

Design of an IoT-Based Air Quality System with Web Integration in a Palm Oil Mill Environment

Sigid Nur Rohim^{1*}, Uyock Anggoro Saputro ^{2*}

* Informatika, Universitas Amikom Yogyakarta

sigidnurrohim@students.amikom.ac.id¹, uyock@amikom.ac.id²

Article Info

Article history:

Received 2025-06-18

Revised 2025-07-26

Accepted 2025-07-30

Keyword:

Internet Of Things,
Air Quality,
Gas Sensor,
Web Application,
Palm Oil Industry.

ABSTRACT

This research aims to design and implement an Internet of Things (IoT)-based air quality monitoring system with real-time data integration to web applications in the PT Gemareksa Mekarsari palm oil mill environment. This system utilizes NodeMCU ESP32 as the main microcontroller connected with MQ-2 and MQ-135 sensors to detect CO, CH₄, and NH₃ gases. Data is sent in real-time to the ThingSpeak platform and displayed through a responsive web dashboard. Testing was conducted over two days at three different location points (open area, fruit processing, and factory office) with a total of 45 measurements. Results showed that the system was able to transmit data with a delivery accuracy rate of 86.67%, with most data received without delay.. The detected gas concentrations were within safe limits, although mild fluctuations occurred, especially in the fruit processing area. The system also showed stable performance in displaying data on mobile and desktop devices. Thus, this system can be an effective solution for automatic and real-time industrial air monitoring, and support efforts to mitigate health risks due to air pollution.



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

I. PENDAHULUAN

Industri kelapa sawit telah berkembang secara signifikan, terutama di Indonesia yang telah berkontribusi pada pembangunan sosial ekonomi [1]. Kelapa sawit yang tumbuh di daerah tropis menghasilkan buah yang menjadi dua jenis minyak utama, yaitu minyak kelapa sawit mentah (CPO) dan minyak inti sawit [2]. Proses produksi kelapa sawit mulai dari pengolahan tandan kelapa sawit hingga pembakaran limbah dapat menghasilkan emisi polutan yang berdampak pada kualitas udara disekitar pabrik. Pembakaran limbah kelapa sawit dapat mengeluarkan komponen gas berbahaya seperti CO, CO₂, SO₂ dan NO_x, emisi dari bahan bakar ini relatif aman pada kondisi normal, namun pada beban puncak terjadi peningkatan emisi gas seperti CO dan H₂S yang perlu dikontrol untuk mengurangi dampak berbahaya pada lingkungan [3]. Polutan seperti partikel debu, gas berbahaya seperti karbon monoksida (CO) dan metana (CH₄), serta senyawa amonia (NH₃), dapat membahayakan kesehatan pekerja dan masyarakat disekitar pabrik [4]. Karbon monoksida (CO) pada proses pembakaran memiliki 5-200 ppm (*parts per million*) udara yang tercemar, sedangkan jika

udara bersih memiliki <1 ppm [5]. Selain karbon monoksida, pembakaran juga menghasilkan metana (CH₄), menurut standar yang ditetapkan oleh *National Institute for Occupational Safety and Health* (NIOSH), baku mutu gas CH₄ adalah sebesar 1000 ppm atau setara dengan 656,036 mg/m³ untuk durasi paparan selama 8 jam kerja [6]. Proses pembakaran juga menghasilkan gas amonia (NH₃), gas ini dapat menyebabkan hidung kering dan kelelahan syaraf pada kadar 5-50 ppm, sedangkan pada kadar 1000-1500 ppm gas ini menyebabkan sesak nafas nyeri dada dan kejang pada saluran pernafasan [7]. Nilai- nilai pembacaan sensor gas dibandingkan dengan standar ambang batas yang ditetapkan oleh *Occupation Safety and Health Administration* (OSHA) serta Pemnaker No.5 Tahun 2018 tentang K3 Lingkungan Kerja. Berdasarkan standar OSHA, ambang batas paparan CO untuk pekerja adalah 25 ppm (8 jam paparan), sementara untuk NH₃ adalah 50 ppm, dan untuk CH₄ tidak memiliki ambang batas langsung, namun menurut Kemenkes dan standar industri migas, ambang batas bawah ledakan (LEL) adalah sekitar 50,000 ppm.

Proses pengolahan kelapa sawit juga dilakukan oleh PT. Gemareksa Mekarsari untuk memproduksi minyak kelapa

sawit. Pada pabrik ini pemantauan kualitas udara menjadi tantangan penting guna memastikan proses produksi tidak melampaui ambang batas pencemaran yang ditetapkan dan guna menjaga kesehatan lingkungan kerja.

Teknologi *Internet of Things* (IoT) dalam hal ini dapat menjadi solusi inovatif dalam pemantauan kualitas udara secara *real-time*. IoT merupakan penerapan teknologi pada berbagai objek dalam kehidupan sehari-hari yang terhubung ke internet, sehingga suatu perangkat atau barang dapat dikendalikan dari jarak jauh melalui ponsel atau desktop. Teknologi ini berkembang pesat dengan dukungan perangkat elektronik seperti Arduino UNO, Arduino Nano, dan ESP [8]. Sistem pemantauan kualitas udara berbasis IoT dilakukan melalui sensor yang diletakkan pada berbagai titik strategis di lingkungan pabrik, dimana sensor akan mengumpulkan data kualitas udara [9]. Data ini dikirimkan secara *real-time* ke aplikasi berbasis *website* yang dapat diakses oleh manajemen pabrik kapan saja dan dimana saja, guna mempermudah pengambilan keputusan secara cepat dan tepat dalam upaya pencegahan maupun penanganan potensi pencemaran udara. Akurasi berperan mengukur seberapa dekat hasil pengukuran sistem atau sensor terhadap nilai sebenarnya atau standar yang diketahui [10]. Dalam hal ini, sistem pemantauan kualitas udara, akurasi menunjukkan sejauh mana sensor dapat membaca konsentrasi gas secara tepat dibanding nilai referensi yang seharusnya. Selain itu, teknologi IoT memungkinkan adanya pemantauan otomatis dan peringatan dini ketika polutan melebihi batas yang sudah ditetapkan [11].

Dalam penerapannya, beberapa penelitian terkait sistem pemantauan kualitas udara telah dilakukan, seperti penelitian yang berjudul "Sistem *Monitoring* Kualitas Udara Berbasis *Internet Of Things*". Penelitian ini bertujuan merancang sistem *monitoring* kualitas udara berbasis IoT untuk memantau kadar gas CO, NO, O₃, suhu, dan kelembaban secara *real-time*. Tujuan penelitian ini berhasil direalisasikan sesuai rancangan, sistem mampu mengukur CO, NO, O₃, suhu, dan kelembaban, terintegrasi dengan SIM900A dan Thingspeak, serta menerapkan Hukum Ohm dalam konversi data sensor. Sistem ini dapat digunakan sebagai prototipe pemantau kualitas udara di area lalu lintas padat [12]. Penelitian berikutnya berjudul "Perancangan *Wireless Sensor Network* Menggunakan Teknologi Multisensor Sebagai Sistem Monitoring Kualitas Udara". Tujuan penelitian ini adalah merancang sistem monitoring kualitas udara berbasis *Wireless Sensor Network* (WSN) dengan teknologi multisensor yang dapat memantau beberapa parameter secara *real-time* dan akurat. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa sistem dapat mengirim data parameter kualitas udara secara *wireless* dari berbagai titik ke server secara *real-time*, data kemudian disimpan dan dapat diakses melalui aplikasi android maupun web. Sistem ini dilengkapi lokasi geografis untuk memudahkan penentuan posisi alat [13]. Penelitian berikutnya berjudul "*Internet Of Things-Based Indoor Air Quality Monitoring System Design*". Tujuan penelitian ini untuk merancang dan mengembangkan sistem monitoring kualitas udara dalam ruangan berbasis *Internet Of Things*

(IoT) yang mampu mengirimkan data secara *real-time* ke platform tertentu dan menampilkan hasilnya dalam bentuk angka dan grafik. Hasil penelitian sistem monitoring udara berbasis IoT ini berhasil mengirimkan data kualitas udara ke platform OVoRD dan menampilkan data tersebut dalam bentuk angka dan grafik [14]. Penelitian selanjutnya berjudul "Rancang Bangun Sistem Pemantauan Kapasitas Udara Berbasis IoT dengan Sensor DHT11 dan Sensor MQ135". Penelitian ini bertujuan merancang dan membangun sistem pemantauan kualitas udara berbasis IoT yang dapat memonitor parameter seperti suhu, kelembapan, dan konsentrasi gas di laboratorium secara *real-time* dan akurat. Hasil penelitian menunjukkan sistem mampu merespon perubahan kadar gas dengan akurasi yang baik, dengan nilai respon sebesar 0,85, 0,97, dan 0, 93 untuk alkohol, melalui aplikasi berbasis IoT [15]. Penelitian terakhir berjudul "*Internet of Things* pada Sistem *Monitoring* Kualitas Udara Menggunakan Web Server". Penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem monitoring kualitas udara berbasis IoT yang dapat mendeteksi parameter seperti CO, NO₂, dan PM2.5 secara *real-time* dan menampilkan hasilnya melalui *web server*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa alat mampu mendeteksi gas CO dan PM2.5 dalam kondisi baik untuk manusia, sedangkan gas NO₂ dinyatakan tidak sehat. Sistem juga mampu berjalan baik secara *real-time* dan mampu menampilkan data melalui *web server* [16].

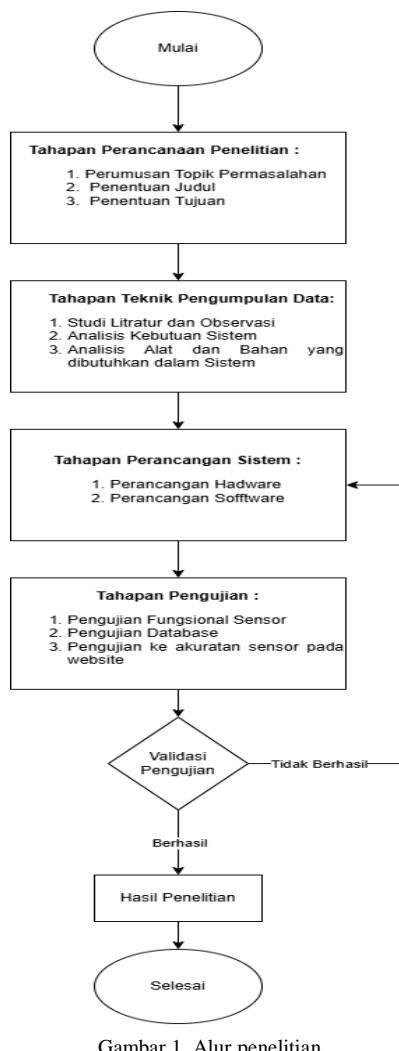
Penerapan IoT dan aplikasi web di pabrik kelapa sawit seperti PT. Gemareksa Mekarsari masih terbatas, terutama karena kurangnya kesadaran dan infrastruktur. Oleh karena itu, perancangan sistem pemantauan kualitas udara berbasis IoT dengan integrasi data *real-time* sangat penting untuk meningkatkan pengelolaan udara, menciptakan lingkungan kerja yang sehat, dan mengurangi dampak industri terhadap lingkungan sekitar.

II. METODE

Penelitian difokuskan pada rancangan dan analisis sistem yang mampu mengukur parameter kualitas udara, seperti gas berbahaya secara *real-time*. Data kemudian akan diintegrasikan dalam aplikasi web. Alur penelitian dapat dilihat pada gambar 1.

Penelitian dimulai dengan identifikasi kebutuhan pemantauan kualitas udara, seperti deteksi polutan (CO, CH₄, NH₃) yang berpotensi membahayakan kesehatan. Studi literatur dilakukan untuk memahami teknologi relevan, seperti sensor gas MQ-135 dan MQ-2, mikrokontroler ESP32, serta sistem manajemen baterai (BMS). Selanjutnya, sistem dirancang dengan integrasi sensor, mikrokontroler, baterai, dan koneksi Wi-Fi untuk mengirim data ke server secara *real-time*. Implementasi perangkat keras melibatkan pemasangan komponen utama, seperti sensor dan expansion board ESP32, sedangkan perangkat lunak dikembangkan menggunakan Arduino IDE untuk membaca dan mengirim data ke aplikasi web berbasis C++. Pengujian sistem dilakukan di lapangan untuk mengevaluasi akurasi sensor,

koneksi Internet, dan keandalan data yang ditampilkan di aplikasi web. Data kualitas udara yang diperoleh dianalisis untuk memahami pola polusi dan memberikan rekomendasi untuk pengelolaan udara yang lebih baik. Penelitian ini diakhiri dengan dokumentasi seluruh proses dan penyusunan laporan yang mencakup analisis, performa sistem, dan saran.



Gambar 1. Alur penelitian.

A. Tahapan Perencanaan

Tahap perencanaan merupakan tahap awal dalam penelitian ini, yang mencakup perumusan topik masalah, penentuan judul, dan penetapan tujuan penelitian. Peneliti mengumpulkan isu dari berbagai sumber seperti jurnal, buku, skripsi sebelumnya, serta artikel berita dan artikel terpercaya, lalu menganalisis data yang diperoleh untuk merumuskan permasalahan yang relevan. Berdasarkan hasil analisis tersebut, ditetapkan judul penelitian “Perancangan Monitoring Kualitas Udara Berbasis IoT Integrasi Data Real-time ke Aplikasi Web di Lingkungan Pabrik Kelapa Sawit PT. Gemareksa Mekarsari”. Selanjutnya, peneliti merumuskan tujuan penelitian yang menjelaskan hasil dan capaian yang ingin diraih dari penelitian ini.

B. Tahapan Teknik Pengumpulan Data

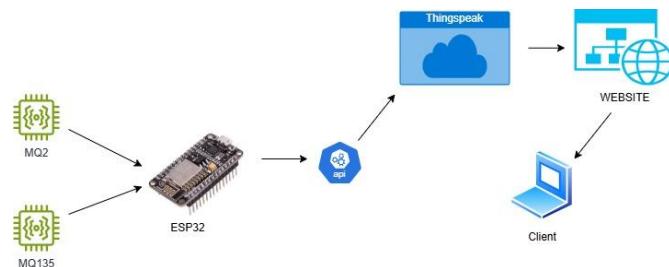
Kebutuhan fungsional dari sistem ini mencakup kemampuan untuk membaca parameter kualitas udara seperti CO, CH₄, dan NH₃ menggunakan sensor, mengirimkan data secara real-time ke server untuk dianalisis, serta menampilkan data tersebut melalui aplikasi web dalam bentuk grafik dan peringatan jika nilai parameter melebihi batas aman. Sementara itu, kebutuhan non-fungsional meliputi aspek keamanan data yang harus dilindungi dengan enkripsi, ketahanan sistem terhadap kondisi lingkungan ekstrem seperti suhu tinggi, kelembapan, dan debu, serta kemampuan sistem dalam merespon secara real-time dengan waktu tanggap maksimal lima detik. Adapun alat dan bahan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 1.

TABEL 1.
ALAT DAN BAHAN.

No	Nama Alat dan Bahan	Jumlah
1	Solder listrik AC 60W	1
2	Cutter	1
3	Tang potong	1
4	Gunting	1
5	NodeMCU (ESP32)	1
6	Sensor MQ-2	1
7	Sensor MQ-135	1
8	Board expansion ESP	1
9	OLED 0,96	1
10	Battery Management System (BMS)	1
11	Baterai lithium-ion	2
12	Kabel pita 24 awg	5 (1 meter)
13	Kabel USB Micro	1
14	Box plastik	1
15	Buzzer	1
16	TP4056	1

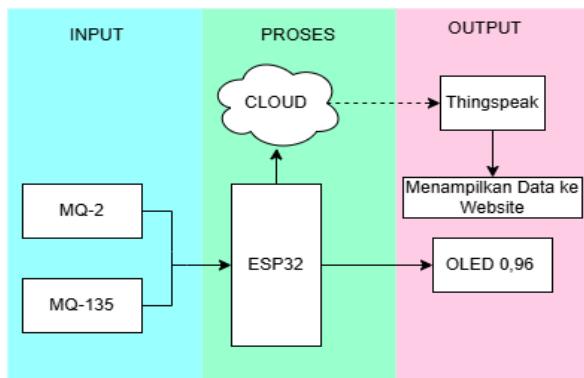
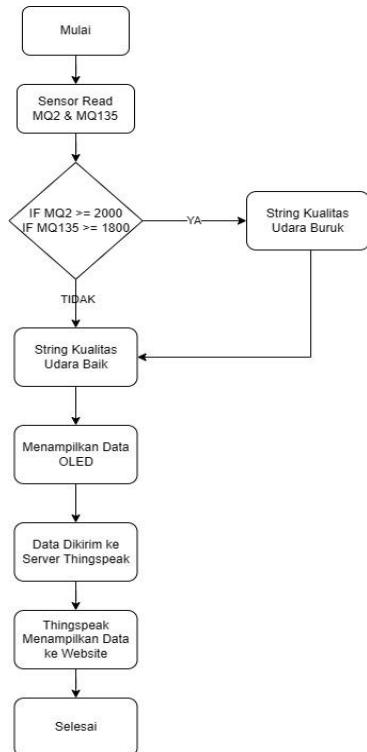
C. Tahapan Perancangan Sistem

Tahapan ini dilakukan dengan membuat gambaran umum sistem *hardware* dan *software*. Adapun gambaran umum dari perancangan sistem seperti pada Gambar 2.



Gambar 2. Gambaran umum sistem.

Dari gambaran umum dan analisis kebutuhan, kemudian dibentuk *flowchart* algoritma sistem, dan blok diagram seperti pada Gambar 3.

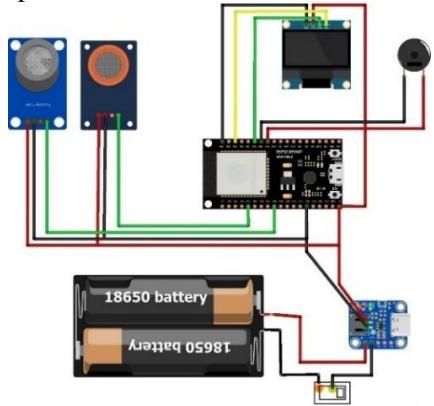


Gambar 3. Flowchart algoritma sistem

Sistem ini menggunakan sensor MQ-2 dan MQ-135 yang berfungsi untuk mendeteksi gas berbahaya, seperti metana, CO, dan NH₃. Sensor mengirim data ke ESP32 yang bertindak sebagai unit pemrosesan utama sebelum data diteruskan ke API dan dikirim ke ThingSpeak yang merupakan platform berbasis *cloud* untuk menyimpan dan menganalisis data. Informasi kualitas udara yang telah dikumpulkan dapat diakses melalui website oleh *user*. Selain itu, hasil pembacaan sensor juga ditampilkan pada layar OLED 0.96 inci yang ada pada pabrik. Battery Management System (BMS) berfungsi untuk memastikan pengelolaan daya baterai efisien, termasuk pengisian ulang dan perlindungan terhadap *overcharge* atau *overdischarge*. Baterai juga dihubungkan dengan TP4056 guna mengatur pengisian ulang baterai Li-Ion atau Li-Po secara aman dan efisien. Rangkaian ini dilengkapi dengan buzzer yang terpasang pada NodeMCU yang berfungsi untuk

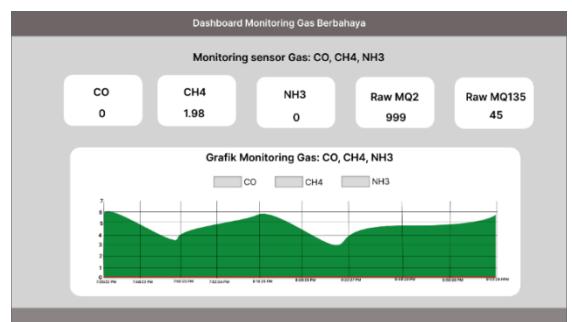
memberikan peringatan suara pada berbagai aplikasi IoT seperti sistem alarm atau notifikasi status sensor.

Pada tahap perancangan komponen *hardware* ini meliputi rangkaian *input* yang ditangani oleh sensor-sensor yang ada dan NodeMCU ESP32 yang berperan sebagai pemroses data dari sensor yang menjadi komponen utama dari rangkaian. Data yang telah di masukkan sensor akan diproses oleh NodeMCU ESP32 sehingga menghasilkan *output* serta peringatan pada *website* yang dibuat. Perancangan komponen dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Rangkaian keseluruhan komponen.

Tahap perancangan *software* bertujuan agar sistem dapat beroperasi sesuai perintah yang ditetapkan. Pada tahap ini digunakan Arduino IDE 2.0.0 untuk membuat, mengcompile, dan mengunggah kode, serta Laravel 8 sebagai framework. Sedangkan tampilan web dibangun dengan HTML, CSS, dan JavaScript. Pada website, *page dashboard monitoring* berfungsi sebagai halaman untuk memantau alat yang sudah dipasang dengan data yang sudah diolah dalam bentuk visualisasi. Selain itu, terdapat grafik analisis data dan indikator volume konsentrasi gas dalam periode waktu tertentu, yang memungkinkan pemantauan kondisi udara secara *real-time*. Tampilan *page dashboard monitoring* dapat dilihat pada gambar 5.

Gambar 5. Tampilan *page dashboard monitoring*.

D. Tahapan Pengujian

Penelitian ini melibatkan 45 pengukuran di tiga lokasi berbeda: area terbuka, area pemrosesan buah, dan area kantor pabrik (masing-masing 15 kali). Pendekatan multi-lokasi ini bertujuan menggambarkan distribusi spasial kualitas udara,

karena tiap lokasi memiliki potensi polusi yang berbeda. Area pemrosesan buah, misalnya, menghasilkan emisi gas lebih tinggi seperti CO, CH₄, dan NH₃.

Penggunaan beberapa node pengujian memungkinkan pemantauan simultan di banyak titik, sehingga data lebih akurat dan representatif. Jumlah 45 pengukuran ditentukan berdasarkan interval sampling dan kebutuhan stabilisasi sensor gas MQ-2 dan MQ-135, dengan waktu pemanasan 2 menit dan interval ideal pengambilan data tiap 3 menit.

Pengujian dilakukan selama dua hari, masing-masing pada pagi dan sore untuk menangkap dinamika harian. Hari pertama mewakili kondisi saat pembakaran aktif, sementara hari kedua saat pembakaran tidak dilakukan, agar data dapat dibandingkan secara temporal dan spasial secara valid. Tabel skenario pengujian dapat dilihat pada Tabel 2.

TABEL 2.
SKENARIO PENGUJIAN.

No	Keterangan	Jumlah
1	Total keseluruhan pengukuran	45 pengukuran
2	Total pengukuran untuk setiap titik	
	Tempat terbuka area pabrik	15
	Tempat pemrosesan dan penyimpanan buah	15
	Kantor pabrik	15
3	Durasi penelitian	2 hari
	Sensor MQ-2	45 (2 kali perhari x 2 hari)
	Sensor MQ-135	45 (2 kali perhari x 2 hari)
4	Waktu pengukuran (per hari)	
	Pagi	1x per hari
	Sore	1x perhari

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan hasil dari implementasi dan pengujian sistem pemantauan kualitas udara berbasis IoT yang telah dirancang. Pengujian dilakukan terhadap beberapa aspek utama, meliputi fungsi komponen perangkat keras, pengujian kode program, proses kalibrasi sensor, implementasi alat di lapangan, serta keandalan pengiriman data ke server web ThingSpeak. Hasil pengujian dikaji untuk menilai kinerja sistem dalam membaca, mengolah, dan menampilkan data kualitas udara secara real-time di lingkungan pabrik kelapa sawit PT. Gemareksa Mekarsari.

Penelitian ini melibatkan 45 pengukuran dalam dua hari di tiga lokasi berbeda sebagai bagian dari uji awal (pilot testing) sistem pemantauan kualitas udara berbasis IoT. Meskipun hasil yang diperoleh menunjukkan konsistensi pembacaan dan kemampuan sistem dalam mendeteksi variasi konsentrasi gas antar lokasi dan waktu, jumlah pengukuran yang terbatas belum cukup untuk menarik kesimpulan yang kuat terkait tren jangka panjang atau potensi anomali kualitas udara di lingkungan pabrik. Oleh karena itu, diperlukan pengujian lanjutan dalam jangka waktu yang lebih panjang guna memperoleh data yang lebih representatif secara temporal dan

mendukung validasi sistem secara menyeluruh. Studi jangka panjang juga dibutuhkan untuk menangkap fluktuasi musiman, beban operasional berbeda, dan pengaruh aktivitas industri terhadap kualitas udara secara lebih akurat.

A. Pengujian Komponen

Pengujian dilakukan untuk memastikan tiap komponen berfungsi dengan baik. NodeMCU ESP32 diuji dengan mengunggah program melalui Arduino IDE untuk koneksi jaringan lokal, dan hasilnya berhasil menyala serta menjalankan program pada lima percobaan. Sensor MQ-2 dan MQ-135 diuji untuk mendeteksi kualitas udara di pabrik kelapa sawit PT. Gemareksa Mekarsari, masing-masing untuk gas CO, CH₄, dan NH₃. Keduanya menunjukkan respons baik dan berhasil mendeteksi udara sesuai fungsinya dalam lima percobaan. Modul OLED juga diuji dengan program untuk menampilkan data sensor, dan mampu menampilkan hasil dengan baik pada semua percobaan. Dalam proses pengujian ini juga melibatkan pengujian respon database dengan melihat seberapa cepat data yang dikirim ke *database* ThingSpeak, waktu kirim dari NodeMCU ke waktu yang diterima oleh ThingSpeak dapat dilihat pada Tabel 3.

TABEL 3.
DATABASE THINGSPEAK

No	NodeMCU	ThingSpeak	Delay
1	09.03	09.03	0.00
2	09.06	09.06	0.00
3	09.09	09.10	1.00
4	09.10	09.10	0.00
5	09.11	09.11	0.00
6	09.12	09.12	0.00
7	09.13	09.13	0.00
8	09.14	09.14	0.00
9	09.15	09.16	1.00
10	09.16	09.16	0.00
11	09.17	09.17	0.00
12	09.18	09.18	0.00
13	09.19	09.19	0.00
14	09.20	09.20	0.00
15	09.21	09.21	0.00

Dari tabel diatas, total data yang dihasilkan ada 15, dengan data tanpa delay berjumlah 13, dan total data delay sebanyak 2, sehingga akan dilakukan perhitungan akurasi dengan rumus:

$$\text{Akurasi} = \left(\frac{\text{jumlah data tanpa delay}}{\text{total data}} \right) \times 100\%$$

$$\text{Akurasi} = \left(\frac{13}{15} \right) \times 100\% = 86.67\%$$

Dari pengujian didapatkan hasil akhir total delay 2 menit rata-rata delay 1 menit, jumlah data delay 2 dari 15 data akurasi pengiriman 86.67%. Nilai akurasi merujuk pada keberhasilan sistem dalam mengirim data ke server ThingSpeak tanpa *delay*, bukan akurasi pembacaan sensor terhadap konsentrasi gas.

B. Pengujian Kode Program

Pengujian dilakukan untuk memastikan tidak ada kesalahan pada kode program yang diupload ke NodeMCU ESP32 saat mengirimkan data yang telah diukur oleh sensor ke server. Seluruh pengujian kode program melalui Arduino IDE menunjukkan bahwa kode program berhasil di *upload* tanpa *error*. Kode program dapat dilihat pada link berikut: https://github.com/6gid/monitoring-gas_G.git.

C. Kalibrasi Sensor

Sistem yang dikembangkan belum dibandingkan secara langsung dengan alat kalibrasi profesional, sehingga proses kalibrasi mengacu pada dataset resmi sensor, serta menggunakan metode regresi logaritmik dan regresi perangkat untuk menentukan konstanta dan akurasi pembacaan gas. Kalibrasi sensor dilakukan pada sensor MQ-135 dan MQ-2 merupakan jenis semikonduktor yang dikenal memiliki keunggulan dari segi harga dan kemudahan integrasi, namun juga memiliki keterbatasan, terutama dalam hal drift jangka panjang dan sensitivitas terhadap faktor lingkungan, seperti suhu, kelembapan, dan debu [17]. Untuk meminimalkan kesalahan pembacaan, kalibrasi manual awal dilakukan berdasarkan kurva karakteristik dari datasheet sensor dengan menentukan nilai R_0 di udara bersih, lalu digunakan dalam perhitungan logaritmik untuk memperoleh nilai ppm. Namun, karena keterbatasan alat, gas referensi standar tidak digunakan, dan kalibrasi otomatis maupun periodik belum diterapkan. Oleh karena itu, hasil pengukuran bersifat relatif terhadap kondisi lingkungan. Penelitian selanjutnya disarankan untuk menerapkan kalibrasi rutin menggunakan gas standar atau metode multi-sensor, serta membandingkannya dengan alat kalibrasi profesional untuk meningkatkan akurasi dalam jangka panjang. Berdasarkan hasil pengujian sensor MQ-135 terhadap gas amonia (NH_3), diperoleh nilai konstanta kalibrasi sebagai berikut:

- RL (*Load Resistance*) = 10 k Ω , merupakan nilai resistansi eksternal yang digunakan dalam rangkaian pembagi tegangan sensor.
- R_0 $_{\text{NH}_3}$ = 1.88 k Ω , merupakan resistansi sensor dalam udara bersih (baseline resistance) yang telah dikalibrasi khusus untuk deteksi NH_3 .
- Nilai slope (b) = -0.417 dan intercept (a) = 0.843, diperoleh dari linearisasi kurva karakteristik sensor menggunakan regresi logaritmik.

Persamaan umum yang digunakan untuk menghitung konsentrasi NH_3 (ppm) dari pembacaan sensor adalah :

$$ppm = \left(\frac{R_s}{R_0 \cdot a} \right)^{\frac{1}{b}}$$

Dengan memasukkan nilai konsentrasi hasil pengujian ($a = 10^b = 10^{0.843} \approx 6.97$, $b = m = -0.417$), rumus tersebut dapat ditulis ulang sebagai:

$$ppm = \left(\frac{R_s}{1.88 \cdot 6.97} \right)^{\frac{1}{-0.417}} = \left(\frac{R_s}{13.10} \right)^{-2.40}$$

Di mana R_s dihitung dari tegangan *output* sensor (V_{out}) menggunakan rumus:

$$R_s = RL \cdot \left(\frac{V_{\text{cc}} - V_{\text{out}}}{V_{\text{out}}} \right)$$

Contoh Perhitungan:

Jika $V_{\text{cc}} = 5$ V dan $V_{\text{out}} = 2.1$ V, maka:

$$R_s = 10 \cdot \left(\frac{5 - 2.1}{2.1} \right) = 13.81 \text{ k}\Omega$$

Konsentrasi NH_3 (ppm) adalah :

$$ppm = \left(\frac{13.81}{13.10} \right)^{-2.40} \approx 0.92 \text{ ppm}$$

Kalibrasi sensor MQ-2 dilakukan untuk menentukan hubungan antara nilai resistansi sensor (R_s) dengan konsentrasi gas target (dalam ppm). Berdasarkan hasil pengujian, diperoleh parameter kalibrasi untuk dua jenis gas, yaitu CO dan Metana (CH_4). Parameter yang digunakan dalam proses kalibrasi adalah sebagai berikut:

Load Resistance (RL): 10 k Ω

a. Resistansi di Udara Bersih (R_0):

$$R_0 \text{ CO} = 2.4 \text{ k}\Omega$$

$$R_0 \text{ CH}_4 = 2.6 \text{ k}\Omega$$

Parameter Regresi Pangkat:

b. Untuk CO:

$$\text{Slope (b CO)} = -0.301$$

$$\text{Intercept (a CO)} = 10^{1.079} \approx 12.0$$

c. Untuk CH_4 :

$$\text{Slope (b CH}_4) = -0.398$$

$$\text{Intercept (a CH}_4) = 10^{1.194} \approx 15.6$$

Persamaan umum untuk menghitung konsentrasi gas (ppm) dari resistansi sensor (RS) adalah:

$$ppm = \left(\frac{R_s}{R_0 \cdot a} \right)^{\frac{1}{b}}$$

Implementasi untuk CO:

$$ppm_{\text{CO}} = \left(\frac{R_s \text{ CO}}{2.4 \cdot 12.0} \right)^{\frac{1}{-0.301}} = \left(\frac{R_s \text{ CO}}{28.8} \right)^{-3.32}$$

Implementasi untuk CH_4 :

$$ppm_{\text{CH}_4} = \left(\frac{R_s \text{ CH}_4}{2.6 \cdot 15.6} \right)^{\frac{1}{-0.398}} = \left(\frac{R_s \text{ CH}_4}{40.56} \right)^{-2.51}$$

Nilai RS dihitung dari tegangan *output* sensor (V_{out}) menggunakan rumus:

$$R_s = RL \cdot \left(\frac{V_{\text{cc}} - V_{\text{out}}}{V_{\text{out}}} \right)$$

Jika $V_{\text{cc}} = 5$ V dan $V_{\text{out}} = 1.5$ V:

$$R_s = 10 \cdot \left(\frac{5 - 1.5}{1.5} \right) = 23.33 \text{ k}\Omega$$

Implementasi untuk CO:

$$ppm_{\text{CO}} = \left(\frac{23.33}{28.8} \right)^{-3.32} \approx 2.1 \text{ ppm}$$

Implementasi untuk CH_4 :

$$ppm_{\text{CH}_4} = \left(\frac{23.33}{40.56} \right)^{-2.51} \approx 0.8 \text{ ppm}$$

D. Implementasi alat

Produk yang telah dirakit dan siap pakai diuji di lingkungan pabrik kelapa sawit PT. Gemareksa Mekarsari pada tiga titik: area terbuka, tempat pemrosesan dan penyimpanan buah, serta kantor pabrik, seperti pada Gambar 6.



Gambar 6. Implementasi Alat

Setelah alat terpasang dan dipastikan berjalan dengan baik, alat dicek kemampuannya dalam membaca data kualitas udara, menampilkan data secara langsung *real-time*, dan mengirimkan data ke aplikasi web. Hasilnya, alat dapat membaca CO, NH₄, dan NH₃. Pengujian dilakukan beberapa kali dalam kondisi yang berbeda untuk memastikan alat akurat. Setiap titik memiliki 15 pengukuran sebagai pengujian datanya, dalam satu pengiriman data membutuhkan waktu 3 menit, maka waktu yang dibutuhkan setiap titik adalah 45 menit dengan total 45 pengukuran. Sebelum menggunakan alat, lakukan *pre-heating* sensor agar mendapatkan hasil yang optimal. Pengujian alat di lakukan dalam rentang waktu dua hari pagi dan sore hari. Data hasil pengujian hari pertama dapat dilihat pada Tabel 1 dan Tabel 2.

TABEL 1.
HASIL PENGUJIAN HARI PERTAMA PAGI HARI

Titik 1			Titik 2			Titik 3		
CO	CH ₄	NH ₃	CO	CH ₄	NH ₃	CO	CH ₄	NH ₃
0.10	3.10	0.01	0.20	3.50	0.01	0.30	3.50	0.015
0.30	4.50	0.02	0.10	3.80	0.018	0.25	2.75	0.017
0.50	2.35	0.00	0.30	4.20	0.017	0.40	2.90	0.016
0.20	3.80	0.03	0.40	2.45	0.020	0.20	2.80	0.013
0.00	2.70	0.02	0.05	4.00	0.019	0.10	2.70	0.018
0.40	3.00	0.00	0.25	3.20	0.018	0.50	3.20	0.019
0.70	5.00	0.04	0.00	2.70	0.020	0.35	2.65	0.017
0.25	2.90	0.01	0.15	2.65	0.017	0.45	2.60	0.018
0.15	4.20	0.02	0.35	3.10	0.021	0.30	3.00	0.016
0.05	1.50	0.02	0.00	2.90	0.016	0.15	3.40	0.015
0.45	3.35	0.01	0.05	4.30	0.019	0.20	2.90	0.014
0.10	2.60	0.02	0.01	3.00	0.018	0.35	2.50	0.018
0.60	4.10	0.03	0.15	2.55	0.017	0.00	2.45	0.017
0.35	2.50	0.00	0.00	2.45	0.015	0.50	2.30	0.019
0.00	2.80	0.01	0.20	3.80	0.020	0.05	2.80	0.016

TABEL 2.
HASIL PENGUJIAN HARI PERTAMA SORE HARI

Titik 1			Titik 2			Titik 3		
CO	CH ₄	NH ₃	CO	CH ₄	NH ₃	CO	CH ₄	NH ₃
0.10	4.50	0.04	0.15	3.50	0.01	0.30	2.90	0.015
0.20	3.90	0.01	0.25	2.80	0.018	0.25	2.50	0.017
0.30	1.70	0.02	0.20	4.20	0.017	0.40	2.70	0.016
0.15	3.20	0.02	0.10	2.45	0.020	0.20	2.80	0.013
0.05	4.80	0.05	0.30	4.00	0.019	0.10	2.60	0.018
0.20	5.40	0.01	0.05	3.20	0.018	0.50	2.50	0.019
0.70	2.80	0.00	0.00	2.70	0.020	0.35	2.90	0.017
0.25	5.40	0.02	0.10	2.65	0.017	0.45	2.60	0.018
0.40	1.80	0.01	0.30	3.10	0.021	0.30	3.00	0.016
0.00	3.60	0.01	0.25	2.90	0.016	0.15	2.40	0.015
0.30	4.50	0.15	0.15	4.30	0.019	0.20	2.55	0.014
0.05	4.00	0.20	0.20	3.00	0.018	0.35	2.45	0.018
0.20	3.70	0.35	0.35	4.55	0.017	0.00	3.00	0.017
0.10	2.80	0.10	0.10	2.45	0.015	0.50	2.70	0.019
0.00	2.80	0.20	0.20	3.80	0.020	0.05	2.80	0.016

Di titik 1 (area terbuka pabrik), kadar gas cenderung stabil antara pagi dan sore. CO berada di kisaran 0.00–0.70 ppm, CH₄ sedikit meningkat di sore hari (1.70–5.40 ppm) dibanding pagi (1.50–5.00 ppm), sedangkan NH₃ naik tipis dari 0.00–0.04 ppm menjadi 0.00–0.05 ppm. Ini menunjukkan adanya emisi ringan yang meningkat seiring waktu. Pada titik 2 (area pemrosesan dan penyimpanan buah), kadar CO relatif rendah dan menurun di sore hari (0.00–0.35 ppm). CH₄ menunjukkan sedikit kenaikan (pagi: 2.45–4.30 ppm, sore: 2.45–4.55 ppm), kemungkinan karena fermentasi buah. NH₃ stabil di kisaran 0.015–0.021 ppm sepanjang hari. Sementara di titik 3 (kantor pabrik), kadar gas lebih rendah. CO tetap pada 0.00–0.50 ppm, CH₄ sedikit turun dari pagi (2.30–3.50 ppm) ke sore (2.40–3.00 ppm), dan NH₃ stabil antara 0.013–0.019 ppm. Ini menunjukkan kondisi dalam ruangan relatif aman dengan emisi rendah. Data hasil pengujian hari kedua dapat dilihat pada Gambar 8.

TABEL 3.
HASIL PENGUJIAN HARI KEDUA PAGI HARI

Titik 1			Titik 2			Titik 3		
CO	CH ₄	NH ₃	CO	CH ₄	NH ₃	CO	CH ₄	NH ₃
0.20	3.20	0.01	0.15	3.50	0.01	0.20	3.20	0.015
0.25	4.80	0.02	0.25	2.80	0.018	0.30	2.60	0.017
0.40	2.60	0.00	0.20	4.20	0.017	0.40	2.80	0.016
0.10	3.00	0.03	0.10	2.45	0.020	0.10	2.90	0.013
0.00	2.40	0.02	0.30	4.00	0.019	0.25	2.75	0.018
0.50	3.90	0.01	0.05	3.20	0.018	0.35	3.50	0.019
0.15	4.10	0.04	0.00	2.70	0.020	0.00	2.60	0.017
0.30	3.50	0.01	0.10	2.65	0.017	0.15	2.40	0.018
0.20	2.90	0.02	0.30	3.10	0.021	0.00	3.10	0.016
0.05	1.80	0.02	0.25	2.90	0.016	0.20	2.75	0.015
0.35	3.25	0.01	0.15	4.30	0.019	0.25	3.40	0.014
0.45	2.70	0.02	0.20	3.00	0.018	0.10	2.50	0.018
0.10	4.20	0.02	0.35	4.55	0.017	0.30	2.45	0.017
0.00	2.55	0.00	0.10	2.45	0.015	0.15	2.90	0.016
0.30	2.85	0.01	0.20	3.80	0.020	0.05	1.80	0.015

TABEL 4.
HASIL PENGUJIAN HARI KEDUA SORE HARI

Titik 1			Titik 2			Titik 3		
CO	CH ₄	NH ₃	CO	CH ₄	NH ₃	CO	CH ₄	NH ₃
0.25	4.70	0.03	0.10	4.10	0.03	0.10	3.20	0.015
0.30	3.00	0.01	0.30	3.20	0.01	0.20	2.40	0.017
0.40	1.90	0.02	0.40	2.80	0.02	0.30	3.80	0.016
0.50	3.80	0.02	0.00	2.70	0.018	0.15	2.80	0.013
0.15	4.40	0.05	0.20	4.50	0.019	0.40	3.50	0.018
0.20	2.50	0.01	0.30	2.50	0.020	0.30	2.90	0.019
0.30	5.10	0.00	0.25	3.10	0.021	0.05	2.60	0.017
0.10	1.80	0.02	0.15	3.80	0.017	0.35	2.45	0.018
0.25	3.50	0.01	0.30	2.85	0.018	0.20	3.10	0.016
0.20	2.60	0.02	0.10	2.60	0.015	0.10	2.50	0.015
0.10	4.00	0.03	0.25	4.00	0.017	0.30	2.70	0.014
0.30	4.20	0.05	0.35	2.90	0.016	0.15	3.20	0.018
0.10	3.90	0.02	0.00	2.80	0.018	0.05	2.80	0.017
0.20	2.80	0.01	0.10	3.40	0.020	0.10	2.30	0.016
0.00	3.10	0.03	0.20	3.50	0.015	0.05	1.90	0.015

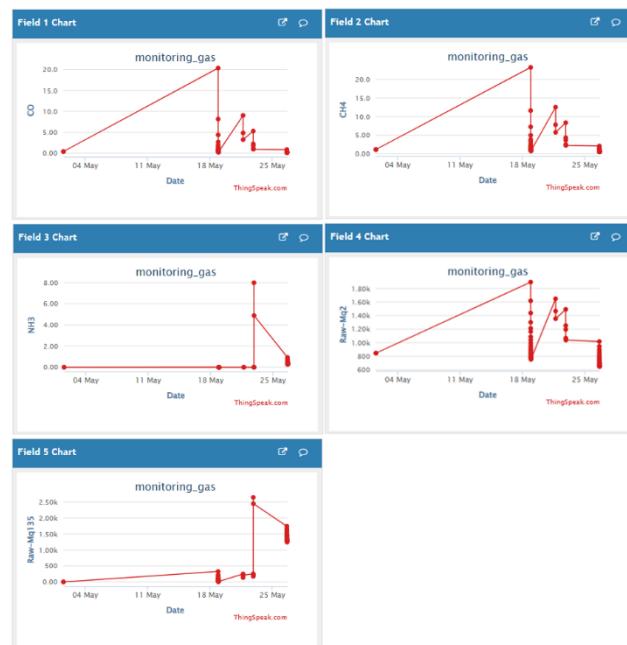
Pada hari kedua, di titik 1 (area terbuka), kadar CO pagi dan sore sama-sama berada di kisaran 0.00–0.50 ppm, menunjukkan fluktuasi ringan dan stabil. CH₄ sedikit meningkat dari pagi (1.80–4.80 ppm) ke sore (1.80–5.10 ppm), diduga akibat akumulasi emisi atau peningkatan suhu. NH₃ naik tipis dari 0.00–0.04 ppm menjadi 0.00–0.05 ppm, namun tetap dalam batas rendah. Di titik 2 (pemrosesan dan penyimpanan buah), CO tetap rendah dan stabil (pagi: 0.00–0.35 ppm; sore: 0.00–0.40 ppm). CH₄ berkisar antara 2.45–4.55 ppm (pagi) dan 2.50–4.50 ppm (sore), menunjukkan aktivitas fermentasi yang berkontribusi pada emisi. NH₃ sedikit bervariasi (pagi: 0.015–0.021 ppm; sore: 0.01–0.03 ppm), namun tetap aman. Di titik 3 (kantor), CO berada dalam kisaran aman (pagi: 0.00–0.40 ppm; sore: 0.05–0.40 ppm). CH₄ menunjukkan sedikit peningkatan dari 1.80–3.50 ppm (pagi) ke 1.90–3.80 ppm (sore). NH₃ tetap stabil sepanjang hari di 0.013–0.019 ppm, mencerminkan lingkungan dalam ruangan yang bersih dan minim emisi.

Delay pengiriman data disebabkan oleh keterbatasan jaringan WiFi di lingkungan pabrik dan batas waktu minimum (rate limit) ThingSpeak sebesar 15 detik untuk pengguna gratis. Selain itu, beban kerja mikrokontroler dalam membaca sensor dan mengirim data secara bersamaan juga dapat memicu keterlambatan. Delay yang terjadi hanya sekitar 1 menit dan masih dalam batas toleransi sistem.

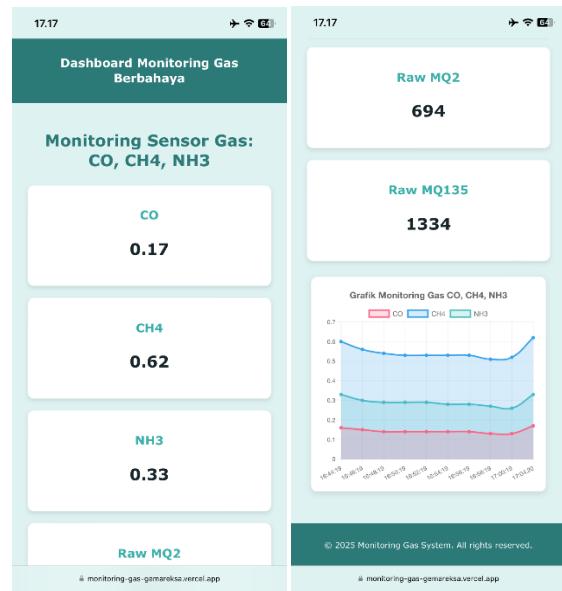
E. Pengujian Web

Pengujian web menunjukkan bahwa sistem berhasil mengirim data dari NodeMCU ke server ThingSpeak dengan stabil. Dari 15 percobaan, 13 berhasil dikirim tanpa delay (0 menit), dan hanya 2 yang mengalami keterlambatan 1 menit. Hal ini menandakan arsitektur jaringan dan konfigurasi IoT cukup andal untuk pemantauan real-time di lingkungan pabrik. Data dikirim dan langsung tampil di dashboard ThingSpeak, dengan variabel CO, CH₄, NH₃, serta data mentah (Raw) dari sensor MQ-2 dan MQ-135, seperti terlihat pada Gambar 9. Responsivitas website diuji pada dua perangkat. Gambar 10 menunjukkan tampilan website di smartphone (resolusi 2796×1290 piksel), dan Gambar 11

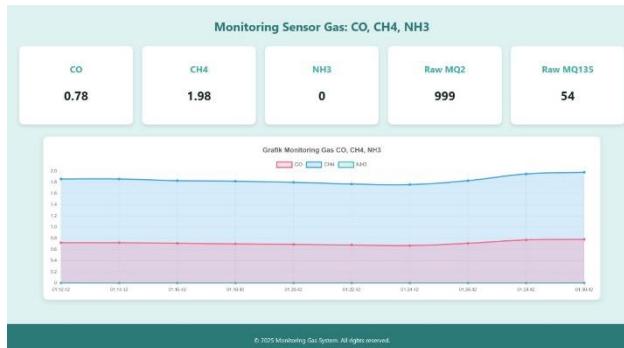
menampilkan versi laptop (resolusi 1920×1080 piksel), yang keduanya berjalan dengan baik. Antarmuka web pada sistem ini dirancang sebagai responsive dashboard yang dapat diakses melalui berbagai perangkat (desktop maupun mobile). Dashboard dibangun menggunakan HTML, CSS, dan JavaScript murni (vanilla JS) tanpa framework frontend seperti React atau Vue. Desain responsif diatur dengan pendekatan CSS Flexbox dan media queries untuk memastikan tampilan tetap optimal di berbagai ukuran layar. Pemilihan teknologi ini dilakukan untuk menjaga kesederhanaan sistem dan kemudahan integrasi dengan backend berbasis Laravel.



Gambar 9. Database ThingSpeak



Gambar 10. Tampilan website di smartphone



Gambar 11. Tampilan website di laptop

Berdasarkan hasil pengujian sistem pemantauan kualitas udara berbasis NodeMCU ESP32, alat berhasil bekerja sesuai rancangan. Sensor MQ-2 dan MQ-135 dapat membaca gas CO, CH₄, dan NH₃ secara akurat setelah proses pemanasan selama 1 jam. Buzzer aktif saat ketiga ambang batas terpenuhi: CH₄ > 10 ppm, CO > 10 ppm, dan NH₃ > 3 ppm. OLED juga mampu menampilkan data sensor secara real-time. Pengujian dilakukan di tiga titik: area terbuka (titik 1), area pemrosesan buah (titik 2), dan kantor pabrik (titik 3), masing-masing selama dua hari dengan 15 kali pengukuran per titik. Hasil menunjukkan fluktuasi gas yang wajar sesuai kondisi dan aktivitas di lokasi. Titik 1 menunjukkan gas stabil dengan sedikit kenaikan CH₄ dan NH₃ di sore hari. Titik 2 mencatat fluktuasi CH₄ yang lebih tinggi, kemungkinan akibat aktivitas fermentasi. Titik 3 memiliki kadar gas paling rendah dan stabil. Pengujian sistem web menunjukkan keandalan tinggi: dari 15 percobaan, 13 berhasil dikirim dengan delay 0 menit, dan 2 dengan delay 1 menit. Ini membuktikan koneksi Wi-Fi dan konfigurasi IoT sudah stabil, bahkan dalam lingkungan pabrik. Data ditampilkan hampir real-time di dashboard ThingSpeak, yang juga menyimpan data mentah untuk analisis lebih lanjut. Uji tampilan website pada smartphone dan laptop menunjukkan antarmuka yang responsif dan mudah diakses. Secara keseluruhan, sistem terbukti bekerja optimal dan dapat menjadi solusi pemantauan udara yang efektif untuk lingkungan industri.

IV. KESIMPULAN

Pengujian kualitas udara menggunakan sensor CO, CH₄, dan NH₃ di tiga titik berbeda selama dua hari menunjukkan hasil stabil. Kadar CO berada di kisaran 0.00–0.70 ppm, CH₄ antara 1.50–5.40 ppm, dan NH₃ pada 0.00–0.05 ppm. Variasi kadar gas terutama terjadi di Titik 1 (area terbuka) dan Titik 2 (pemrosesan), sedangkan Titik 3 (kantor) menunjukkan kadar gas lebih rendah dan stabil karena ventilasi yang baik. Pada sisi sistem, pengujian IoT dengan NodeMCU dan ThingSpeak mencatat 13 dari 15 pengiriman data berhasil tanpa delay, dan dua lainnya mengalami keterlambatan satu menit. Data ditampilkan di dashboard web dalam waktu kurang dari satu menit, menunjukkan sistem bekerja real-time dan cukup andal meskipun berada di lingkungan pabrik.

Komunikasi antara ThingSpeak dan web dashboard dilakukan menggunakan ThingSpeak REST API, yang memungkinkan pengambilan data secara real-time dari channel sensor melalui permintaan HTTP (GET request). Web dashboard dibangun menggunakan HTML, CSS, dan JavaScript (vanilla JS), dan data ditampilkan secara dinamis dengan AJAX fetch() yang memanggil endpoint API dari ThingSpeak secara berkala (misalnya setiap 15 detik).

Proses ini tidak menggunakan framework frontend seperti React atau Vue, melainkan mengandalkan JavaScript murni untuk kesederhanaan dan efisiensi. Data yang diambil dari ThingSpeak disajikan dalam bentuk tabel, grafik, dan indikator status pada halaman dashboard agar mudah dipantau oleh pengguna.

Sistem masih memiliki keterbatasan dalam fitur aplikasi web, seperti absennya grafik historis dan notifikasi otomatis. Ketergantungan pada koneksi internet tanpa penyimpanan cadangan juga menjadi kendala saat jaringan tidak stabil. Selain itu, pengujian dilakukan dalam jangka waktu singkat dan belum divalidasi menggunakan alat standar industri.

Pengembangan selanjutnya disarankan untuk menambahkan fitur histori data, sistem notifikasi, dan penyimpanan cadangan untuk menjaga keamanan data. Pengujian jangka panjang serta validasi dengan alat standar perlu dilakukan untuk meningkatkan akurasi. Integrasi teknologi kecerdasan buatan juga dapat dipertimbangkan guna mendukung prediksi potensi lonjakan polusi udara di lingkungan industri.

Secara keseluruhan, sistem berhasil memantau kualitas udara dengan akurat dan responsif, serta menunjukkan potensi sebagai solusi efektif dalam pengendalian polusi udara di industri kelapa sawit.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. Li, C. Yu, R. Chen, J. Li, en J. Li, "Novel ionic liquid-type Gemini surfactants: Synthesis, surface property and antimicrobial activity", *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 395, nr. tourism, pp. 116–124, feb. 2012, doi: 10.1016/j.colsurfa.2011.12.014.
- [2] L. Pengabdian *e.a.*, "Data Mining Menggunakan Metode Naive Bayes Untuk Menetapkan Standar Untuk Produk Minyak Sawit Mentah Abdul Sidik", *EJECTS E-Journal Comput. Technol. Informations Syst.*, vol. 3, nr. 2, pp. 52–58, 2024.
- [3] M. Faisal, "Eksperimen Pembakaran dalam Boiler untuk Evaluasi Kinerja dan Emisi Menggunakan Bahan Bakar Padat Kelapa Sawit", *J. Serambi Eng.*, vol. IX, nr. 3, pp. 10175–10183, 2024, [Online]. <https://jse.serambimekkah.id/index.php/jse/article/view/422>
- [4] A. D. Prakoso en T. Wellem, "Perancangan dan Implementasi Sistem Pemantauan Kualitas Udara berbasis IoT menggunakan Wemos D1 Mini dan Android", *Build. Informatics, Technol. Sci.*, vol. 4, nr. 3, pp. 1246–1254, 2022, doi: 10.47065/bits.v4i3.2498.
- [5] M. G. Salasa, A. Rosadi, en N. Fahriani, "Perancangan Alat

- Monitoring Polusi Udara Berbasis Mikrokontroler Menggunakan Sensor Gas TGS-2442”, *Comput. Insight J. Comput. Sci.*, vol. 3, nr. 1, pp. 1–8, jul. 2021, doi: 10.30651/ci:jcs.v3i1.9146.
- [6] L. T. J. Turangan, H. Riogilang, en C. J. Supit, “Pengaruh Penggunaan Eco-Enzyme Terhadap Kualitas Udara Di Tempat Pembuangan Akhir Sumompo Kota Manado”, *Tekno*, vol. 22, nr. 88, pp. 1389–1397, 2024.
- [7] R. Sih Harsanti en R. Mustika Yasi, “Implementation of Ammonia (NH3) Gas Level Detection Tool in the Shrimp Processing Industry”, *J. Educ. Eng. Environ.*, vol. 1, nr. 2, pp. 22–25, 2023, doi: 10.36526/jeee.v1i2.2853.
- [8] G. Hergika, Siswanto, en S. S, “Perancangan Internet of Things (Iot) Sebagai Kontrol Infrastruktur Dan Peralatan Toll Pada Pt. Astra Infratoll Road”, *PROSISKO J. Pengemb. Ris. dan Obs. Sist. Komput.*, vol. 8, nr. 2, pp. 86–98, 2021, doi: 10.30656/prosisko.v8i2.3862.
- [9] M. Rizal, A. Arifin, M. F. Rasyd, A. A. M. Suradi, en A. Bahtiar, “Desain dan Implementasi Sistem Pemantauan Polusi Udara Berbasis Android Real-Time di SMKS Darul Ulum Layoa Bantaeng”, *MALCOM Indones. J. Mach. Learn. Comput. Sci.*, vol. 3, nr. 2, pp. 143–152, 2023, doi: 10.57152/malcom.v3i2.894.
- [10] A. Ferrari, A. Kubilay, D. Derome, en J. Carmeliet, “The use of permeable and reflective pavements as a potential strategy for urban heat island mitigation”, *Urban Clim.*, vol. 31, p. 100534, mrt. 2020, doi: 10.1016/j.uclim.2019.100534.
- [11] A. Octaviano, S. Sofiana, D. O. Agustino, en P. Rosyani, [12] “Pemantauan Kualitas Udara Berbasis Internet O Things”, *Media Online*, vol. 3, nr. 2, pp. 147–156, 2022, [Online]. Beschikbaar op: <https://djournals.com/klik>
- [13] T. N. Hakim en M. F. Susanto, “Sistem Monitoring Kualitas Udara Berbasis Internet of Things”, *Pros. 11th Ind. Res. Work. Natl. Semin.*, nr. 1, pp. 26–27, 2020.
- [14] A. Silvia, R. . Halimatussa'diyah2, R. Rizky Aldi, en N. Latifah, “Perancangan Wireless Sensor Network Menggunakan Teknologi Multisensor Sebagai Sistem Monitoring Kualitas Udara”, *J. Qua Tek.*, vol. 10, nr. 2, pp. 1–13, 2020, doi: 10.35457/quateknika.v10i2.1189.
- [15] A. M. Rumagit *e.a.*, “Perancangan Sistem Monitoring Kualitas Udara Dalam Ruangan Berbasis Internet of Things”, pp. 1–8, 2018.
- [16] R. Muttaqin, W. S. W. Prayitno, N. E. Setyaningsih, en U. Nurbaiti, “Rancang Bangun Sistem Pemantauan Kualitas Udara Berbasis Iot (Internet Of Things) dengan Sensor DHT11 dan Sensor MQ135”, *J. Pengelolaan Lab. Pendidik.*, vol. 6, nr. 2, pp. 102–115, 2024, doi: 10.14710/jplp.6.2.102-115.
- [17] S. Sadi, S. Mulyati, en P. B. Setiawan, “Internet of Things Pada Sistem Monitoring Kualitas Udara Menggunakan Web Server”, *Formosa J. Multidiscip. Res.*, vol. 1, nr. 4, pp. 1085–1094, 2022, doi: 10.55927/fjmr.v1i4.679.
- D. Margaritis, C. Keramidas, I. Papachristos, en D. Lambropoulou, “Calibration of Low-cost Gas Sensors for Air Quality Monitoring”, *Aerosol Air Qual. Res.*, vol. 21, nr. 11, p. 210073, 2021, doi: 10.4209/aaqr.210073.