



Sistem Monitoring Real-Time Kadar Gas Metana pada Pembangkit Listrik Tenaga Biogas Berbasis IoT

Sherin Natasya Ramadhani ^{1*}, As'ad Shidqy Aziz ², Ayusta Lukita Wardani ³, Fithrotul Irda Amaliah ⁴
1,2,3,4Sarjana Terapan Teknik Listrik, Fakultas Vokasi, Universitas Negeri Surabaya, Indonesia

Article Info

Article history:

Received Juli 10, 2026

Revised Juli 29, 2026

Accepted Juli 30, 2026

Keywords:

Kata Internet of Things

Kata Kalman Filter

Kata Metana

Kata Monitoring Real-Time

Kata MQTT

Kata PLTBg

ABSTRACT

Pembangkit Listrik Tenaga Biogas (PLTBg) merupakan salah satu pemanfaatan energi baru terbarukan yang memanfaatkan gas metana (CH_4) sebagai sumber energi utama. Kadar metana yang optimal sangat mempengaruhi kualitas biogas sehingga diperlukan sistem monitoring yang mampu melakukan pemantauan secara real-time. Penelitian ini bertujuan merancang sistem monitoring kadar gas metana berbasis Internet of Things (IoT) menggunakan sensor MQ-4, MQ-135, dan MQ-136 yang diproses menggunakan metode Kalman Filter untuk meningkatkan kestabilan data. Sistem menggunakan ESP32 sebagai pengendali utama, modul SIM7600 sebagai media komunikasi MQTT, dashboard FlowFuse untuk visualisasi data, Telegram sebagai notifikasi, serta SD Card sebagai penyimpanan lokal. Pengujian dilakukan selama 31 hari dengan waktu monitoring 12 jam per hari. Hasil penelitian menunjukkan bahwa Kalman Filter memberikan kinerja terbaik pada sensor MQ-136 dengan reduksi standar deviasi sebesar 59,26%, sedangkan MQ-4 dan MQ-135 masing-masing sebesar 29,63% dan 44,44%. Pengujian komunikasi menunjukkan 67,74% hari pengujian berhasil mengirim jumlah paket sesuai target, sementara 58,06% hari mengalami packet loss 100% akibat gangguan jaringan atau perangkat tidak aktif. Secara keseluruhan, sistem mampu melakukan monitoring kadar gas metana, menampilkan data pada dashboard, mengirim notifikasi Telegram, dan menyimpan data pada SD Card. Namun, fitur rekomendasi pengoperasian genset masih memerlukan penyempurnaan karena 96,77% hasil pengujian belum memenuhi target optimasi.

This is an open access article under the [CC BY-SA](#) license.



Corresponding Author:

Sherin Natasya Ramadhani,

Program Studi Sarjana Terapan Teknik Listrik, Fakultas Vokasi, Universitas Negeri Surabaya

Kampus UNESA Ketintang, Jalan Ketintang, Gayungan, Kota Surabaya, Jawa Timur 60231.

Email: sherin.22057@mhs.unesa.ac.id

1. PENDAHULUAN

Pemanfaatan energi baru dan terbarukan merupakan salah satu upaya untuk mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil sekaligus mendukung ketahanan energi nasional. Salah satu sumber energi terbarukan yang memiliki potensi besar adalah biogas, yaitu gas hasil fermentasi anaerob limbah organik yang mengandung gas metana (CH_4) sebagai komponen utama penghasil energi. Pada Pembangkit Listrik Tenaga Biogas (PLTBg), kadar gas metana menjadi parameter penting karena berpengaruh terhadap kualitas biogas dan efisiensi proses pembangkitan listrik. Selain gas metana, kandungan karbon dioksida (CO_2) dan hidrogen sulfida (H_2S) juga perlu dipantau karena dapat menurunkan kualitas biogas serta menyebabkan korosi pada peralatan pembangkit. Oleh karena itu, diperlukan sistem pemantauan yang mampu mengukur kondisi gas secara **real-time** sehingga kualitas biogas dapat diketahui secara cepat dan akurat [1], [2].

Proses pemantauan kadar gas pada beberapa instalasi PLTBg masih dilakukan secara berkala menggunakan alat ukur portabel atau melalui pencatatan manual. Metode tersebut memiliki beberapa keterbatasan, antara lain tidak mampu menyediakan informasi secara **real-time**, memerlukan keterlibatan operator secara langsung, serta berpotensi menyebabkan kehilangan data apabila pencatatan tidak dilakukan secara berkesinambungan. Selain itu, sensor gas berbasis semikonduktor umumnya menghasilkan data yang dipengaruhi oleh *noise*, sehingga nilai pembacaan menjadi berfluktuasi dan dapat memengaruhi akurasi informasi yang digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan dalam pengoperasian pembangkit [3], [4].

Beberapa penelitian terdahulu telah mengembangkan sistem pemantauan gas berbasis **Internet of Things (IoT)** menggunakan mikrokontroler ESP32 dan protokol MQTT untuk mengirimkan data secara **real-time**. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa penerapan IoT mampu meningkatkan kemudahan pemantauan melalui dashboard maupun perangkat bergerak. Penelitian lain juga menerapkan metode Kalman Filter untuk mengurangi fluktuasi pembacaan sensor sehingga data yang dihasilkan menjadi lebih stabil [5]–[8]. Namun demikian, sebagian besar penelitian masih berfokus pada proses pemantauan kadar gas tanpa melakukan evaluasi secara menyeluruh terhadap kualitas komunikasi data, seperti *packet loss* dan latensi, serta belum mengintegrasikan penyimpanan data lokal sebagai cadangan ketika terjadi gangguan jaringan komunikasi. Selain itu, pengujian performa sistem secara berkelanjutan dalam jangka waktu yang cukup panjang juga masih terbatas.

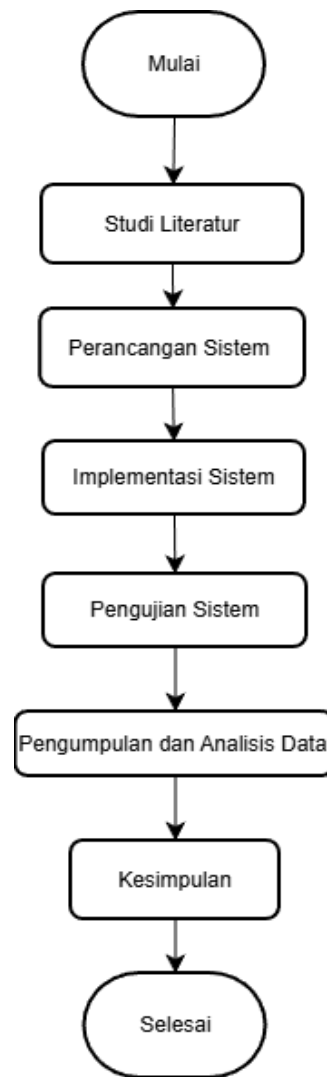
Berdasarkan kondisi tersebut, **penelitian ini bertujuan untuk merancang, mengimplementasikan, dan mengevaluasi sistem pemantauan kadar gas metana berbasis Internet of Things (IoT) pada Pembangkit Listrik Tenaga Biogas (PLTBg)** menggunakan sensor MQ-4, MQ-135, dan MQ-136 dengan ESP32 sebagai pengendali utama. Sistem dikembangkan dengan memanfaatkan modul SIM7600 sebagai media komunikasi menggunakan protokol MQTT, dashboard FlowFuse sebagai media visualisasi data, Telegram sebagai media notifikasi, serta SD Card sebagai media penyimpanan lokal. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan mengevaluasi kinerja algoritma Kalman Filter dalam meningkatkan kestabilan pembacaan sensor, menganalisis keandalan komunikasi data berdasarkan parameter *packet loss* dan latensi, serta mengevaluasi performa sistem secara keseluruhan melalui pengujian selama 31 hari.

Kebaruan penelitian ini terletak pada pengembangan sistem pemantauan kadar gas metana yang mengintegrasikan tiga sensor gas, yaitu MQ-4, MQ-135, dan MQ-136, dengan penerapan algoritma Kalman Filter untuk meningkatkan kualitas data pengukuran, komunikasi MQTT melalui jaringan seluler menggunakan modul SIM7600, penyimpanan data lokal menggunakan SD Card, serta evaluasi performa sistem berdasarkan reduksi standar deviasi, *packet loss*, dan latensi selama 31 hari pengujian. Melalui pendekatan tersebut, penelitian ini tidak hanya menghasilkan sistem pemantauan gas secara **real-time**, tetapi juga memberikan evaluasi menyeluruh terhadap kualitas data dan keandalan komunikasi sistem. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi dalam pengembangan sistem pemantauan gas berbasis IoT pada Pembangkit Listrik Tenaga Biogas serta mendukung pengoperasian pembangkit yang lebih efektif, andal, dan berkelanjutan.

METODE PENELITIAN

Tahapan Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen untuk merancang dan mengimplementasikan sistem monitoring kadar gas metana berbasis *Internet of Things* (IoT) pada Pembangkit Listrik Tenaga Biogas (PLTBg). Tahapan penelitian meliputi studi literatur, perancangan sistem, implementasi perangkat, pengujian sistem, pengumpulan data, analisis data, serta penarikan kesimpulan. Diagram alir tahapan penelitian ditunjukkan pada **Gambar 1**.

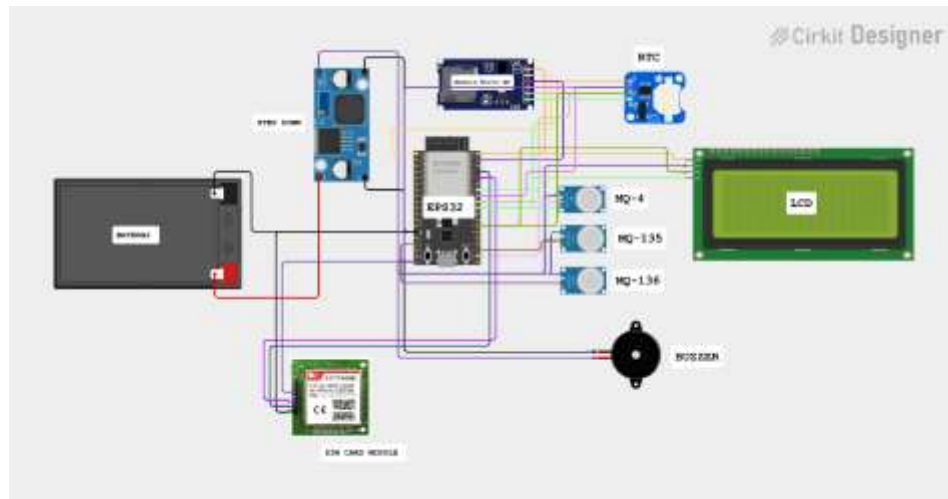


Gambar 1. Diagram alir penelitian

Tahap studi literatur dilakukan untuk memperoleh informasi mengenai karakteristik gas metana, sensor seri MQ, metode Kalman Filter, teknologi IoT, serta protokol komunikasi MQTT sebagai dasar dalam perancangan sistem. Selanjutnya dilakukan perancangan perangkat keras dan perangkat lunak sesuai kebutuhan sistem monitoring.

Desain Perangkat Keras

Perancangan perangkat keras bertujuan membangun sistem monitoring yang mampu mengukur konsentrasi gas metana (CH_4), karbon dioksida (CO_2), dan hidrogen sulfida (H_2S) secara *real-time*. Sistem terdiri atas sensor MQ-4, MQ-135, dan MQ-136 sebagai masukan, ESP32 sebagai pengendali utama, modul SIM7600 sebagai media komunikasi data, RTC DS3231 sebagai pengatur waktu, LCD 20×4 sebagai media tampilan lokal, serta SD Card sebagai media penyimpanan data. Diagram blok sistem ditunjukkan pada **Gambar 2**,



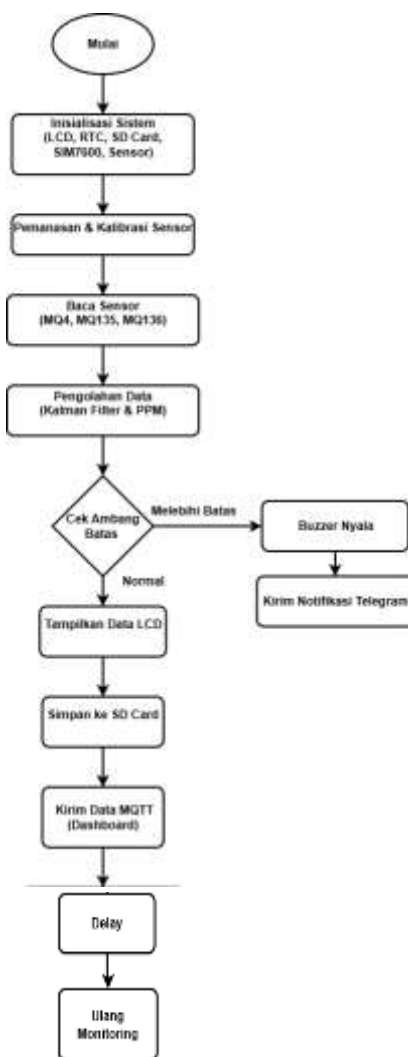
Gambar 2. Diagram blok sistem monitoring

Seluruh data hasil pembacaan sensor diproses oleh ESP32 sebelum dikirim menuju *dashboard* FlowFuse melalui protokol MQTT. Selain ditampilkan pada *dashboard*, data juga disimpan pada SD Card sebagai penyimpanan lokal dan sistem mengirimkan notifikasi Telegram apabila nilai gas metana melebihi batas yang telah ditentukan.

Desain Perangkat Lunak

Perangkat lunak dikembangkan menggunakan Arduino IDE dengan bahasa pemrograman C++. Alur kerja sistem diawali dengan proses inisialisasi seluruh perangkat yang meliputi sensor MQ, RTC, LCD, SD Card, dan modul SIM7600. Setelah proses inisialisasi berhasil, sistem melakukan pembacaan data sensor secara periodik.

Nilai resistansi sensor (R_s) terlebih dahulu dikonversi menjadi konsentrasi gas (*Parts Per Million* atau PPM) berdasarkan nilai resistansi udara bersih (R_0) hasil kalibrasi awal. Selanjutnya data diproses menggunakan metode Kalman Filter untuk mengurangi *noise* sehingga menghasilkan pembacaan yang lebih stabil. Setelah proses penyaringan selesai, sistem melakukan validasi data. Apabila data berada pada rentang pengukuran yang valid, data ditampilkan pada LCD, disimpan ke SD Card, dan dikirimkan ke *dashboard* FlowFuse melalui protokol MQTT. Sebaliknya, apabila terdeteksi nilai yang berada di luar rentang pengukuran, sistem mengaktifkan buzzer sebagai indikator kesalahan pembacaan sensor. Diagram alir perangkat lunak ditunjukkan pada **Gambar 3**.



Gambar 3. Diagram alir perangkat lunak

Metode Pengujian

Pengujian sistem dilakukan selama 31 hari dengan durasi monitoring selama 12 jam setiap hari. Sebelum proses pengujian, seluruh sensor dikalibrasi menggunakan udara bersih untuk memperoleh nilai R_0 sebagai acuan perhitungan konsentrasi gas. Nilai R_s yang diperoleh saat sensor mendeteksi gas kemudian dihitung menjadi rasio R_s/R_0 dan dikonversi menjadi nilai PPM berdasarkan karakteristik masing-masing sensor.

Selanjutnya dilakukan pengujian kinerja Kalman Filter dengan membandingkan data mentah dan data hasil penyaringan berdasarkan nilai standar deviasi dan persentase reduksi. Akurasi pembacaan sensor juga divalidasi dengan membandingkan hasil pengukuran terhadap alat deteksi gas standar. Setelah sistem dinyatakan berfungsi dengan baik, dilakukan pengujian komunikasi menggunakan parameter jumlah paket data yang dikirim, *packet loss*, dan latensi komunikasi. Seluruh data hasil pengujian dikumpulkan dan dianalisis secara deskriptif untuk mengevaluasi kestabilan pembacaan sensor, keandalan komunikasi data, serta performa sistem monitoring secara keseluruhan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Implementasi Sistem Pemantauan

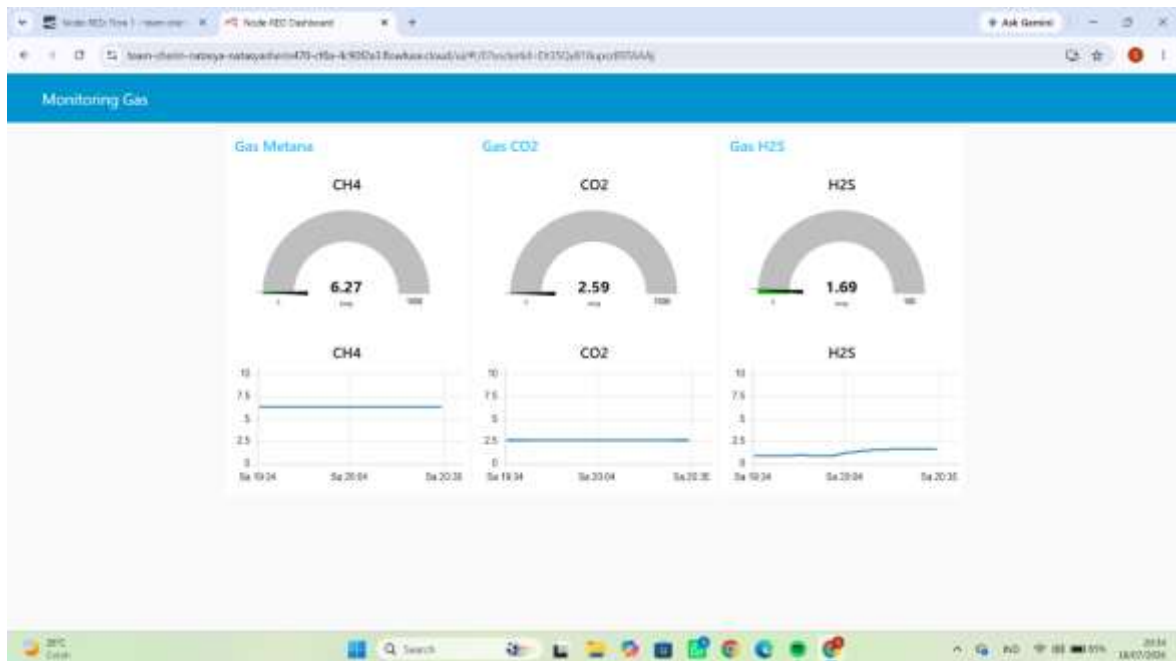
Sistem monitoring kadar gas pada Pembangkit Listrik Tenaga Biogas (PLTBg) berhasil direalisasikan sesuai dengan rancangan yang telah diusulkan. Sistem terdiri atas sensor MQ-4 sebagai pendeteksi gas metana (CH_4), sensor MQ-135 untuk mendeteksi karbon dioksida (CO_2), dan sensor MQ-136 untuk mendeteksi hidrogen sulfida (H_2S). Seluruh data hasil pembacaan sensor diproses menggunakan ESP32 sebagai pengendali

utama, kemudian dikirim melalui modul SIM7600 menggunakan protokol MQTT menuju dashboard FlowFuse. Selain itu, data ditampilkan pada LCD 20×4, disimpan pada SD Card sebagai media penyimpanan lokal, dan notifikasi dikirim melalui Telegram apabila kadar gas metana melebihi nilai ambang batas yang telah ditentukan.

Hasil implementasi perangkat keras ditunjukkan pada **Gambar 4**, sedangkan tampilan dashboard monitoring ditunjukkan pada **Gambar 5**. Berdasarkan hasil implementasi, seluruh komponen dapat bekerja secara terintegrasi sehingga proses pembacaan sensor, pengolahan data, penyimpanan data, serta pengiriman data dapat dilakukan secara *real-time*.



Gambar 4. Implementasi Perangkat Keras



Gambar 5. Dashboard monitoring FlowFuse

Pengujian Kinerja Kalman Filter

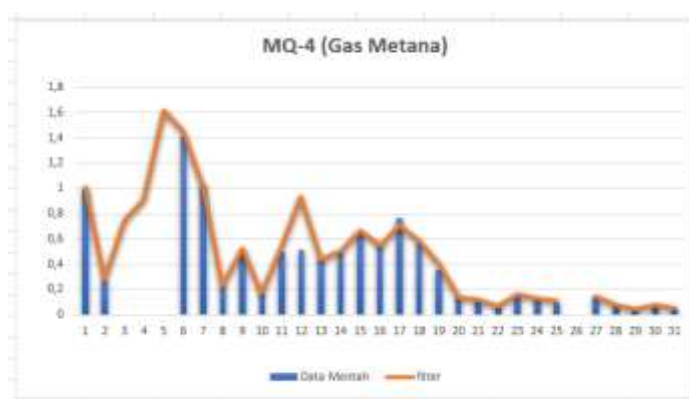
Pengujian kinerja Kalman Filter dilakukan untuk mengetahui kemampuan algoritma dalam mengurangi fluktuasi pembacaan sensor gas. Evaluasi dilakukan dengan membandingkan nilai standar deviasi sebelum dan sesudah proses penyaringan. Parameter yang digunakan meliputi jumlah hari yang mengalami reduksi standar deviasi, tidak mengalami reduksi, serta data yang tidak dapat dianalisis selama periode pengujian 31 hari.

Pengujian Sensor MQ-4

Hasil pengujian Kalman Filter pada sensor MQ-4 ditunjukkan pada Tabel II dan Gambar 6.

Tabel II. Hasil Pengujian Kalman Filter Sensor MQ-4

Kriteria Hasil Pengujian	Jumlah Hari	Persentase
Reduksi standar deviasi (positif)	7	22,58%
Tidak terjadi reduksi (negatif)	19	61,29%
Data tidak dapat dianalisis	5	16,13%
Total	31	100%



Gambar 6. Perbandingan data mentah dan Kalman Filter sensor MQ-4

Berdasarkan hasil pengujian sensor MQ-4 selama 31 hari, penerapan Kalman Filter menghasilkan reduksi standar deviasi pada 7 hari pengujian dengan persentase 22,58%. Sebanyak 19 hari atau 61,29% mengalami peningkatan standar deviasi setelah proses penyaringan, sedangkan 5 hari (16,13%) tidak dapat dianalisis akibat keterbatasan data pengujian.

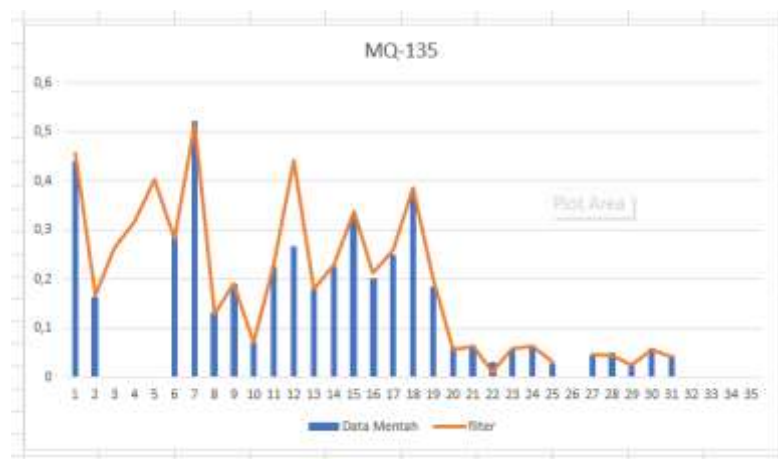
Meskipun sebagian besar hari pengujian belum menunjukkan reduksi standar deviasi, rata-rata reduksi yang diperoleh sebesar 29,63%. Hal tersebut menunjukkan bahwa Kalman Filter masih mampu memberikan pengaruh terhadap kestabilan pembacaan sensor MQ-4 dengan mengurangi beberapa variasi pembacaan yang disebabkan oleh noise sensor. Berdasarkan Gambar 6, data hasil penyaringan menunjukkan pola pembacaan yang lebih halus dibandingkan data mentah.

Pengujian Sensor MQ-135

Hasil pengujian Kalman Filter pada sensor MQ-135 ditunjukkan pada Tabel III dan Gambar 7.

Tabel III. Hasil Pengujian Kalman Filter Sensor MQ-135

Kriteria	Jumlah Hari	Persentase
Reduksi standar deviasi (positif)	10	32,26%
Tidak terjadi reduksi (negatif)	15	48,39%
Data tidak dapat dianalisis	1	3,23%
Data tidak tersedia	5	16,13%

**Gambar 7. Perbandingan data mentah dan Kalman Filter sensor MQ-135**

Hasil pengujian sensor MQ-135 menunjukkan bahwa sebanyak 10 hari (32,26%) mengalami penurunan nilai standar deviasi setelah proses penyaringan menggunakan Kalman Filter. Sebanyak 15 hari (48,39%) mengalami peningkatan standar deviasi, 1 hari (3,23%) tidak mengalami perubahan nilai reduksi, dan 5 hari (16,13%) tidak dapat dianalisis karena data tidak tersedia.

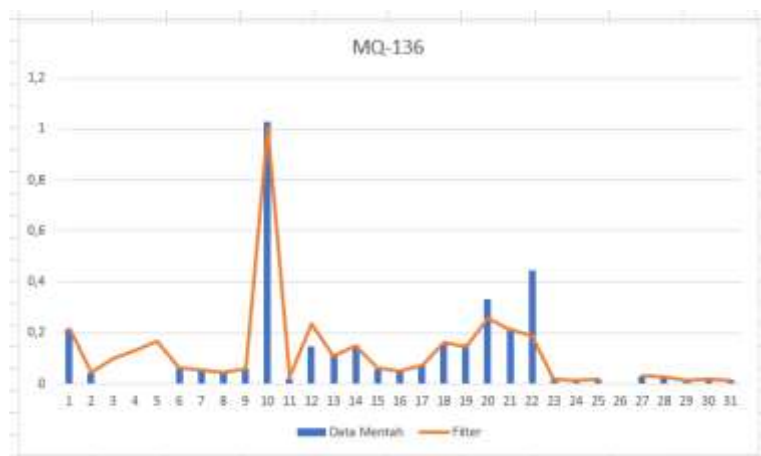
Berdasarkan hasil perhitungan, rata-rata reduksi standar deviasi sensor MQ-135 mencapai 44,44%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa Kalman Filter mampu memberikan peningkatan kestabilan pembacaan sensor dengan mengurangi sebagian gangguan noise yang muncul selama proses pengukuran.

Pengujian Sensor MQ-136

Hasil pengujian Kalman Filter sensor MQ-136 ditunjukkan pada Tabel IV dan Gambar 8.

Tabel IV. Hasil Pengujian Kalman Filter Sensor MQ-136

Kriteria	Jumlah Hari	Persentase
Reduksi standar deviasi (positif)	14	45,16%
Tidak terjadi reduksi (negatif)	12	38,71%
Data tidak tersedia	5	16,13%
Total	31	100%



Gambar 8. Perbandingan data mentah dan Kalman Filter sensor MQ-136

Berdasarkan hasil pengujian sensor MQ-136, sebanyak 14 hari (45,16%) menunjukkan adanya reduksi standar deviasi setelah proses penyaringan. Sementara itu, sebanyak 12 hari (38,71%) mengalami peningkatan standar deviasi dan 5 hari (16,13%) tidak dapat dianalisis karena data tidak tersedia.

Sensor MQ-136 memperoleh rata-rata reduksi standar deviasi sebesar 59,26%, sehingga menjadi sensor dengan peningkatan kestabilan terbaik dibandingkan sensor MQ-4 dan MQ-135. Hasil tersebut menunjukkan bahwa algoritma Kalman Filter mampu bekerja lebih optimal pada sensor MQ-136 dalam mengurangi fluktuasi pembacaan.

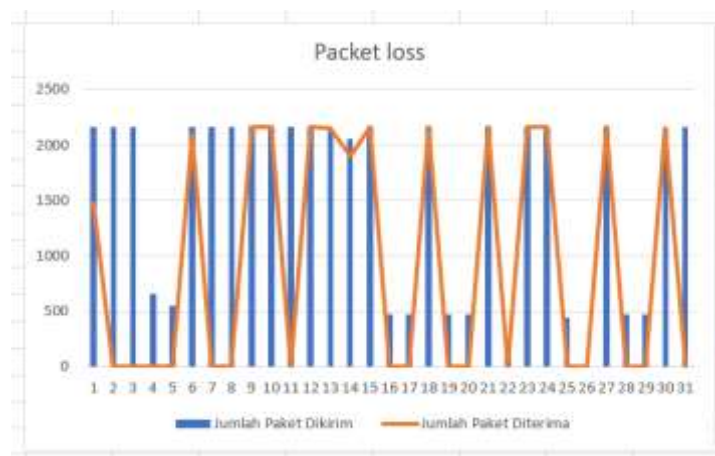
Secara keseluruhan, penerapan Kalman Filter mampu meningkatkan kestabilan pembacaan pada sensor gas yang digunakan. Perbedaan nilai reduksi pada setiap sensor dipengaruhi oleh karakteristik sensor, tingkat noise pembacaan, serta kondisi lingkungan selama proses pengujian. Berdasarkan hasil pengujian, sensor MQ-136 memberikan performa terbaik, kemudian diikuti oleh sensor MQ-135 dan MQ-4.

Pengujian Komunikasi Data

Pengujian komunikasi data dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam melakukan pengiriman data dari mikrokontroler ESP32 menuju dashboard FlowFuse menggunakan protokol MQTT melalui jaringan seluler SIM7600. Parameter pengujian meliputi jumlah paket data yang dikirim, paket data yang diterima, persentase packet loss, serta waktu latensi komunikasi.

Hasil pengujian komunikasi selama 31 hari dirangkum pada Tabel V, sedangkan grafik perubahan packet loss dan latensi ditampilkan pada Gambar 9 dan Gambar 10.

Kriteria Hasil Pengujian	Jumlah Hari	Persentase
Packet loss < 100%	12	38,71%
Packet loss = 100%	18	58,06%
Data tidak tersedia	1	3,23%
Total	31	100%



Gambar 9. Hasil Packet Loss

Berdasarkan hasil pengujian, sistem mampu melakukan komunikasi data dengan tingkat keberhasilan pengiriman yang berbeda pada setiap hari pengujian. Sebanyak 12 hari (38,71%) menunjukkan adanya paket data yang berhasil diterima oleh server, sedangkan 18 hari (58,06%) mengalami packet loss sebesar 100%.

Kegagalan pengiriman data dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti kondisi jaringan seluler yang tidak stabil, kehilangan koneksi internet pada modul SIM7600, serta kondisi perangkat yang tidak aktif selama periode pengujian. Pada kondisi jaringan yang baik, sistem mampu melakukan pengiriman data secara real-time sehingga nilai kadar gas dapat ditampilkan pada dashboard FlowFuse.

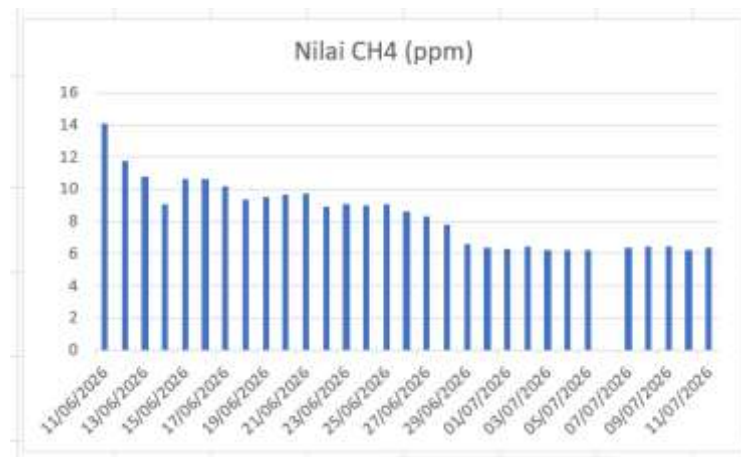
Perbedaan nilai latensi pada setiap pengujian dipengaruhi oleh kualitas jaringan seluler, proses koneksi ulang modem, serta beban komunikasi selama proses pengiriman data. Semakin baik kondisi jaringan, maka waktu pengiriman data menjadi lebih cepat dan stabil.

Pengujian Performa Keseluruhan Sistem

Pengujian performa keseluruhan dilakukan untuk mengetahui keberhasilan seluruh fungsi sistem monitoring gas metana yang telah dirancang. Pengujian meliputi proses pembacaan sensor, pengolahan data menggunakan Kalman Filter, penyimpanan data pada SD Card, komunikasi MQTT, tampilan LCD, notifikasi Telegram, indikator buzzer, serta fitur rekomendasi pengoperasian genset.

Hasil pengujian keseluruhan sistem ditunjukkan pada Tabel VI.

Parameter Pengujian	Hasil Pengujian	Status
Pembacaan sensor gas	Sensor mampu membaca nilai kadar gas	Berhasil
Kalman Filter	Data hasil penyaringan lebih stabil dibanding data mentah	Berhasil
Penyimpanan SD Card	Data tersimpan dalam format CSV	Berhasil
Dashboard FlowFuse	Data dapat ditampilkan melalui MQTT	Berhasil
Notifikasi Telegram	Pesan alarm berhasil dikirim saat kondisi terpenuhi	Berhasil
LCD Monitoring	Menampilkan nilai sensor dan status sistem	Berhasil
Buzzer Alarm	Aktif ketika nilai melewati batas ambang	Berhasil
Rekomendasi genset	Belum sesuai dengan target pengujian	Perlu pengembangan



Gambar 10. hasil Kadar Gas CH4

Berdasarkan hasil pengujian performa keseluruhan, sistem monitoring gas metana telah mampu menjalankan fungsi utama yang dirancang, yaitu membaca kadar gas, melakukan penyaringan data menggunakan Kalman Filter, menyimpan data, serta mengirimkan informasi menuju dashboard monitoring.

Namun, fitur rekomendasi pengoperasian genset belum menghasilkan keputusan sesuai target selama periode pengujian. Hal tersebut disebabkan oleh nilai kadar gas yang diperoleh selama pengujian belum memenuhi kondisi pemicu rekomendasi yang telah ditentukan. Oleh karena itu, pengembangan selanjutnya dapat dilakukan dengan melakukan penyesuaian parameter rekomendasi berdasarkan karakteristik operasional pembangkit biogas.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pengujian selama 31 hari, sistem monitoring kadar gas metana berbasis *Internet of Things* (IoT) berhasil dirancang, diimplementasikan, dan dievaluasi sesuai dengan tujuan penelitian. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sebanyak 27 hari (87,10%) data dapat dianalisis menggunakan Kalman Filter, sedangkan 4 hari (12,90%) tidak dapat dianalisis karena data tidak tersedia akibat gangguan komunikasi atau perangkat tidak aktif. Penerapan Kalman Filter memberikan kinerja terbaik pada sensor MQ-136 dengan reduksi standar deviasi pada 16 hari (59,26%), diikuti sensor MQ-135 pada 12 hari (44,44%), dan sensor MQ-4 pada 8 hari (29,63%), sehingga menunjukkan bahwa metode ini mampu meningkatkan kestabilan pembacaan data, meskipun pada sensor MQ-4 dan MQ-135 masih diperlukan penyetelan parameter filter agar hasil penyaringan lebih konsisten. Sistem komunikasi data menggunakan ESP32, modul SIM7600, dan protokol MQTT juga berhasil mengirimkan data sensor ke dashboard FlowFuse serta notifikasi Telegram, dengan jumlah paket data mencapai target harian pada 21 hari (67,74%), sedangkan 9 hari (29,03%) belum mencapai target dan 1 hari (3,23%) tidak dilakukan pengiriman karena perangkat tidak aktif. Dari sisi keandalan komunikasi diperoleh 8 hari (25,81%) dengan *packet loss* 0%, masing-masing 1 hari (3,23%) dengan *packet loss* sebesar 1%, 7%, dan 32%, serta 18 hari (58,06%) mengalami *packet loss* 100%, sedangkan 1 hari (3,23%) tidak dapat dihitung karena tidak ada proses pengiriman data. Nilai latensi menunjukkan 8 hari (25,81%) sebesar 0 ms, masing-masing 1 hari (3,23%) sebesar 1.000 ms, 9.000 ms, dan 130.000 ms, sementara 20 hari (64,52%) tidak memiliki nilai latensi karena tidak ada paket data yang diterima, sehingga dapat disimpulkan bahwa keandalan komunikasi masih dipengaruhi oleh kualitas jaringan seluler dan kondisi operasional perangkat. Secara keseluruhan, sistem telah mampu menjalankan fungsi utama berupa pembacaan kadar gas metana dengan rentang 6,19–14,04 ppm, pengolahan data menggunakan Kalman Filter, penyimpanan data pada SD Card, serta pemantauan melalui dashboard dan notifikasi Telegram yang berhasil berfungsi pada 14 hari (45,16%), sedangkan pada 17 hari (54,84%) tidak berfungsi akibat kegagalan komunikasi data. Selain itu, fitur rekomendasi pengoperasian genset telah berhasil diimplementasikan, namun selama 30 hari (96,77%) masih menghasilkan rekomendasi "Belum Sesuai Target" dan pada 1 hari (3,23%) tidak menghasilkan rekomendasi karena perangkat tidak aktif. Oleh karena itu, pengembangan selanjutnya perlu difokuskan pada peningkatan keandalan komunikasi data, penyempurnaan parameter Kalman Filter khususnya pada sensor MQ-4 dan MQ-135, serta pengembangan metode pengambilan keputusan pada fitur rekomendasi pengoperasian genset agar menghasilkan rekomendasi yang lebih akurat sesuai dengan kondisi operasional Pembangkit Listrik Tenaga Biogas (PLTBg).

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah memberikan dukungan dan bantuan dalam pelaksanaan penelitian ini. Ucapan terima kasih disampaikan kepada Program Studi D4 Teknik Listrik, Universitas Negeri Surabaya atas fasilitas dan dukungan akademik yang diberikan selama proses penelitian. Penulis juga menyampaikan apresiasi kepada dosen pembimbing, rekan penelitian, serta semua pihak yang telah membantu dalam proses perancangan, pengujian, dan penyelesaian sistem monitoring kadar gas metana berbasis Internet of Things (IoT) ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] F. Adzikri, D. Notosudjono, and D. Suhendi, "Strategi Pengembangan Energi Terbarukan," 2025.
- [2] S. A. Ali Akbar, M. Azis Sidiq, A. Yudhana, and R. R. Hidayat, "Integrasi Sensor Pintar dengan Sistem IoT untuk Memantau Kadar Gas Nitrogen pada Reaktor Biogas," *Jurnal Pekommas*, vol. 10, no. 1, pp. 127–132, 2025, doi: 10.56873/jpkm.v9i1.5918.
- [3] A. W. Agustin, S. Sudarti, and Y. Yushardi, "Potensi Pemanfaatan Biogas dari Sampah Organik sebagai Sumber Energi Terbarukan," *INSOLOGI: Jurnal Sains dan Teknologi*, vol. 2, no. 6, pp. 1109–1116, 2023, doi: 10.55123/insologi.v2i6.2841.
- [4] I. Christakis, O. Tsakiridis, D. Kandris, and I. Stavrakas, "A Kalman Filter Scheme for the Optimization of Low-Cost Gas Sensor Measurements," *Electronics*, vol. 13, no. 1, 2024, doi: 10.3390/electronics13010025.
- [5] R. Efendi, Ongki, and L. S. Lesmana, "Inovasi Deteksi Kebakaran: Perancangan Sistem Terintegrasi IoT Berbasis Arduino Uno untuk Pemberitahuan Real-Time," vol. 9, no. 1, pp. 33–43, 2024.
- [6] R. F. Nugraha, F. N. Husna, S. Sandi, A. F. Syahla, Y. A. Saputra, and R. Hidayat, "Smart Air Quality Guardian: Pengawasan Polusi Udara Berbasis ESP32 dengan Sensor Gas MQ-2 dan MQ-135," *Jurnal Komputer dan Elektro Sains*, vol. 2, no. 2, pp. 1–7, 2024, doi: 10.58291/komets.v2i2.175.
- [7] R. Gani, F. N. Aisyah, A. Saleh, and I. Novianty, "Sensor Gas MQ-136 sebagai Pendeteksi Gas Hidrogen Sulfida pada Limbah Kangkung Darat (*Ipomoea reptans Poir*)," pp. 44–50, 2025.
- [8] D. Hamdani and R. Medriati, "Gas Concentration Measuring-System (CH₄, NH₃, CO₂) Upon Cow Feces in an Encased-Space Based on Arduino Uno," vol. 7, no. 1, pp. 97–108, 2024.
- [9] I. Hudati, E. S. A. Nugroho, and N. D. Resty, "Implementasi Filter Kalman pada Sensor Jarak Berbasis Ultrasonik," *Jurnal Listrik, Instrumentasi dan Elektronika Terapan (JuLIET)*, vol. 2, no. 2, pp. 20–24, 2021, doi: 10.22146/juliet.v2i2.71147.
- [10] D. Kurniawan, S. R. Sulistiyanti, and U. Murdika, "Sistem Pemantau Gas Karbon Monoksida (CO) dan Karbon Dioksida (CO₂) Menggunakan Sensor MQ-7 dan MQ-135 Terintegrasi Telegram," *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, vol. 11, no. 2, pp. 200–206, 2023, doi: 10.23960/jitet.v11i2.2963.
- [11] G. C. Lismana, A. Muhammad, and B. S. Rintyarna, "Perancangan dan Implementasi Sensor MQ-4 Gas Metana (CH₄) pada Sistem Biogas Berbasis Mikrokontroler Arduino Uno," vol. 7, pp. 99–108, 2025.
- [12] D. S. Logayah, B. R. Mustikasari, D. Z. Hindami, and R. P. Rahmawati, "Krisis Energi Uni Eropa: Tantangan dan Peluang dalam Menghadapi Pasokan Energi yang Terbatas," vol. 3, no. 2, 2023.
- [13] L. Nugroho, R. Saptono, and A. Hariyadi, "Sistem Monitoring Kadar Gas Metana (CH₄), Gas Amonia (NH₃), dan Gas Karbon Dioksida (CO₂) pada Tempat Pembuangan Sampah untuk Pencegahan Penyakit ISPA Berbasis Wireless Sensor Network," vol. 11, no. 4, pp. 220–227, 2021.
- [14] A. D. A. Nur Utomo, A. Zafia, B. P. Zen, D. F. H. Permadi, H. Tantyoko, and Y. A. Setyoko, "Implementasi Internet of Things (IoT) pada SMK AL Hikmah 2 dalam Mendukung Revolusi Industri 4.0," *IJCOSIN: Indonesian Journal of Community Service and Innovation*, vol. 3, no. 2, pp. 49–57, 2023, doi: 10.20895/ijcosin.v3i2.1160.
- [15] S. A. Putra, I. S. Permadi, G. Adz-Dzikri, and Qirom, "Sistem Monitoring dan Data Logger Produksi Gas Metana pada Digester Berbasis Mikrokontroler ESP32," vol. 15, no. 2, pp. 144–151, 2024.
- [16] E. R. Raharja, "Rancang Bangun Pemantau Gas Metana, Suhu, dan Kelembaban sebagai Penyebab Efek Rumah Kaca di Padang Lamun Berbasis IoT," 2021.
- [17] G. Subekti and B. Herdian, "Sistem Monitoring Kadar CH₄ (Metana) dan H₂S (Hidrogen Sulfida) Berbasis IoT," vol. 4, 2023.
- [18] G. Subekti, B. Herdian, A. Febriansyah, and Z. Saputra, "Sistem Monitoring Kadar CH₄ (Metana) dan H₂S (Hidrogen Sulfida) Berbasis IoT," vol. 4, 2023.