

Rancang Bangun Sistem Pemantauan Portabel dan Real Time Berbasis Internet of Things (IoT) untuk Kebocoran Gas CO₂

Design and Construction of a Portable and Real-Time Monitoring System Based on the Internet of Things (IoT) for CO₂ Gas Leaks

Novia Masni Dwi Putri¹, Abdul Muid^{2*}, Nina Siti Aminah¹, Irfan Dwi Aditya¹

¹Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha No. 10, Bandung, 40132, Indonesia

²Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Tanjungpura, Jl. Prof. Dr. Hadari Nawawi, Pontianak, 78124, Indonesia

Email: 10220015@students.itb.ac.id; *muid@physics.untan.ac.id; nina.sitiaminah@yahoo.com; irfan@itb.ac.id

Received: 23th January 2026; Revised: 18th February 2026; Accepted: 24th February 2026

Abstrak – Gas karbondioksida (CO₂) merupakan komponen penyusun terbanyak kedua dalam proses gas rumah kaca setelah uap air. Konsentrasi CO₂ lapisan atmosfer menunjukkan tren kenaikan dalam kurun waktu lebih dari 10 tahun terakhir, berbanding lurus dengan kenaikan suhu global rata-rata bumi. Teknologi Carbon Capture and Storage (CCS) adalah pendekatan teknologi untuk mengurangi emisi CO₂ ke atmosfer. Teknologi CCS terdiri dari proses penangkapan CO₂ yang dihasilkan oleh industri, proses pengangkutan ke lokasi penyimpanan dan proses penyimpanan. Pemantauan kadar karbon dioksida merupakan hal yang sangat krusial dalam teknologi CCS pada saat ini untuk memastikan bahwa CO₂ yang telah disimpan tidak bocor ke atmosfer. Pada penelitian ini, telah dirancang sistem pemantauan bersifat portable dan real-time untuk pendeteksian kebocoran CO₂ menggunakan sensor MG-811 yang diintegrasikan dengan platform Internet of Things (IoT). Sistem ini menerapkan jaringan komunikasi jarak jauh untuk pengambilan data yang akan dianalisis dan divisualisasikan secara real-time. Berbeda dari penelitian sebelumnya, sistem yang dikembangkan tidak hanya menampilkan data tetapi juga memiliki fitur peringatan dini dan visualisasi data yang user-friendly. Sistem ini dirancang untuk dapat bekerja secara mandiri menggunakan energi matahari sehingga dapat digunakan di lokasi terpencil. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sensor bekerja dengan baik dalam mendeteksi konsentrasi gas dan parameter lingkungan lainnya. Sistem mampu memberikan peringatan tingkat kerawanan kebocoran gas CO₂ dalam tiga kategori yaitu AMAN, WASPADA dan BAHAYA. Dengan metode ini, potensi kebocoran gas CO₂ dapat diidentifikasi lebih cepat, sehingga memungkinkan tindakan mitigasi yang lebih dini.

Kata kunci: IoT; kebocoran CO₂; portable; real-time; sistem deteksi

Abstract – Carbon dioxide (CO₂) is the second most abundant contributor to the greenhouse effect after water vapor. Its atmospheric concentration has continued to rise over the past decade, correlating with the increase in global average temperature. Carbon Capture and Storage (CCS) is a technological approach designed to reduce CO₂ emissions by capturing CO₂ from industrial sources, transporting it to designated sites, and storing it securely. Continuous monitoring of CO₂ levels plays a critical role in CCS operations to ensure that stored CO₂ does not leak back into the atmosphere. This study presents a portable, real-time monitoring system for detecting CO₂ leakage using an MG-811 sensor integrated with an Internet of Things (IoT) platform. The system utilizes long-range communication networks for data transmission, enabling real-time visualization and analysis. In contrast to previous research, the proposed system not only displays concentration data but also includes an early warning feature and user-friendly visualization. It is powered by solar energy, allowing autonomous operation in remote areas. The results demonstrate that the sensor responds effectively to variations in gas concentration and environmental parameters. The system provides leakage vulnerability alerts using three categories: SAFE, ALERT, and

DANGER. This approach enables faster identification of potential CO₂ leakage, supporting earlier and more effective mitigation actions.

Keywords: IoT; CO₂ leakage; portable; real-time; detection system.

1. Pendahuluan

Peningkatan emisi gas rumah kaca, khususnya karbon dioksida (CO₂), telah menjadi salah satu masalah lingkungan global yang paling mendesak. Menurut data *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), konsentrasi CO₂ di atmosfer terus meningkat dalam beberapa dekade belakangan. Selama periode 1959-1986 konsentrasi CO₂ di atmosfer rata-rata masih di bawah 350 *parts per million* (ppm). Hal ini berarti ada kurang dari 350 partikel CO₂ dalam setiap satu juta partikel udara. Satu dekade terakhir, konsentrasi CO₂ mencapai kisaran 420 ppm pada periode April - Juni 2022 [1]. Industri yang melibatkan pembakaran bahan bakar fosil merupakan sektor yang menyumbang emisi gas buang CO₂ terbesar. Emisi CO₂ yang berlebihan memiliki dampak yang sangat luas terhadap kondisi lingkungan pada masa ini. Dampak ini tidak hanya terbatas pada lingkungan alam tetapi juga mempengaruhi ekonomi global, kesehatan manusia, dan kestabilan sosial [2]. Walaupun kesepakatan internasional telah menyepakati untuk mengurangi emisi melalui efisiensi energi dan pengembangan energi terbarukan, namun tidak dapat dipungkiri bahwa bahan bakar fosil masih menjadi yang dominan. Indonesia sebagai salah satu negara dengan sektor industri yang berkembang pesat, juga menyumbang emisi CO₂ yang signifikan. Indonesia terus berkomitmen untuk memanfaatkan bahan bakar fosil yang lebih bersih. Dewan Energi Nasional memberikan dua kemungkinan skenario energi yang diharapkan dapat membantu merealisasikan komitmen yang dibentuk, yaitu skenario *business as usual* dan Kebijakan Energi Nasional. Skenario Kebijakan Energi Nasional ini berisi pernyataan pengurangan emisi CO₂ hingga 26% melalui peningkatan bauran energi, pengurangan ketergantungan bahan bakar berbasis karbon, dan penyebaran sumber energi terbarukan dari tahun 2020 hingga 2050 [3]. Akan tetapi, hal tersebut tidak mencukupi untuk mengurangi emisi CO₂ lebih lanjut. Berbagai pendekatan teknologi telah dikembangkan, salah satunya adalah teknologi *Carbon Capture and Storage* (CCS) atau *Carbon Capture, Utilization, and Storage* (CCUS). Teknologi CCS/CCUS adalah teknologi untuk menangkap gas CO₂ yang dihasilkan dari suatu proses dalam skala besar, kemudian diangkut menuju lokasi penyimpanan yang dapat terletak dalam lingkungan, dalam laut, di mineral karbonat atau digunakan pada proses industrial. Teknologi CCS/CCUS melibatkan penangkapan CO₂ dari sumber emisi, seperti pabrik dan pembangkit listrik, dan kemudian menggunakan atau menyimpannya agar tidak masuk ke atmosfer [4]. Teknologi ini menjadi salah satu solusi paling menjanjikan untuk mengurangi emisi dari industri berat dan pembangkit listrik. Sebuah studi yang diterbitkan dalam *Journal of Cleaner Production* menunjukkan bahwa penerapan CCS/CCUS di pembangkit listrik tenaga batu bara dapat mengurangi emisi CO₂ hingga 90% [5]. Semenjak 2017, beberapa penelitian mengenai teknologi ini sudah dilakukan. Terdapat 3 langkah utama dalam CCS/CCUS yaitu penangkapan dan kompresi CO₂ di lokasi emisi, pengangkutan CO₂ ke lokasi penyimpanan, dan penyimpanan CO₂ secara permanen dalam formasi geologi di bawah permukaan atau penggunaan CO₂ untuk meningkatkan laju produksi EOR (*Enhanced Oil Recovery*) [6]. CCS/CCUS dapat mengubah sumur ini menjadi sumber pendapatan dengan menangkap gas yang masih tersisa dan menggunakannya untuk tujuan lain. Metode ini sangat cocok untuk diterapkan pada skala industri yang menghasilkan pembuangan limbah CO₂ dalam jumlah besar [7]. Di dalam metode ini, CO₂ tidak dibuang secara langsung ke lapisan atmosfer, akan tetapi disalurkan melalui pipa untuk diinjeksikan ke dalam lapisan bumi. Tujuannya agar CO₂ terperangkap di dalam rongga-rongga pori batuan dalam waktu yang cukup lama, ratusan bahkan ribuan tahun [8].

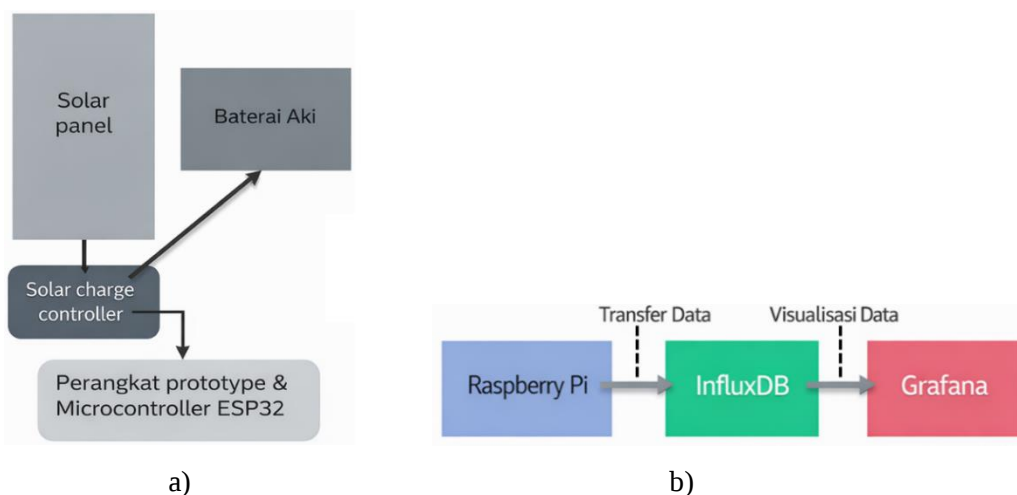
Salah satu masalah yang dapat menghambat penerapan CCS/CCUS dalam skala besar adalah belum ditemukannya solusi untuk mengatasi bahaya yang dapat terjadi, terutama kemungkinan terjadinya kebocoran CO₂. Aspek lingkungan yang perlu diperhatikan adalah masalah kesehatan dan dampak pada ekologi yang dapat terjadi apabila terdapat kebocoran CO₂ [9]. Apabila CCS/CCUS diaplikasikan pada skala besar, maka sosialisasi terkait bahaya yang akan ditimbulkan harus diberitahukan kepada publik. Dengan belum ditemukannya solusi yang memuaskan, dukungan yang diberikan publik akan menjadi sangat kecil dan merugikan pihak industri. Dalam rangka menjamin keamanan teknologi ini, risiko terjadinya kebocoran gas CO₂ ke atmosfer harus se-minimal mungkin dan diupayakan berada pada nilai 0%. Diperlukan penelitian dan pengembangan lebih lanjut dalam penggunaan teknologi CCS skala besar.

Beberapa penelitian juga telah mengembangkan visualisasi data melalui dashboard berbasis web untuk memantau tren konsentrasi CO₂ dalam jangka waktu tertentu. Namun, sebagian besar penelitian tersebut masih memiliki beberapa keterbatasan. Pertama, mayoritas sistem yang dibuat bersifat fixed installation sehingga tidak dapat digunakan secara fleksibel di berbagai lokasi yang membutuhkan pemantauan cepat, seperti gudang, laboratorium, cold storage, atau area produksi makanan dan minuman. Kedua, banyak penelitian sebelumnya hanya menampilkan data CO₂ tanpa melakukan kategorisasi tingkat bahaya, sehingga pengguna tidak mendapat informasi langsung mengenai kondisi aman, waspada, atau berbahaya. Oleh karena itu, pada penelitian ini dikembangkan prototipe berupa *Carbon Leak Detection and Monitoring Unit* (CLDMU) yang akan berfungsi sebagai pendeteksi tingkat kebocoran gas-gas berbahaya di lingkungan dan lingkungan sekitar. Penelitian ini menggunakan ESP32, Raspberry Pi, sensor CO₂ MG-811, menjadi sistem monitoring kebocoran CO₂. Jaringan sensor ini terhubung ke sistem pemantauan yang secara terus-menerus memantau kondisi di sekitar lokasi penyimpanan. Sistem ini memungkinkan pemantauan secara *real-time* dan jarak jauh terhadap kebocoran CO₂ di lokasi penyimpanan. Sistem ini diharapkan dapat memberikan kontribusi nyata dalam manajemen lingkungan, terutama dalam upaya penurunan emisi gas rumah kaca yang lebih efektif.

2. Material Dan Metode

2.1 Perancangan sistem deteksi kebocoran CO₂ menggunakan internet of things (IoT)

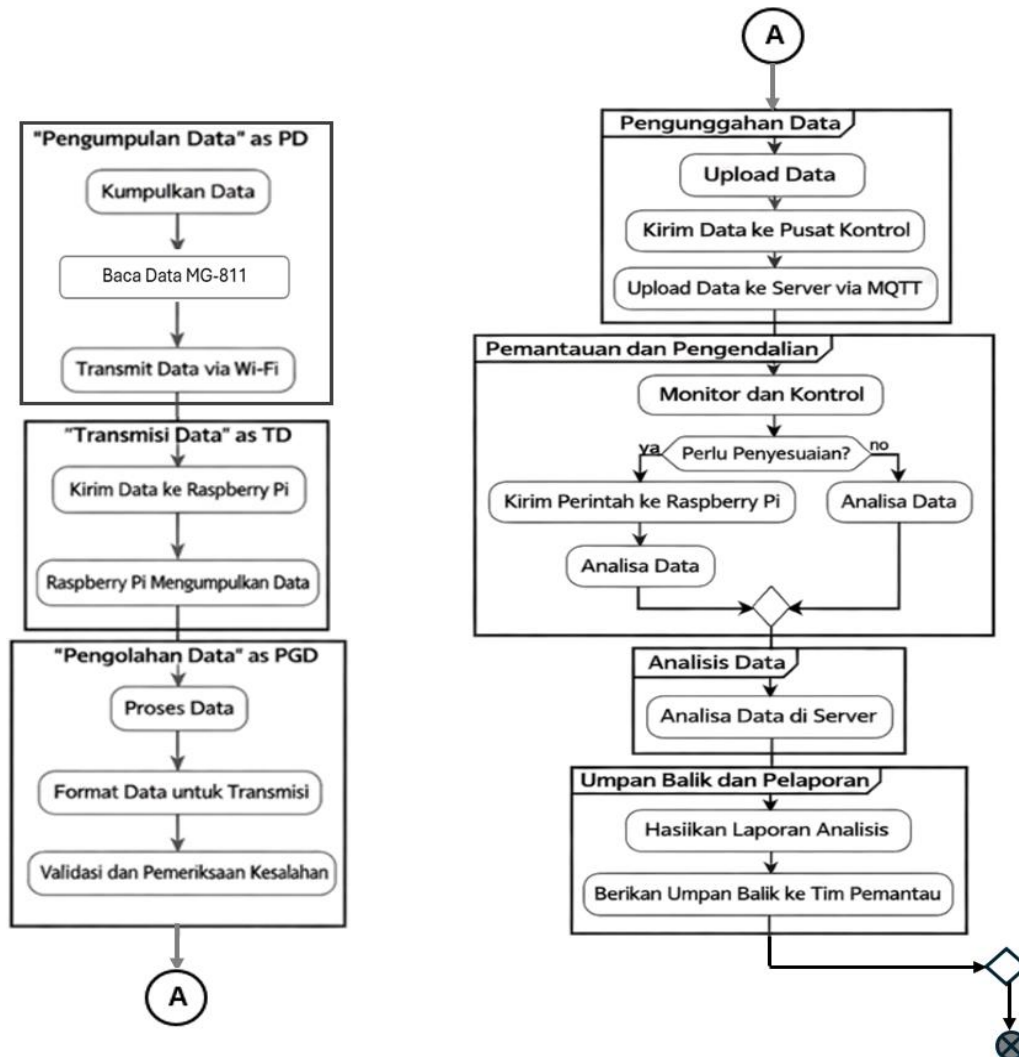
Pada bagian perancangan sistem deteksi, parameter yang diambil datanya berasal dari sensor gas CO₂ MG-811. Sensor yang digunakan dihubungkan ke mini komputer Raspberry Pi yang terintegrasi dengan mikrokontroler ESP32. Wi-Fi digunakan sebagai transmisi data secara wireless yang memungkinkan pengiriman data dari sensor yang terletak di area yang luas tanpa koneksi kabel fisik. Sensor yang terpasang akan mengukur parameter lingkungan secara terus-menerus. Data sensor hasil pengukuran dikirim ke suatu pusat kontrol yang menjadi pusat pengumpulan data yang kemudian disimpan pada *server*. Pada penelitian ini *solar panel* digunakan untuk mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik kemudian terhubung pada *solar charge controller* (SCC) yang akan mengatur aliran listrik dari solar panel ke baterai. Kemudian distribusi daya juga diatur oleh SCC yang diteruskan ke ESP32. Baterai digunakan untuk menyimpan energi listrik yang dihasilkan oleh solar panel dan digunakan dalam kondisi tidak ada sinar matahari (malam hari). Gambar 1 menunjukkan diagram blok *Carbon Leak Detection and Monitoring Unit* (CLDMU). Skema hubungan antar bagian pada unit *node* sensor ditunjukkan pada Gambar 1 (a). Skema alur data sensor ditunjukkan pada Gambar 1 (b).



Gambar 1. Skema sistem deteksi kebocoran CO₂ menggunakan IoT, (a) diagram blok unit *node* sensor, dan (b) diagram blok *unit server*.

Gambar 2 menunjukkan diagram alir pemrosesan data sensor pada penelitian ini. Gambar 2 adalah alur proses pengolahan data pada unit *node* sensor dan pada unit *server*. Pemrosesan data dimulai dari mengumpulkan data melalui pembacaan sensor. Data dari sensor dikirim ke ESP32 dan data bisa diproses atau disimpan sementara sebelum dikirimkan lebih lanjut. Selanjutnya ESP32 mengirimkan data yang telah

dikumpulkan dan diproses ke Raspberry Pi melalui jaringan Wi-Fi. Raspberry Pi berfungsi sebagai server atau pusat pengolahan data. Pada sistem ini Raspberry Pi akan mengumpulkan data dari ESP32 dan memprosesnya. Pemrosesan data mencakup penyimpanan, analisis, dan visualisasi data untuk monitoring. Data yang telah dikumpulkan dan diproses oleh Raspberry Pi dikirim ke InfluxDB. InfluxDB adalah database time series yang optimal untuk menyimpan data yang berubah-ubah seiring waktu. Selanjutnya InfluxDB menyimpan data ini dalam format yang memudahkan pengambilan dan analisis data *time series*.



Gambar 2. Algoritma pemrosesan analisis data pada sistem deteksi kebocoran CO₂ menggunakan IoT.

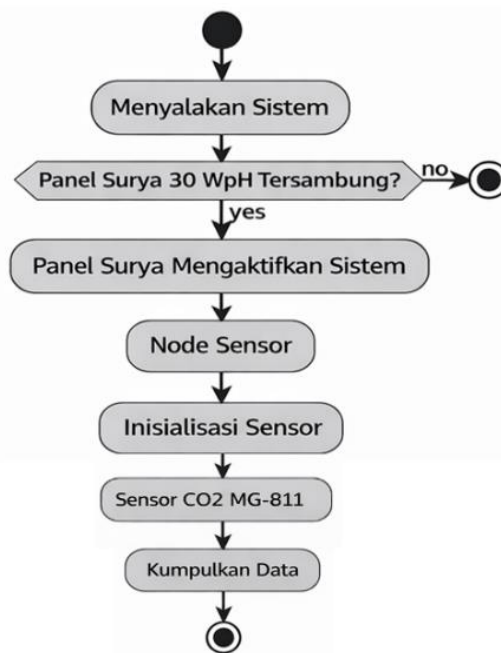
2.2. Perancangan pada node sensor sistem deteksi kebocoran CO₂

Pada penelitian ini, ketika solar panel tersambung dan sistem sudah dinyalakan maka akan dilakukan inisialisasi dari sensor. Sistem kemudian akan mengumpulkan data-data yang diukur pada lokasi pengukuran. Sistem SCC menyediakan daya yang diperlukan untuk mengaktifkan sistem. Setelah proses penetapan nilai awal dari variabel sensor pada inisialisasi sensor, selanjutnya dimulai pembacaan parameter lingkungan oleh sensor yang sesuai. Data sensor-sensor dikumpulkan untuk diproses oleh unit gateway dan server. Diagram alir proses pengumpulan data pada sensor ditunjukkan pada Gambar 3.

2.3. Perancangan sistem komunikasi Wi-Fi

Pada penelitian ini, sistem komunikasi dirancang seperti pada Gambar 4 yang menunjukkan bahwa user akan menerima informasi monitoring lingkungan melalui internet. Alur kerja dimulai dari sensor-sensor yang digunakan pada *prototipe* CLDMU akan mengukur nilai-nilai pengukuran parameter lingkungan, kemudian dikirim melalui WiFi dari ESP32. Sistem WiFi ini terintegrasi dengan WiFi dari Raspberry Pi 4

dengan jaringan yang sama, kemudian diakses oleh user melalui perangkat yang terhubung ke internet. Untuk menyediakan konektivitas nirkabel antara IoT menggunakan Wi-Fi, setiap sensor bertanggung jawab untuk mengukur parameter yang sesuai, seperti kebocoran CO₂, suhu udara, kelembaban udara, dan kelembaban lingkungan. ESP32 bertindak sebagai perangkat IoT yang menghubungkan sensor-sensor ini ke jaringan Wi-Fi. Pada penelitian ini, diimplementasikan protokol MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*) untuk membawa data menggunakan model publish/subscribe. Ini memungkinkan perangkat untuk berkomunikasi dengan jaringan dan mengirimkan data ke server yang lebih jauh, yaitu Raspberry Pi. ESP32 menggunakan protokol MQTT untuk mengirim data yang dikumpulkan oleh sensor ke server MQTT (yang dijalankan di Raspberry Pi). Hal ini menerapkan prinsip komunikasi IoT, yaitu pengiriman data secara terstruktur ke *server*. Raspberry Pi berperan sebagai server pusat dalam proyek yang menjalankan dua komponen utama, yaitu MQTT Broker (untuk menerima data dari ESP32) dan InfluxDB untuk basis data waktu seri (*time-series database*) untuk menyimpan data sensor). Proses ini merupakan pengimplementasian prinsip pengolahan dan penyimpanan data dalam konteks IoT. Grafana digunakan untuk memvisualisasikan data yang disimpan dalam InfluxDB. Grafana sangat berguna dalam menciptakan *dashboard* interaktif yang memungkinkan dapat memantau dan menganalisis data dari sensor secara *real-time*.



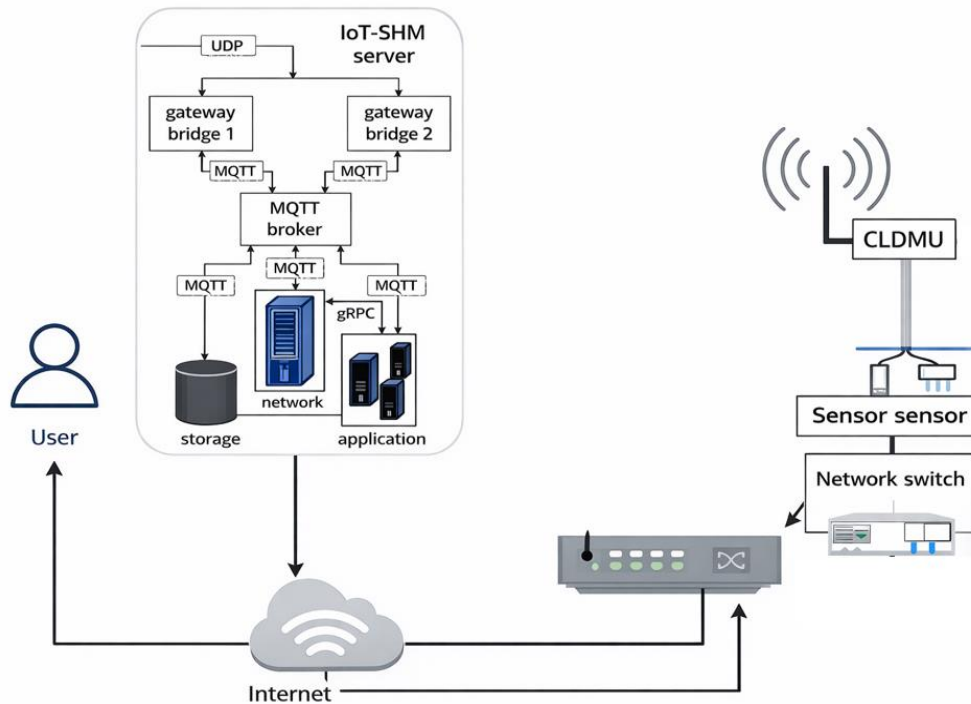
Gambar 3. Diagram alir proses pengumpulan data.

Untuk menampilkan data di Grafana, query dijalankan pada InfluxDB untuk mengambil data yang spesifik, seperti rentang waktu, jenis sensor, atau metrik tertentu. Grafana terintegrasi dengan InfluxDB sebagai sumber data. Grafana mengambil data dari InfluxDB berdasarkan query yang dikonfigurasi. Grafana menyediakan berbagai pilihan untuk visualisasi data, termasuk grafik, tabel, dan dashboard. Pengguna dapat menyesuaikan visualisasi ini berdasarkan kebutuhan mereka. Setelah data ditampilkan di Grafana, pengguna dapat memonitor kondisi lingkungan secara *real-time* dan melakukan analisis berdasarkan data yang divisualisasikan.

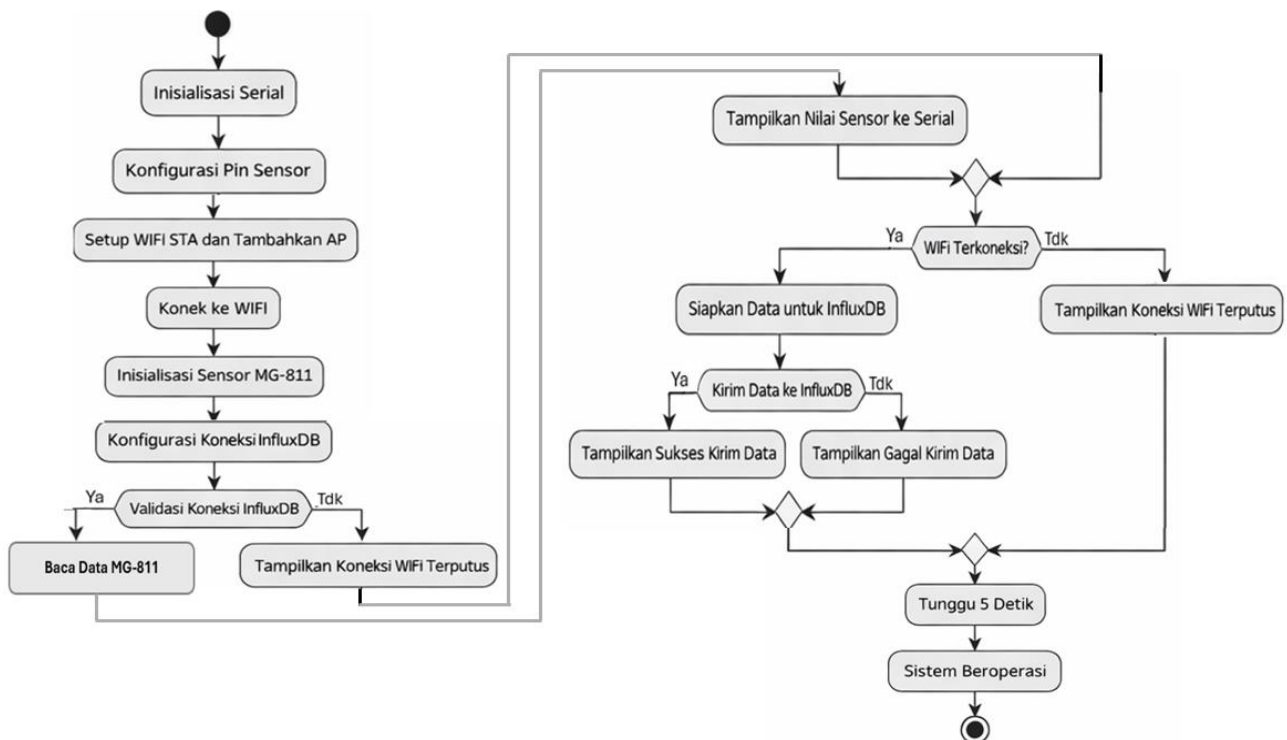
2.4. Perancangan pengolahan data pada server

Gambar 5 menggambarkan proses pengumpulan dan pemrosesan data sensor pada sistem untuk mengukur parameter konsentrasi gas CO₂ lingkungan. Kerja sistem dimulai dengan menginisialisasi sensor untuk variabel gas CO₂. Kemudian dilakukan konfigurasi pin untuk sensor. Sistem mengatur Wi-Fi sebagai STA (*Station Mode*) dan menambahkan *Access Point* jika diperlukan. Koneksi ke Wi-Fi diverifikasi terlebih dahulu. Konfigurasi untuk koneksi ke InfluxDB dilakukan. Sistem memeriksa apakah koneksi ke InfluxDB berhasil. Jika koneksi gagal, sistem menampilkan pesan "Koneksi Wi-Fi Terputus." Data dari sensor CO₂ dibaca, kemudian dikalkulasi dan dikonversi ke nilai parameter yang sesuai. Data yang dikumpulkan ditampilkan melalui serial output untuk memantau status sensor. Jika koneksi Wi-Fi tersedia, data

dipersiapkan untuk dikirim ke InfluxDB. Jika pengiriman sukses, sistem menampilkan pesan berhasil; jika gagal, sistem menampilkan pesan kegagalan pengiriman. Setelah semua langkah di atas, sistem menunggu selama 5 detik sebelum kembali ke loop untuk memproses data baru secara berkelanjutan.



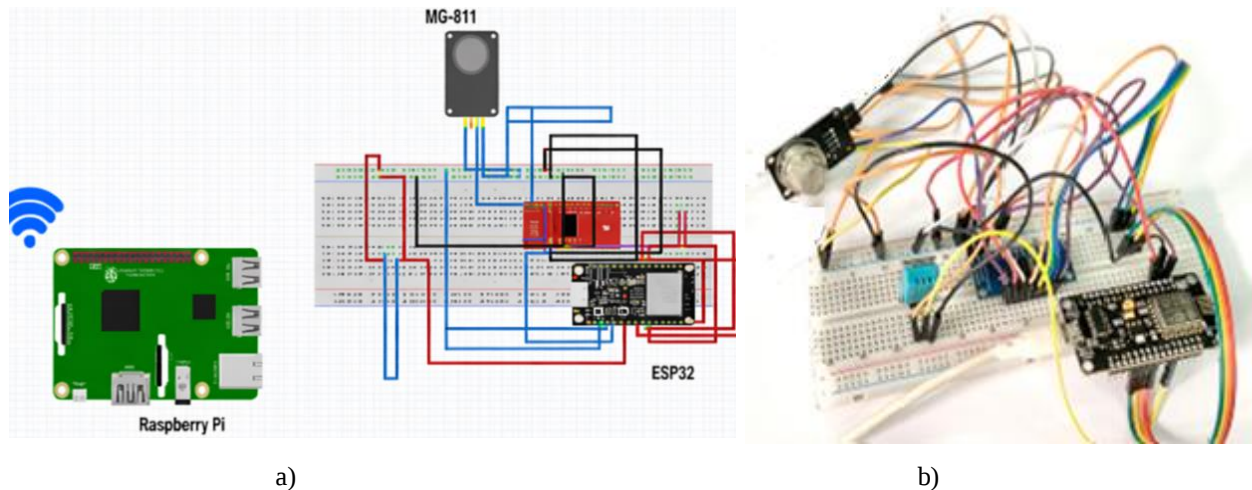
Gambar 4. Diagram blok sistem komunikasi menggunakan Wi-Fi.



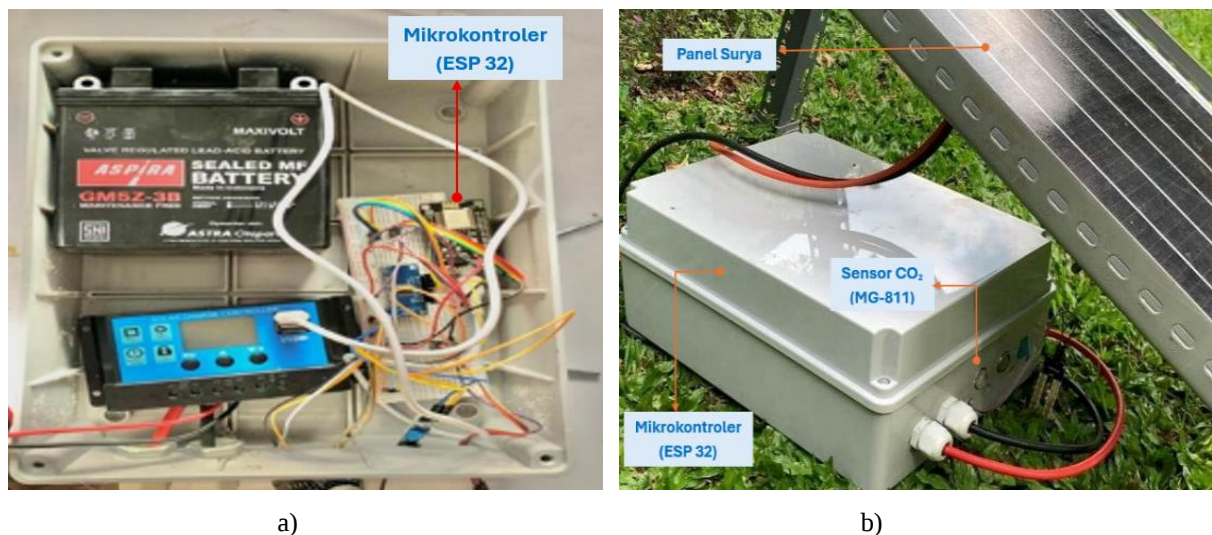
Gambar 5. Alur koneksi gateway dari sensor masuk ke cloud.

3. Hasil Dan Pembahasan

Pada penelitian ini, perancangan sistem deteksi kebocoran CO₂ menggunakan sensor-sensor yang direalisasikan menjadi rangkaian seperti pada Gambar 6. Pembuatan skematik rangkaian elektronika dikerjakan menggunakan aplikasi *fritzing* seperti ditunjukkan pada Gambar 6 (a). Setelah diimplementasikan pada papan rangkaian (*bread board*) diperoleh rangkaian node sensor seperti pada Gambar 6 (b). Rangkaian node sensor diintegrasikan dengan modul *solar charger controller* (SCC) dan baterai aki kemudian dimasukkan pada kotak (*casing*) seperti ditunjukkan Gambar 7.

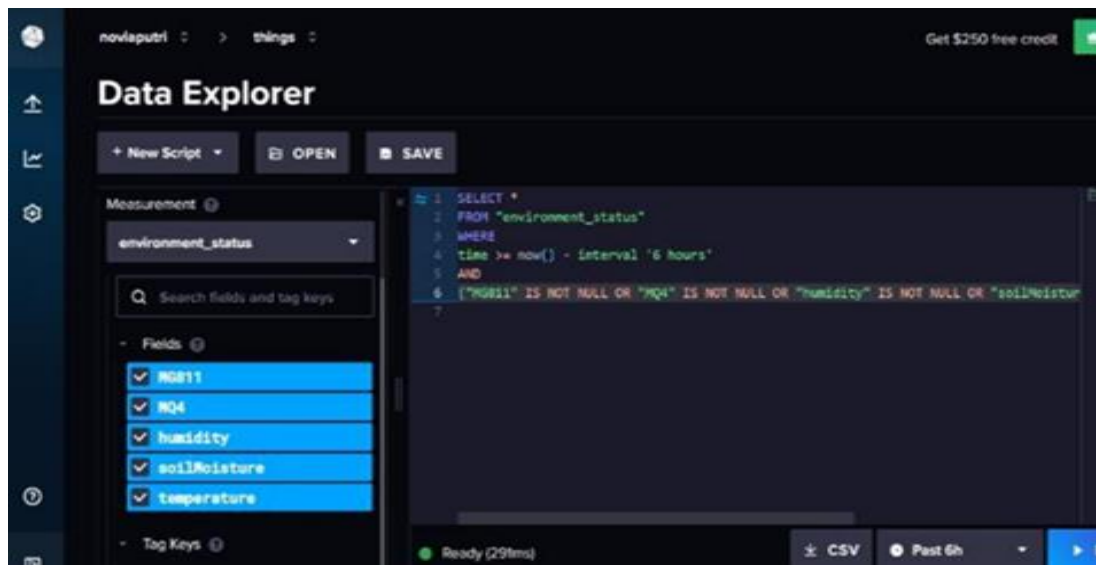


Gambar 6. Rangkaian sistem deteksi kebocoran CO₂. (a) Rangkaian pada aplikasi *Fritzing* dari CLDMU, dan (b) realisasi rangkaian.



Gambar 7. Realisasi bagian *node* sensor, (a) tampak bagian dalam, dan (b) tampak dari luar.

Pada penelitian ini proses *query* data mengambil informasi dari sensor-sensor dari data explorer di InfluxDB. Gambar 8 merupakan tampilan InfluxDB yang kemudian datanya akan dikirim ke Grafana, setelah mencentang konfirmasi data-data yang akan dikirim di buket yang sudah ditentukan.



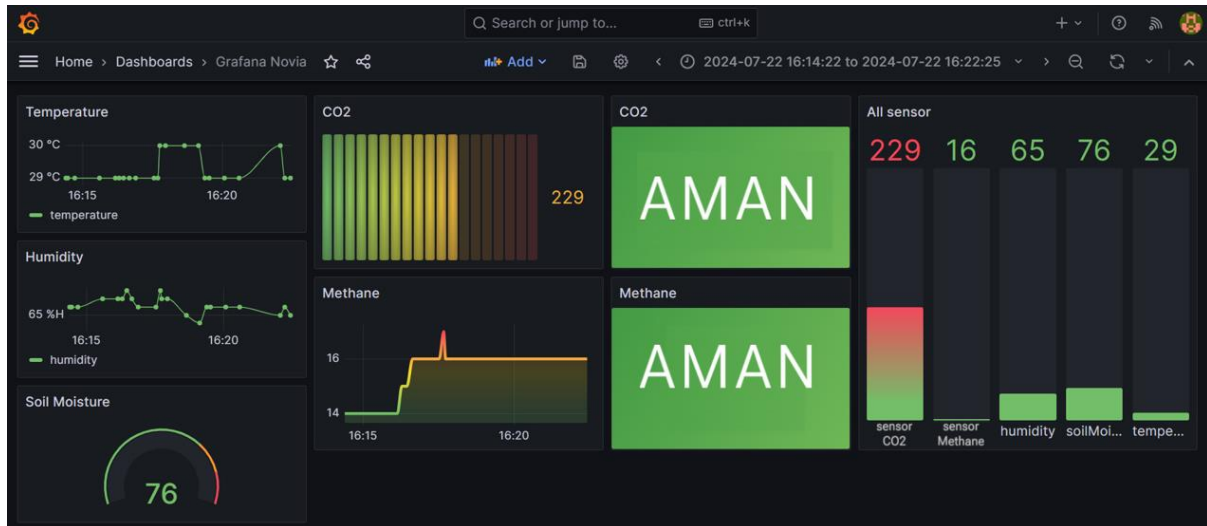
Gambar 8. Pengaturan pengiriman data dari InfluxDB ke Grafana.

Gambar 9 menunjukkan tampilan hasil pengujian dari sistem monitoring kebocoran CO₂ pada *dashboard* aplikasi Grafana. Berdasarkan grafik visualisasi konsentrasi CO₂ pada dashboard Grafana, terlihat bahwa data yang ditampilkan menunjukkan pola pembacaan yang relatif stabil dengan kisaran nilai berada di antara 200 hingga 210 ppm. Nilai rata-rata yang terbaca berkisar pada 205 ppm, yang menunjukkan bahwa lingkungan yang dipantau berada dalam kondisi udara yang sangat baik, mengingat konsentrasi CO₂ normal di udara bebas umumnya berada pada rentang 400 ppm. Pola grafik yang tampak mendatar dengan fluktuasi kecil dan rapat mengindikasikan bahwa sensor MG-811 berada dalam kondisi kerja yang stabil tanpa adanya gangguan signifikan atau perubahan drastis pada sumber CO₂ di lingkungan tersebut. Variasi kecil yang muncul 2 hingga 3 ppm lebih merefleksikan karakteristik alami sensor analog seperti MG-811, yang sensitif terhadap noise elektrik, perubahan suhu, serta faktor lingkungan lain yang dapat memengaruhi tegangan keluarannya. Tidak terlihat adanya lonjakan tajam atau pola peningkatan konsentrasi CO₂, sehingga dapat disimpulkan bahwa selama periode pemantauan, tidak terdapat aktivitas atau kondisi yang menyebabkan peningkatan kadar CO₂, seperti keberadaan banyak orang, proses pembakaran, atau ventilasi yang buruk. Keseluruhan grafik menunjukkan kondisi udara yang bersih dan stabil, sekaligus menandakan bahwa sistem pemantauan bekerja dengan baik dan mampu memberikan pembacaan yang konsisten, meskipun tetap perlu mempertimbangkan kompensasi suhu untuk mendapatkan nilai yang lebih akurat.



Gambar 9. Hasil tampilan *dashboard* di Grafana.

Gambar 10 adalah tampilan *dashboard* pada prototipe sistem deteksi kebocoran CO₂ pada saat pengujian. Sistem yang dikembangkan mampu menampilkan data sensor dan dilengkapi dengan kategorisasi tingkat kerawanan kebocoran CO₂. Kategorisasi ditampilkan dalam bentuk teks dan warna yang berbeda. Tingkat kerawanan terkategori dalam tiga level yaitu aman, waspada dan bahaya. Warna hijau untuk menunjukkan kategori aman, warna kuning untuk menunjukkan kategori waspada sedangkan warna merah menunjukkan kategori bahaya. Hasil penelitian ini memiliki kebaruan dibanding dengan penelitian sebelumnya yang hanya menggunakan indikator berupa LED dan belum menggunakan *platform* IoT.



Gambar 10. Hasil tampilan *dashboard* di Grafana pada saat pengujian sistem deteksi kebocoran CO₂ menggunakan IoT.

Kalibrasi sensor CO₂ dilakukan untuk memastikan bahwa pembacaan konsentrasi gas CO₂ yang terdeteksi oleh sensor MG-811 sesuai dengan nilai referensi yang digunakan sebagai standar. Pada penelitian ini, nilai tegangan keluaran sensor CO₂ MG-811 diperoleh seperti pada Tabel. Nilai tegangan tersebut diperoleh dari pengukuran konsentrasi gas CO₂ di lingkungan. Sedangkan sebagai pembandingan adalah nilai referensi gas CO₂ di lingkungan yang diperoleh dari *website* yang menyediakan data indeks kualitas udara (AQI⁺) secara *real-time* yaitu <https://www.iqair.com>. Hasil kalibrasi diperoleh hubungan matematis antara tegangan keluaran dan konsentrasi CO₂. Berdasarkan hasil perbandingan ini, ditentukan faktor koreksi atau persamaan kalibrasi yang digunakan dalam sistem untuk mengonversi tegangan menjadi satuan ppm secara lebih akurat. Pada penelitian ini faktor koreksi terdapat pada *code program* bagian MG811 = `map(analogMG811Value, nilai_min_sensor, nilai_max_sensor, 200, 1000)`.

Tabel 1. Data kalibrasi sensor CO₂.

No	Tegangan Output (V)	Konsentrasi Referensi (ppm)
1	1,20	400
2	1,35	600
3	1,50	800
4	1,65	1000
5	1,80	1200

Hasil pengujian alat menunjukkan bahwa data pengukuran di lapangan terdapat perbedaan sedikit dengan nilai referensi pada sensor gas CO₂. Tabel 2 menyajikan perbandingan hasil pengukuran dan nilai referensi untuk sensor yang telah diuji sebanyak 5 kali pengambilan data. Hasil pengujian sensor MG-811 diperoleh rata-rata galat dari lima pengujian menghasilkan 7,317%, sehingga akurasi alat adalah 92,68% dengan nilai RMSE = 22,03 ppm.

Tabel 2. Hasil pengujian sensor CO₂ MG-811.

No	Nilai Referensi (ppm)	Nilai Sensor (ppm)	Galat (%)
1	300	280	6,67
2	320	298	6,88
3	310	288	7,10
4	305	283	7,21
5	315	291	7,68
Rata-rata Galat	—	—	7,317%

Berdasarkan perancangan dan realisasi sistem deteksi kebocoran CO₂ menggunakan IoT, penelitian ini menyajikan kebaruan yang dapat dijadikan rekomendasi untuk pengembangan sistem deteksi kebocoran CO₂. Pengembangan yang diusulkan fokus pada pendekatan perancangan sistem komunikasi jarak jauh menggunakan *platform* IoT dari perangkat lunak aplikasi yang telah tersedia seperti MQTT, InfluxDB, dan Grafana yang cocok dengan kebutuhan di lapangan. Beberapa strategi yang dirancang secara spesifik untuk masing-masing bagian dari sistem deteksi kebocoran CO₂ dijelaskan berikut ini. Bagian node sensor terdiri dari baterai aki, SCC dan mikrokontroler seperti ditunjukkan pada Gambar 7. Sensor CO₂ dipasang di luar *casing* sehingga terjadi kontak langsung dengan udara dan lingkungan. Sensor MG-811 yang berfungsi untuk mengukur parameter konsentrasi CO₂ di udara dipasang pada posisi yang memungkinkan mengukur dengan efektif. Bagian pengiriman data pada InfluxDB seperti *Measurement* yang digunakan adalah *environment_status*, yang menyimpan data terkait parameter konsentrasi CO₂ (MG-811). Query SELECT ditampilkan untuk mengambil *field* spesifik MG-811 dari *measurement environment_status*. Query ini mencakup kondisi waktu yang ditentukan oleh *time > now() - interval '8 hours'*, yang artinya data yang diambil adalah data dari 8 jam terakhir. *Field* yang dipilih CO₂ (MG-811), menunjukkan variabel konsentrasi CO₂ yang diukur. Data ini berasal dari sensor MG-811 yang dipasang di lingkungan dan disimpan dalam basis data InfluxDB. Query ini juga memfilter catatan yang nilai-nilainya hilang (NULL) atau nol. Setelah data yang difilter diambil, data tersebut dapat dikirim ke Grafana untuk divisualisasikan. Pada penelitian ini membuktikan bahwa InfluxDB cocok digunakan sebagai basis data *time-series* yang terintegrasi dengan Grafana, sehingga memungkinkan pengguna membuat *dashboard real-time* untuk memantau parameter lingkungan.

Berdasarkan hasil pengolahan data menunjukkan ada fluktuasi selama beberapa saat. Namun dalam rentang ini, hanya terjadi kenaikan yang sedikit sehingga mengindikasikan bahwa secara keseluruhan, pengukuran konsentrasi CO₂ ini menunjukkan kondisi aktual dari lingkungan yang terkategori aman di sekitar lokasi pengujian, dan tidak terindikasi adanya kebocoran gas CO₂ yang mempengaruhi kondisi lingkungan. Pada penelitian ini selangkah lebih maju dibanding penelitian sebelumnya yang tidak ada kategorisasi tingkat kerawanan kebocoran CO₂. Dalam setting Grafana, diberikan alert berupa kategori 'AMAN', 'WASPADA', dan 'BAHAYA' untuk tingkat gas di udara sekitar lokasi uji coba. Rentang yang digunakan yaitu, untuk CO₂ kategori 'AMAN' apabila berada dalam rentang 0 - 350 ppm, kategori 'WASPADA' untuk rentang 351 - 600 ppm, dan kategori 'BAHAYA' dalam rentang 601-10000 ppm. Guntiñas dkk. menuliskan bahwa respirasi lingkungan meningkat seiring dengan peningkatan suhu lingkungan. Namun, ketika kandungan air lingkungan turun di bawah 10%, respirasi lingkungan akan ikut menurun. Mereka juga menyatakan bahwa jika kandungan kelembapan lingkungan di atas 10%, terlihat adanya hubungan positif antara respirasi lingkungan dan suhu [10]. Dalam penelitian lain, ditemukan bahwa kandungan air lingkungan mencegah difusi CO₂ dari lingkungan [11]. Emisi karbon dari lingkungan mencapai nilai minimum ketika suhu lingkungan turun di bawah 6°C dan kandungan air lingkungan melebihi 20%. Emisi mencapai maksimum ketika suhu lingkungan mencapai 40°C dan kandungan air lingkungan adalah 6% [12]. Dari landasan tersebut, dapat disimpulkan bahwa kadar air di dalam lingkungan berhubungan dengan kadar CO₂ dan kadar metana di dalam lingkungan dengan hubungan terbalik. Apabila terindikasi bahwa kadar air di dalam lingkungan meningkat, maka dapat diindikasikan bahwa kadar CO₂ di lingkungan tersebut juga rendah, sehingga menjadi lingkungan yang aman. Pada penelitian ini sensor karbon dioksida MG-811 memiliki rentang tegangan sebesar 6.0 V ± 0.1. Rentang tegangan yang sempit dan tinggi membuat sensor ini sensitif terhadap fluktuasi kecil dalam pasokan listrik. Ini bisa menjelaskan mengapa ada kesalahan negatif, di mana sensor mencatat nilai lebih rendah daripada

yang seharusnya. Berdasarkan perbandingan data antara data referensi dan data aktual yang diperoleh pada pengukuran di lokasi sampel maka rentang kadar CO₂ udara normal di lokasi sampel, yaitu sekitar 200-350 ppm menandakan bahwa kadar CO₂ terukur masih terindikasi normal dan udara masih aman di sekitar lokasi sampel [14], [15].

4. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil merancang dan mensimulasikan sistem deteksi kebocoran CO₂ secara *real-time* menggunakan Raspberry Pi, ESP32 dan sensor MG-811 serta platform IoT. Pengujian sistem menunjukkan bahwa sensor bekerja dengan baik dalam mendeteksi konsentrasi gas CO₂ di lingkungan. Pengujian alat menunjukkan hasil dengan akurasi alat adalah 92,68% dengan nilai RMSE = 22,03 ppm. Sistem mampu menggambarkan kondisi lingkungan karena nilai yang terekam tetap berada dalam rentang normal 200 - 350 ppm dan sesuai dengan data referensi. Meskipun terdapat fluktuasi kecil, perubahan tersebut tidak signifikan dan tidak mengganggu interpretasi kualitas udara. Namun, karakteristik sensor MG-811 yang bekerja pada rentang tegangan tinggi dan sempit ($6,0\text{ V} \pm 0,1$) membuatnya sensitif terhadap variasi suplai listrik, sehingga muncul kecenderungan sensor mencatat angka sedikit lebih rendah dari nilai sebenarnya. Secara keseluruhan, alat tetap mampu memberikan indikasi kategori kondisi udara ('AMAN', 'WASPADA', 'BAHAYA') dengan baik, meskipun perlu perhatian pada stabilitas tegangan untuk meminimalkan bias pengukuran. Dengan menggunakan metode ini, potensi kebocoran gas CO₂ dapat diidentifikasi lebih cepat, sehingga memungkinkan tindakan mitigasi yang lebih dini. Implementasi teknologi ini diharapkan dapat mendukung pengelolaan lingkungan yang lebih baik dalam aplikasi CCS/CCUS. Pekerjaan selanjutnya dapat dilakukan dengan integrasi sistem peringatan menggunakan *Machine Learning* untuk mengidentifikasi pola-pola yang tidak dapat dilihat hanya dengan pengamatan manusia sehingga meningkatkan keandalan sistem pemantauan kebocoran gas CO₂ di masa depan.

Pustaka

- [1] Deng Q, Ling X, Zhang K, Tan L, Qi G and Zhang J 2022 CCS and CCUS technologies: Giving the oil and gas industry a green future *Frontiers in Energy Research* 10 919330
- [2] Liu H, Were P, Li Q, Gou Y and Hou M Z 2017 Worldwide status of CCUS technologies and their development and challenges in China *Geofluids* 2017 6126505
- [3] Kapetaki Z and Miranda-Barbosa E 2019 Technology development CCUS Luxembourg: *Publications Office of the European Union*
- [4] Alshehri F and Muhammad G 2021 A comprehensive survey of the Internet of Things (IoT) and AI-based smart healthcare *IEEE Access* 9 3660–3678
- [5] Triantafyllou A, Tsouros D C, Sarigiannidis P and Bibi S 2019 An architecture model for smart farming *Proc. 15th Int. Conf. on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS)* pp 385–392
- [6] Mohammad Z N, Farha F, Abuassba A O M, Yang S and Zhou F 2021 Access control and authorization in smart homes: A survey *Tsinghua Science and Technology* 26 906–917
- [7] Prior S A, Runion G B, Marble S C, Rogers H H, Gilliam C H and Torbert H A 2011 A review of elevated atmospheric CO₂ effects on plant growth and water relations: Implications for horticulture *HortScience* 46 158–162
- [8] Cai F, Feng Z and Zhu L 2018 Effects of biochar on CH₄ emission with straw application on paddy soil *Journal of Soils and Sediments* 18 599–609
- [9] Subardi M, Chandra I and Salam R 2020 Sistem pemantauan kualitas udara di kawasan Bandung metropolitan berbasis GSM 7 9302–9311
- [10] Cai Y, Zheng W, Zhang X, Li Z and Xue X 2019 Research on soil moisture prediction model based on deep learning *PLoS ONE* 14 e0214508
- [11] International Energy Agency 2023 CCUS technology innovation – CCUS in clean energy transitions Available at: <https://www.iea.org>
- [12] Geoengineering Monitor Fossil fuel industry and investments in CCS & CCUS Available at: <https://www.geoengineeringmonitor.org> (accessed 11 November 2023)
- [13] International Energy Agency Capture, utilisation and storage – Energy system Available at: <https://www.iea.org> (accessed 11 November 2023)
- [14] Frontiers CCS and CCUS technologies: Giving the oil and gas industry a green future Available at: <https://www.frontiersin.org> (accessed 20 November 2023)

- [15] *IQAir* Indeks kualitas udara (AQI) Kota Bandung dan polusi udara di Indonesia Available at: <https://www.iqair.com> (accessed 18 July 2024).