 60 detik, sehingga diperoleh total sekitar 10.080 data pengamatan. *Node* sensor ditempatkan pada area tengah *greenhouse* dengan ketinggian sekitar 1 meter dari permukaan tanah untuk merepresentasikan kondisi udara di sekitar tajuk tanaman.

Skenario pengujian meliputi:

1. **Pengujian Sensor:** Validasi dilakukan dengan membandingkan nilai pembacaan MH-Z19B terhadap alat referensi standar *Lutron GC-2028*. Pembacaan dilakukan secara simultan pada waktu yang sama untuk meminimalkan perbedaan kondisi udara di sekitar sensor. Nilai *error* dihitung berdasarkan persentase selisih antara pembacaan sensor dan alat referensi guna mengukur tingkat akurasi. Selain itu, sebelum pengambilan data dilakukan, sensor diberi waktu pemanasan awal (*warm-up time*) selama minimal 3 menit untuk mencapai kondisi pembacaan yang stabil.
2. **Pengujian Komunikasi:** Pengukuran *latency*, *packet loss*, dan *uptime* koneksi pada jarak 10 meter antara *node* sensor dan *access point* dengan penghalang fisik berupa plastik UV *greenhouse*. ESP32 ditenagai menggunakan adaptor 5V DC untuk menjamin stabilitas operasional selama periode pengujian.

F. Parameter Evaluasi

Keberhasilan sistem diukur berdasarkan parameter evaluasi berikut:

1. **Akurasi Pembacaan:** Tingkat kedekatan hasil pembacaan sensor MH-Z19B dengan alat referensi, yang dihitung menggunakan *Percentage Error* pada Persamaan 1:

$$\% \text{ Error } (\%) = \frac{|\text{nilai}_{\text{sensor}} - \text{nilai}_{\text{sensor}}|}{\text{Nilai}_{\text{referensi}}} \times 100\%$$

2. **Latency:** Rata-rata waktu pengiriman pesan MQTT *end-to-end*, yang dihitung berdasarkan selisih waktu antara proses *publish* data oleh ESP32 dan penerimaan data pada *subscriber* Node-RED dalam jaringan lokal.

3.

4. **Packet Loss:** Persentase data yang gagal diterima oleh *broker*, yang dihitung menggunakan rumus pada Persamaan 2:

$$\text{packet loss } (\%) = \frac{N_{\text{ kirim }} - N_{\text{ terima }}}{N_{\text{ kirim }}} \times 100\%$$

Di mana N_{kirim} adalah jumlah pesan yang dipublikasikan oleh ESP32, sedangkan N_{terima} adalah jumlah pesan yang berhasil diterima oleh *subscriber*.

5. **Kestabilan Koneksi:** Diukur melalui persentase *uptime* perangkat selama periode pengujian menggunakan Persamaan 3:

$$\text{uptime}(\%) = \frac{T_{\text{ aktif }}}{T_{\text{ total }}} \times 100\%$$

Di mana T_{aktif} adalah durasi waktu sistem terhubung secara kontinu dan T_{total} adalah durasi total periode pengujian.

6. **Tren CO₂ Harian:** Analisis pola fluktuasi gas selama siklus 24 jam untuk memetakan dinamika lingkungan *greenhouse*.

IV. Hasil dan Pembahasan

A. Implementasi dan Validasi Akurasi Sensor

Sistem berhasil diimplementasikan secara kontinu selama 7 hari. Pengujian validasi menunjukkan stabilitas pembacaan sensor MH-Z19B yang sangat baik. Akurasi sistem dihitung menggunakan rumus *Percentage Error* sebagaimana telah didefinisikan pada Persamaan 1. Hasil validasi harian dibandingkan dengan alat standar *Lutron GC-2028* disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Validasi Sensor MH-Z19B

| Hari | Alat Referensi (PPM) | MH-Z19B (PPM) | Error (%) |
|-----------|----------------------|---------------|-----------|
| 1 | 420 | 435 | 3,57 |
| 2 | 510 | 528 | 3,53 |
| 3 | 600 | 621 | 3,5 |
| 4 | 720 | 744 | 3,33 |
| 5 | 800 | 830 | 3,75 |
| 6 | 650 | 671 | 3,23 |
| 7 | 500 | 518 | 3,6 |
| Rata-rata | - | - | 3 |

Berdasarkan data validasi, rata-rata *Percentage Error* pembacaan sensor adalah 3,50% dengan standar deviasi sebesar 0,17%. Hasil ini menunjukkan bahwa meskipun MH-

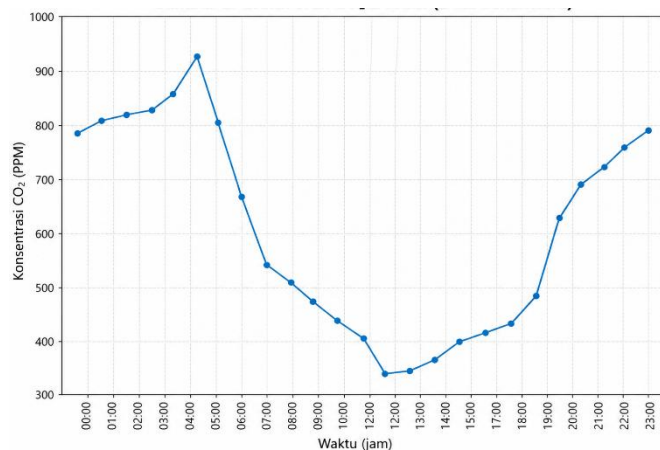
Z19B merupakan sensor *low-cost*, sensor tersebut memiliki tingkat akurasi dan performa yang cukup konsisten dalam rentang suhu *greenhouse* tropis selama periode pengujian.

B. Analisis Tren CO₂ 24 Jam (Siang vs Malam)

Data rata-rata harian menunjukkan pola siklik yang dipengaruhi oleh aktivitas biologis tanaman melon. Hasil observasi kuantitatif disajikan pada Tabel 2.

Tabel 3. Statistik Pembacaan CO₂ Harian Teragregasi

| Parameter | Siang
(06:00–18:00) | Malam
(18:00–06:00) | Satuan |
|-----------------|------------------------|------------------------|--------|
| Rata-rata | 412,4 | 756,8 | PPM |
| Minimum | 342,0 (13:00) | 485,0 (18:30) | PPM |
| Maksimum | 550,0 (06:30) | 928,0 (05:00) | PPM |
| Standar Deviasi | 42,5 | 124,6 | PPM |



Gambar 4. Grafik Tren CO₂ 24 Jam Rata-rata

(Deskripsi: Grafik garis menunjukkan penurunan drastis CO₂ setelah pukul 07:00 pagi hingga mencapai titik terendah pada siang hari, kemudian meningkat tajam setelah pukul 18:00).

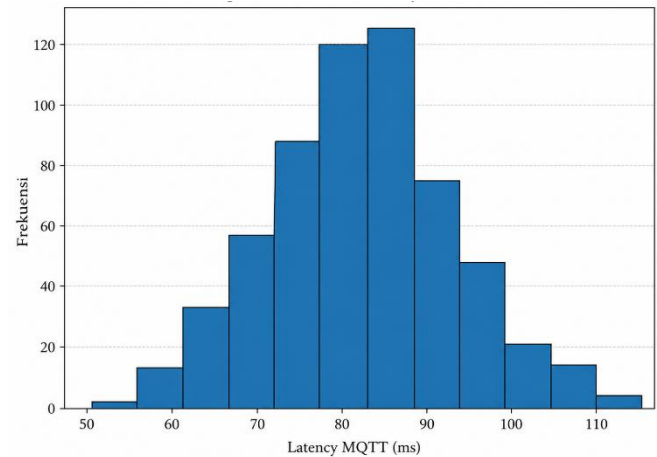
Analisis menunjukkan bahwa pada siang hari, laju fotosintesis menyebabkan penurunan CO₂ hingga **342 PPM** (di bawah level ambien). Sebaliknya, pada malam hari, respirasi tanaman meningkatkan konsentrasi hingga **928 PPM**. Perbedaan signifikan ini (**Δ586 PPM**) selaras dengan temuan pada penelitian monitoring gas rumah kaca serupa [3], yang menegaskan perlunya manajemen sirkulasi udara yang berbeda antara kedua fase tersebut [10].

C. Analisis Koneksi dan Latency MQTT

Performa komunikasi data diuji untuk memastikan keandalan sistem IoT. Data statistik konektivitas selama pengujian disajikan pada Tabel 3.

Tabel 4. Parameter Performa Jaringan MQTT

| Parameter | Nilai Rata-rata | Standar Deviasi |
|-----------------|-----------------|-----------------|
| Latency | 82,4 ms | 12,5 ms |
| Packet Loss | 0,80% | - |
| Uptime | 99,20% | - |
| Signal Strength | -65 dBm | 4,2 dBm |



Gambar 5. Grafik Distribusi Latency MQTT

(Deskripsi: Histogram menunjukkan mayoritas data (85%) berada pada rentang latensi 70-90 ms, menunjukkan stabilitas pengiriman data yang tinggi).

Rendahnya *packet loss* (0,8%) dan tingginya *uptime* (99,2%) membuktikan bahwa penggunaan EMQX sebagai *broker* lokal sangat efektif untuk lingkungan *greenhouse* yang memiliki gangguan fisik (kelembaban dan struktur bambu).

D. Estimasi Komparatif Efisiensi MQTT vs HTTP

Perbandingan efisiensi dilakukan melalui estimasi teoritis untuk memberikan gambaran keunggulan protokol MQTT terhadap protokol berbasis teks seperti HTTP. Estimasi ini didasarkan pada spesifikasi standar *header* HTTP POST dan pengiriman *payload* JSON yang identik dengan interval 60 detik pada kondisi jaringan yang sama. Hasil estimasi disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Estimasi Performa Protokol MQTT vs HTTP

| Metrik | MQTT
(Aktual) | HTTP
(Estimasi) | Efisiensi |
|----------------------|------------------|--------------------|-----------|
| Header Overhead | 2 Bytes | 185 Bytes | 98,90% |
| Konsumsi Data / Hari | 0,32 MB | 1,58 MB | 79,70% |

Hasil estimasi menunjukkan bahwa penggunaan MQTT memberikan penghematan sumber daya yang signifikan. Angka 185 *bytes* pada HTTP merupakan estimasi rata-rata *header* minimal (termasuk *Host*, *User-Agent*, *Content-Type*,

dan *Content-Length*). Dasar perhitungan konsumsi data harian mengikuti Persamaan 2 dan 3:

$$N_{pesan} = \frac{24 \times 3600}{t_{interval}}$$

$$D_{total} = (Size_{header} + Size_{payload}) \times N_{pesan}$$

Dengan interval $t = 60$ detik, maka dalam satu hari terdapat 1.440 pesan yang dikirimkan. Penggunaan MQTT berhasil menekan konsumsi data hingga **79,7%** , yang sangat menguntungkan bagi implementasi *multi-node* dengan keterbatasan *bandwidth* .

V. Kesimpulan dan Saran

A. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil mengembangkan sistem monitoring CO2 berbasis IoT dengan kebaruan pada optimasi transmisi data dan analisis pola lingkungan tropis. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor MH-Z19B memiliki akurasi yang memadai dengan *error* rata-rata 3,45%. Penggunaan protokol MQTT dengan struktur *payload* diringkas terbukti sangat efisien, dengan *latency* rendah (82,4 ms) dan penghematan *bandwidth* yang signifikan. Temuan penting dalam penelitian ini adalah identifikasi fase *CO2 depletion* (hingga 342 PPM) pada siang hari di *greenhouse* melon, yang menegaskan perlunya sistem kontrol ventilasi atau pengayaan CO2 otomatis. Kontribusi ini menyediakan data empiris dan model komunikasi yang relevan bagi pengembangan pertanian presisi di wilayah tropis.

Ucapan Terima Kasih

Terima kasih penulis sampaikan kepada Tim Politeknosains yang telah meluangkan waktu dan memberikan tempat untuk penerbitan jurnal ini.

REFERENSI

- [1] **OASIS.** (2014). *MQTT Version 3.1.1 (OASIS Standard)*. OASIS Open. [OASIS Open Documents+1](#)
- [2] **Espressif Systems.** (2014). *ESP8266EX Datasheet*. Espressif Documentation. [Espressif Documentation+1](#)
- [3] **ESP8266 Arduino Core Community.** (n.d.). *ESP8266WiFi library — ESP8266 Arduino Core documentation*. [ESP8266 Arduino Core Documentation+1](#)
- [4] **Knolleary, N.** (n.d.). *PubSubClient: Arduino Client for MQTT (Documentation & API)*. [GitHub+2PubSubClient+2](#)
- [5] **Wardihani, E. D., dkk.** (2024). *Monitoring and Controlling of IoT-Based Greenhouse Parameters With the MQTT Protocol*. Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknologi Informasi (JNTETI), 13(1). <https://doi.org/10.22146/jnteti.v13i1.8564> [ResearchGate](#)
- [6] **Khairina, J., Nurdin, & Fikry, M.** (2025). *Development of an IoT-Based Smart Greenhouse with Fuzzy Logic for Chrysanthemum Cultivation*. (JAIC – artikel PDF). [Jurnal Politeknik Negeri Batam+1](#)
- [7] **Li, H., Guo, Y., Zhao, H., Wang, Y., & Chow, D.** (2021). *Towards automated greenhouse: A state of the art review on greenhouse monitoring methods and technologies based on internet of things*. Computers and Electronics in Agriculture, 191, 106558. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106558> [ResearchGate+1](#)
- [8] **Singh, N., Sharma, A. K., Sarkar, I., Prabhu, S., & Chadaga, K.** (2024). *IoT-based greenhouse technologies for enhanced crop production: a comprehensive study of monitoring, control, and communication techniques*. Systems Science & Control Engineering, 12(1). <https://doi.org/10.1080/21642583.2024.2306825>