

# IoT-Based Methane Monitoring System for Biodigesters Using LoRa Communication

## [Sistem Pemantauan Gas Methana berbasis IoT pada Biodigester menggunakan komunikasi LoRa]

Mochammad Nasrullah<sup>1)</sup>, Jamaaluddin\*<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Program Studi Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

<sup>2)</sup> Program Studi Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

\*Email Penulis Korespondensi: jamaaluddin@umsida.ac.id

**Abstract.** *Biogas production efficiency is highly dependent on maintaining optimal methane levels in the biodigester, but manual monitoring poses safety risks and lacks remote access. Although Internet of Things (IoT) systems exist, most rely on WiFi, limiting their use in remote farms with poor internet connections. This study designed a monitoring system that combines IoT with LoRa telecommunications to overcome these limitations. An MQ-4 sensor connected to an ESP32 microcontroller detects the methane concentration resulting from the anaerobic fermentation of cow manure. The system transmits data via two channels: locally via a LoRa module to an Esp32 receiver and remotely via the Blynk application and Google Spreadsheet for cloud logging. Performance evaluation focused on gas concentration accuracy in ppm and data transmission speed in bps over several days of testing. Findings indicate that the hybrid setup enables real-time monitoring with stable long-distance communication, eliminating the need for constant internet access at the biodigester site. Consequently, this approach enhances operational safety and efficiency, offering a viable solution for renewable energy management in off-grid locations*

**Keywords -** ESP32, MQ-4, IoT, LoRa, Methane monitoring, Biodigester

**Abstrak.** *Efisiensi produksi biogas sangat bergantung pada pemeliharaan tingkat metana yang optimal di dalam biodigester, namun pemantauan manual menimbulkan risiko keselamatan dan tidak memungkinkan akses jarak jauh. Meskipun sistem Internet of Things (IoT) sudah ada, sebagian besar bergantung pada WiFi, sehingga membatasi penggunaannya di peternakan terpencil dengan koneksi internet yang buruk. Penelitian ini merancang sistem pemantauan yang menggabungkan IoT dengan teknologi telekomunikasi LoRa untuk mengatasi keterbatasan tersebut. Sensor MQ-4 yang terhubung ke mikrokontroler ESP32 mendeteksi konsentrasi metana yang dihasilkan dari fermentasi anaerobik kotoran sapi. Sistem ini mentransmisikan data melalui dua saluran: secara lokal melalui modul LoRa ke penerima ESP32 dan secara jarak jauh melalui aplikasi Blynk serta Google Spreadsheet untuk pencatatan data di cloud. Evaluasi kinerja berfokus pada akurasi konsentrasi gas dalam satuan ppm dan kecepatan transmisi data dalam bps selama beberapa hari pengujian. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konfigurasi hibrida ini memungkinkan pemantauan real-time dengan komunikasi jarak jauh yang stabil, sehingga menghilangkan kebutuhan akan akses internet yang terus-menerus di lokasi biodigester. Akibatnya, pendekatan ini meningkatkan keamanan dan efisiensi operasional, serta menawarkan solusi yang layak untuk pengelolaan energi terbarukan di lokasi yang tidak terhubung ke jaringan listrik.*

**Kata Kunci -** ESP32, MQ-4, IoT, LoRa, monitoring gas methana, Biodigester

## I. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi terbarukan mendesak di tingkat global semakin meningkat seiring dengan tingginya konsumsi energi dan dampak negatif bahan bakar fosil terhadap lingkungan [1]. Biogas merupakan salah satu alternatif potensial yang dihasilkan dari fermentasi kotoran sapi dalam biodigester [2]. Biodigester adalah sistem reaktor tertutup yang mengolah limbah organik melalui fermentasi anaerobik, yaitu proses penguraian bahan organik oleh mikroorganisme tanpa oksigen [3]. Proses ini menghasilkan biogas dan residu organik yang kaya nutrisi yang dapat digunakan sebagai pupuk alami [4]. Komponen utama biogas adalah metana (CH<sub>4</sub>), yang memiliki nilai kalor tinggi berkisar antara 4.800 hingga 6.700 kcal/m<sup>3</sup> [5]. Gas metana hanya memiliki satu atom karbon dalam rantai molekulnya, sehingga pembakarannya lebih ramah lingkungan dibandingkan bahan bakar fosil [6]. Selain metana, biogas juga mengandung sejumlah kecil gas lain seperti hidrogen sulfida (H<sub>2</sub>S), hidrogen (H<sub>2</sub>), dan nitrogen (N<sub>2</sub>) [7][8].

Copyright © Universitas Muhammadiyah Sidoarjo. This preprint is protected by copyright held by Universitas Muhammadiyah Sidoarjo and is distributed under the Creative Commons Attribution License (CC BY). Users may share, distribute, or reproduce the work as long as the original author(s) and copyright holder are credited, and the preprint server is cited per academic standards.

Authors retain the right to publish their work in academic journals where copyright remains with them. Any use, distribution, or reproduction that does not comply with these terms is not permitted.

Pemantauan kadar gas sangat penting untuk memastikan efisiensi dan keamanan sistem biodigester. Kadar metana yang rendah menandakan kualitas biogas yang kurang optimal, sementara konsentrasi hidrogen sulfida yang tinggi bersifat korosif terhadap peralatan dan menimbulkan risiko bagi kesehatan manusia [9]. Secara tradisional, pemantauan dilakukan secara manual, yang memiliki kelemahan seperti ketergantungan pada operator, keterbatasan waktu, dan risiko paparan gas beracun [10]. Oleh karena itu, otomatisasi diperlukan untuk mengukur dan memantau gas secara real-time dan jarak jauh. Internet of Things (IoT) merupakan solusi modern dengan kemampuan pengumpulan data otomatis dan integrasi dengan sistem digital [11][12].

Kemajuan teknologi IoT memungkinkan terciptanya solusi modern untuk pengumpulan data otomatis. Sistem pemantauan yang ada saat ini sering kali menggunakan mikrokontroler seperti Arduino Nano untuk mengukur suhu dan tekanan dengan akurasi tinggi, namun implementasi tersebut umumnya bergantung pada layar LCD lokal yang tidak mendukung akses jarak jauh [13]. Meskipun pendekatan berbasis IoT lainnya memungkinkan transmisi data secara real-time ke platform cloud, sebagian besar masih bergantung pada konektivitas WiFi [14]. Ketergantungan ini membatasi implementasi di daerah pertanian terpencil tempat biodigester biasanya berada, karena infrastruktur internet sering kali tidak stabil atau tidak tersedia [15].

Untuk mengatasi tantangan konektivitas ini, teknologi telekomunikasi LoRa (Long Range) telah muncul sebagai alternatif yang menjanjikan. LoRa menawarkan jangkauan luas dan konsumsi daya yang rendah, sehingga cocok untuk lokasi produksi terpencil yang tidak memiliki akses internet yang stabil [16]. Karakteristik ini memungkinkan transmisi data jarak jauh bahkan di lokasi tanpa jaringan, sehingga mengatasi keterbatasan sistem berbasis WiFi. Keandalan transmisi ini semakin didukung oleh penggunaan antena omnidirectional 3 dBi yang meningkatkan penguatan sinyal dan stabilitas sambungan komunikasi, terutama di lingkungan pertanian dengan banyak hambatan fisik [17]. Berdasarkan potensi ini, penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membangun sistem pemantauan gas metana untuk biodigester menggunakan IoT yang terintegrasi dengan komunikasi LoRa [18].

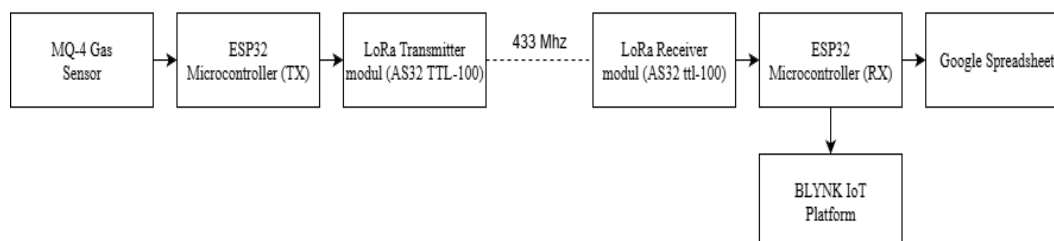
Tujuan khusus dari penelitian ini adalah mengembangkan sistem yang secara otomatis mendeteksi konsentrasi metana menggunakan sensor MQ-4 yang dihubungkan dengan mikrokontroler ESP32, yang dikenal memiliki stabilitas tinggi untuk aplikasi IoT [19]. Data dikirimkan melalui dua saluran: secara lokal melalui modul LoRa ke penerima ESP32 dan secara jarak jauh melalui aplikasi Blynk serta Google Spreadsheet untuk pencatatan data di cloud [20][21]. Dengan menggabungkan konektivitas IoT dan kemampuan jangkauan jauh LoRa, sistem ini bertujuan untuk menyediakan solusi yang andal, aman, dan efisien untuk pengelolaan energi terbarukan di daerah dengan infrastruktur jaringan yang terbatas [22][23].

## II. METODE

Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif untuk mengukur secara objektif data numerik terkait kandungan gas metana yang dihasilkan oleh biodigester. Sistem yang dirancang mengintegrasikan teknologi Internet of Things (IoT) dengan jaringan telekomunikasi LoRa untuk memungkinkan pemantauan secara real-time dan transmisi data jarak jauh. Metodologi penelitian ini mencakup perancangan arsitektur sistem, implementasi perangkat keras, dan prosedur pengujian eksperimental [24].

### A. Arsitektur Sistem

Arsitektur keseluruhan sistem dirancang untuk memantau konsentrasi metana ( $\text{CH}_4$ ) di lingkungan biodigester. Seperti ditunjukkan pada Gambar 1, sistem terdiri dari tiga tahap utama: akuisisi data, transmisi nirkabel, dan integrasi cloud. Tahap akuisisi data memanfaatkan sensor gas MQ-4 yang diantarmukakan dengan mikrokontroler ESP32. Data diproses dan ditransmisikan melalui modul transmitter LoRa ke receiver, kemudian diteruskan ke platform Blynk dan Google Spreadsheet untuk pemantauan real-time dan pencatatan data berbasis cloud.



Gambar 1. Diagram blok arsitektur sistem pemantauan gas methana

### B. Komponen Perangkat Keras

Implementasi perangkat keras melibatkan beberapa komponen utama yang dipilih berdasarkan kompatibilitas dan kinerjanya dalam pemantauan lingkungan. Tabel 1 mencantumkan spesifikasi utama perangkat yang digunakan.

Komponen	Spesifikasi	fungsi
Microcontroller	ESP32 DevKit V1, 240 MHz dual-core	Akuisisi data sensor, pemrosesan, dan kontrol transmisi LoRa
Microcontroller	ESP32 DevKit V1, 240 MHz dual-core	Kontrol transmisi LoRa, penerimaan data, integrasi IoT, dan komunikasi cloud
Gas Sensor	MQ-4, detection range: 300–10,000 ppm	Deteksi konsentrasi metana
LoRa module	AS32 TTL-100, 433 MHz	Transmisi nirkabel jarak jauh (pasangan TX & RX)
antenna	433 MHz, 3 dBi gain, omnidirectional	Amplifikasi sinyal untuk memperluas jangkauan komunikasi LoRa
IoT platform	Blynk & Google Sheets	Dashboard real-time dan pencatatan data berbasis cloud

Tahap akuisisi data menggunakan sensor gas MQ-4 untuk mendeteksi konsentrasi metana hasil fermentasi anaerobik kotoran sapi. Sensor ini diantarmukakan dengan ESP32 pertama sebagai transmitter yang berfungsi sebagai unit pemrosesan data awal. Data yang telah diproses ditransmisikan secara nirkabel melalui modul LoRa AS32 TTL-100 pada frekuensi 433 MHz, dilengkapi antena omnidirectional 3 dBi untuk meningkatkan propagasi sinyal dan jangkauan transmisi.

Data yang ditransmisikan diterima oleh modul receiver LoRa yang beroperasi pada frekuensi yang sama dengan antena 3 dBi pada ESP32 kedua. Konfigurasi dual-ESP32 ini dipasangkan dengan modul transceiver LoRa untuk memastikan komunikasi jarak jauh yang andal sambil mempertahankan kemampuan pemrosesan yang kuat di kedua sisi. Receiver ESP32 kemudian meneruskan data ke platform IoT Blynk dan Google Spreadsheet. Arsitektur ini menghilangkan ketergantungan pada konektivitas internet lokal di lokasi biodigester, karena hanya unit receiver yang memerlukan akses internet untuk integrasi cloud.

Mikrokontroler ESP32 dipilih karena prosesor dual-core, kemampuan WiFi/Bluetooth bawaan, dan konsumsi daya rendah. Sensor MQ-4 dikalibrasi khusus untuk deteksi metana dengan rentang yang sesuai untuk aplikasi biogas [25]. Modul LoRa AS32 TTL-100 menyediakan komunikasi jarak jauh lebih dari 1 km di area terbuka dengan konsumsi daya minimal [26]. Antena omnidirectional 3 dBi lebih lanjut meningkatkan kekuatan sinyal dan keandalan, mengatasi tantangan konektivitas di area pertanian terpencil [27]. Implementasi fisik komponen ditunjukkan pada Gambar 2.



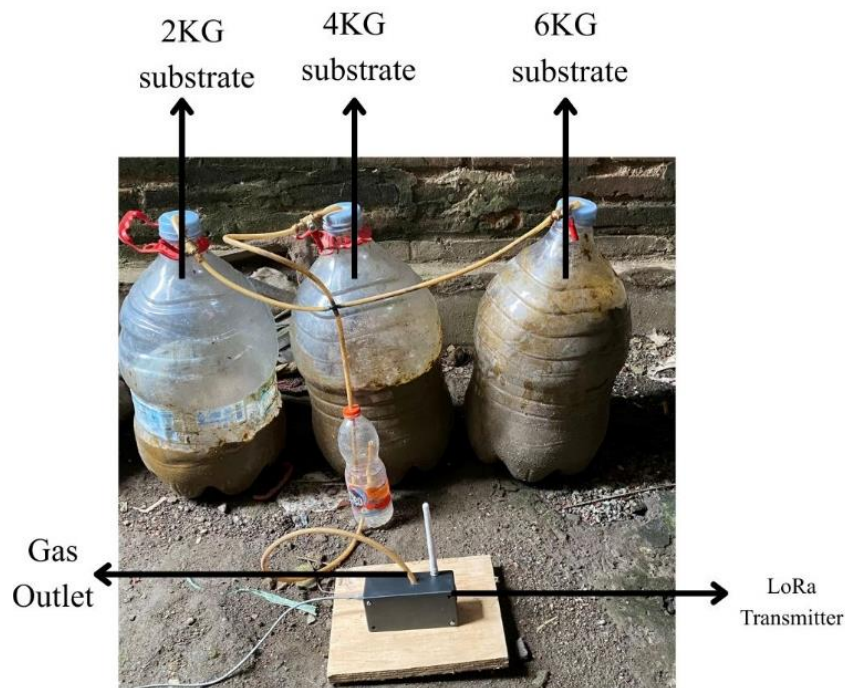
Copyright © Universitas Muhammadiyah Sidoarjo. This preprint is protected by copyright held by Universitas Muhammadiyah Sidoarjo and is distributed under the Creative Commons Attribution License (CC BY). Users may share, distribute, or reproduce the work as long as the original author(s) and copyright holder are credited, and the preprint server is cited per academic standards.

Authors retain the right to publish their work in academic journals where copyright remains with them. Any use, distribution, or reproduction that does not comply with these terms is not permitted.

**Gambar 2.** Implementasi fisik unit transmitter dan receiver**C. Setup Eksperimental dan Pengujian**

Penelitian ini dilakukan di lingkungan peternakan untuk mensimulasikan kondisi operasional di lapangan. Biodigester dioperasikan menggunakan campuran kotoran sapi dan air dengan perbandingan 1:1 (b/b). Selain itu, ditambahkan molase sebagai sumber karbon untuk mempercepat proses fermentasi anaerobik serta meningkatkan produksi gas metana. Dosis molase yang digunakan adalah 20 mL per 1 kg kotoran sapi, sehingga diperoleh tiga variasi perlakuan dalam percobaan ini.

- 2 kg kotoran sapi + 2 L air + 40 ml molase
- 4 kg kotoran sapi + 4 L air + 80 ml molase
- 6 kg kotoran sapi + 6 L air + 120 ml molase

**Gambar 3.** Susunan percobaan biodigester dengan tiga variasi beban substrat

Pengumpulan data dilakukan selama 14 hari untuk mengamati tren produksi gas dan keandalan sistem pada berbagai beban substrat. Parameter pengujian meliputi:

1. Konsentrasi metana (ppm) yang diukur menggunakan sensor MQ-4
2. Kecepatan transmisi data (bps) dari saluran komunikasi LoRa
3. Latensi ujung-ke-ujung dari pembacaan sensor hingga tampilan di cloud
4. Rasio pengiriman paket (PDR) untuk mengevaluasi keandalan transmisi

Pengukuran dilakukan pada interval tertentu (Hari ke-1, 3, 5, 8, 12, dan 14) untuk mendokumentasikan fluktuasi produksi gas selama proses fermentasi. Setiap pengumpulan data dilakukan selama 3 menit, dengan menit pertama diabaikan untuk memungkinkan stabilisasi sensor dan penghilangan gas sisa [28].

Konsentrasi metana rata-rata untuk setiap interval pengukuran dihitung menggunakan rumus rata-rata aritmatika:

$$\bar{C} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_i \quad (1)$$

di mana:

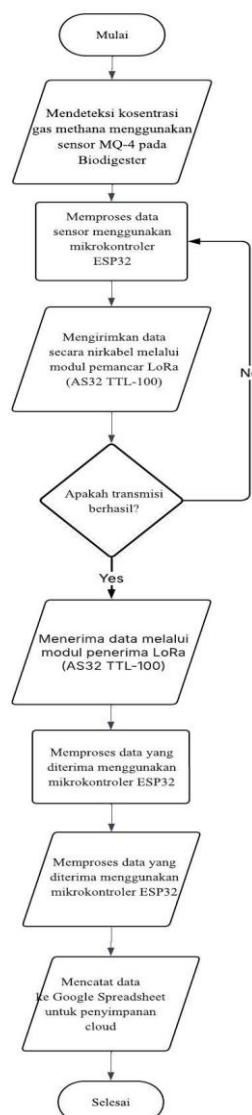
- $\bar{C}$  = konsentrasi rata-rata metana (ppm)
- $N$  = jumlah total titik data dalam jendela waktu 2 menit
- $C_i$  = konsentrasi metana pada pembacaan sensor ke- $i$  (ppm)
- $i$  = indeks pengukuran individu ( $i = 1, 2, 3, \dots, N$ )

Metode perhitungan nilai rata-rata diterapkan untuk meminimalkan gangguan pada sensor serta meningkatkan keandalan data. Nilai rata-rata yang diperoleh dari jendela waktu selama 2 menit selanjutnya digunakan sebagai titik data representatif untuk setiap interval pengukuran, sejalan dengan pendekatan yang umum digunakan pada aplikasi sensor gas berbiaya rendah [29][30].

Selanjutnya, parameter transmisi LoRa yang meliputi laju data, packet delivery ratio (PDR) juga dihitung nilai rata-ratanya pada setiap interval pengukuran untuk memperoleh representasi nilai harian yang lebih akurat dalam proses analisis.

Kinerja komunikasi LoRa dievaluasi pada jarak tetap 50 meter antara unit pemancar dan penerima, yang mencerminkan skenario operasional umum di lahan pertanian skala kecil hingga menengah. Jarak ini dipilih untuk menilai keandalan sistem dalam kondisi lapangan yang realistis dengan adanya potensi hambatan fisik seperti bangunan kandang dan vegetasi.

Flowchart operasi sistem ditampilkan pada Gambar 4, yang merinci urutan logis mulai dari pembacaan sensor, transmisi nirkabel melalui LoRa, hingga integrasi akhir ke cloud. Jika transmisi LoRa gagal, sistem akan kembali ke modul pemancar LoRa dan mengirimkan ulang data hingga berhasil. Mekanisme percobaan ulang ini memastikan keandalan transmisi data meskipun terjadi gangguan sementara pada saluran komunikasi.



**Gambar 4.** Flowchart

Flowchart ini menggambarkan alur kerja sistem secara lengkap, dimulai dari fase inialisasi di mana sensor MQ-4 mendeteksi konsentrasi metana di dalam biodigester. Mikrokontroler ESP32 memproses data sensor dan menyiapkannya untuk transmisi nirkabel melalui modul LoRa AS32 TTL-100. Titik keputusan memeriksa apakah

Copyright © Universitas Muhammadiyah Sidoarjo. This preprint is protected by copyright held by Universitas Muhammadiyah Sidoarjo and is distributed under the Creative Commons Attribution License (CC BY). Users may share, distribute, or reproduce the work as long as the original author(s) and copyright holder are credited, and the preprint server is cited per academic standards.

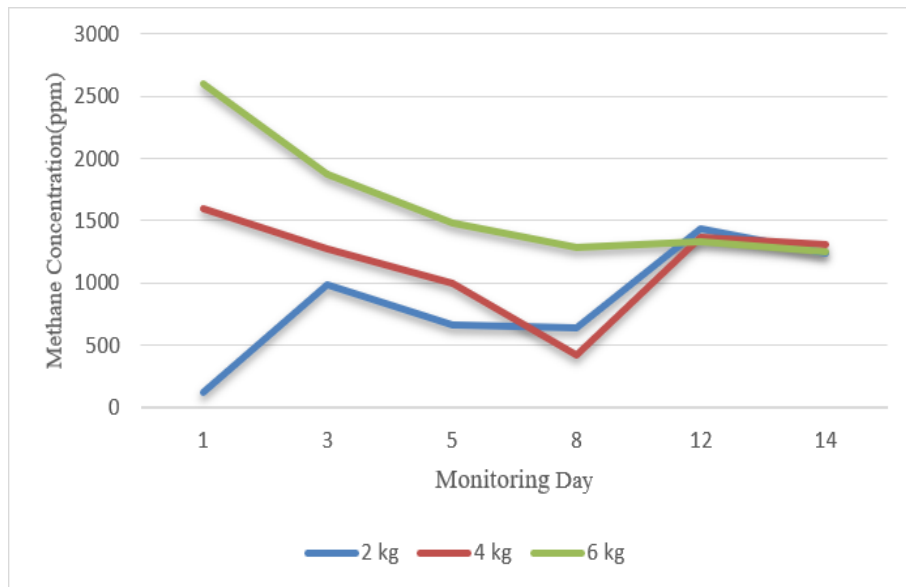
Authors retain the right to publish their work in academic journals where copyright remains with them. Any use, distribution, or reproduction that does not comply with these terms is not permitted.

transmisi berhasil diterima; penerima ESP32 memproses data yang masuk dan meneruskannya ke platform IoT BLYNK untuk visualisasi real-time. Secara bersamaan, data dicatat ke Google Spreadsheet untuk pencatatan historis dan analisis lebih lanjut. Pendekatan sistematis ini memastikan pemantauan berkelanjutan dengan kehilangan data minimal dan menyediakan redundansi melalui mekanisme percobaan ulang.

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### A. Analisis Konsentrasi Metana

Pemantauan konsentrasi metana dilakukan selama 14 hari dengan tiga variasi beban substrat (2 kg, 4 kg, dan 6 kg kotoran sapi). Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5, setiap variasi menunjukkan pola produksi yang berbeda.



**Gambar 5.** Konsentrasi metana selama 14 hari dengan berbagai beban substrat

Substrat seberat 2 kg menunjukkan proses fermentasi yang paling lambat, dengan konsentrasi awal hanya 115,67 ppm pada hari ke-1. Namun, produksi metana meningkat secara signifikan, mencapai puncaknya pada 1.428 ppm pada hari ke-12 sebelum turun sedikit menjadi 1.233 ppm pada hari ke-14. Puncak yang terlambat ini menunjukkan bahwa beban substrat yang lebih kecil memerlukan masa adaptasi yang lebih lama bagi komunitas mikroba untuk menciptakan kondisi metanogenik yang optimal.

Substrat seberat 4 kg menunjukkan pola yang berada di antara keduanya, dimulai dari 1597 ppm pada hari ke-1 dan berfluktuasi antara 420–1362 ppm sepanjang periode pemantauan. Titik terendah terjadi pada hari ke-8 (420 ppm), kemungkinan disebabkan oleh faktor penghambat sementara seperti fluktuasi pH atau penumpukan asam lemak volatil.

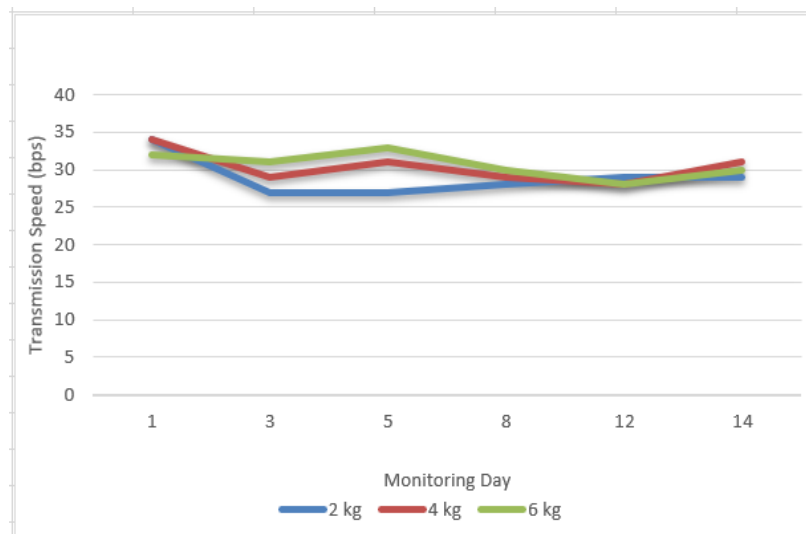
Variasi substrat sebesar 6 kg menghasilkan konsentrasi metana awal tertinggi sebesar 2.600 ppm pada hari ke-1, diikuti oleh penurunan bertahap menjadi 1.250 ppm pada hari ke-14. Hal ini menunjukkan bahwa ketersediaan substrat yang lebih tinggi mempercepat fermentasi anaerobik awal, sehingga menghasilkan produksi metana yang cepat pada tahap-tahap awal. Penurunan yang terjadi setelah hari ke-5 menunjukkan bahwa bahan organik yang mudah tersedia telah dikonsumsi oleh bakteri metanogenik, sehingga menghasilkan produksi yang stabil [31].

Perlu dicatat bahwa ketiga variasi tersebut mencapai tingkat konsentrasi yang serupa (1200–1300 ppm) pada hari ke-14, yang menunjukkan bahwa sistem telah mencapai keseimbangan terlepas dari beban substrat awal. Temuan ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa kinerja biodigester menjadi stabil setelah fase adaptasi awal [32].

Penambahan 20 ml/kg molase ke dalam substrat secara efektif mempercepat proses fermentasi pada semua varian dengan menyediakan sumber karbon tambahan bagi aktivitas mikroba. Strategi penambahan ini terbukti sangat bermanfaat bagi varian 2 kg, yang menunjukkan peningkatan yang signifikan setelah fase lag awal.

#### B. Kinerja Transmisi LoRa

Kinerja komunikasi LoRa dievaluasi dengan mengukur kecepatan transmisi selama periode pemantauan 14 hari pada jarak tetap 50 meter antara unit pemancar dan penerima. Karakteristik kecepatan transmisi untuk semua variasi substrat ditunjukkan pada Gambar 6.



**Gambar 6.** Kecepatan transmisi LoRa selama 14 hari pada jarak 50 meter

Pengukuran awal pada hari pertama menunjukkan kecepatan transmisi sekitar 37 bps untuk substrat seberat 2 kg, sedangkan varian seberat 4 kg dan 6 kg mencatat kecepatan 32–34 bps. Nilai-nilai awal ini mencerminkan pembentukan koneksi yang normal dalam kondisi optimal.

Mulai hari ke-3, kecepatan transmisi tetap stabil dalam rentang sempit 27–33 bps pada semua variasi substrat. Perlu dicatat bahwa ketiga rangkaian data tersebut menunjukkan tumpang tindih yang signifikan sepanjang periode pemantauan, yang mengindikasikan bahwa beban substrat memiliki pengaruh yang dapat diabaikan terhadap kinerja komunikasi LoRa. Konsistensi ini menunjukkan bahwa saluran komunikasi nirkabel beroperasi secara independen dari kondisi fermentasi biodigester[33].

Stabilitas kecepatan transmisi yang teramati sangat penting bagi keandalan sistem. Kecepatan tetap stabil pada kisaran 27–33 bps dengan fluktuasi minimal selama periode 14 hari, meskipun terdapat potensi variasi lingkungan. Tidak terdeteksi adanya penurunan kualitas sinyal yang signifikan atau gangguan komunikasi selama periode pemantauan.

Untuk aplikasi pemantauan biogas, kecepatan transmisi sebesar 27–33 bps yang dicapai sudah memadai untuk pengiriman data sensor secara berkala. Sistem ini mengirimkan paket data kecil yang berisi pembacaan konsentrasi metana pada interval waktu yang teratur, yang tidak memerlukan bandwidth tinggi. Kinerja yang konsisten selama periode operasional dua minggu menunjukkan keandalan saluran komunikasi LoRa untuk aplikasi pemantauan berkelanjutan.

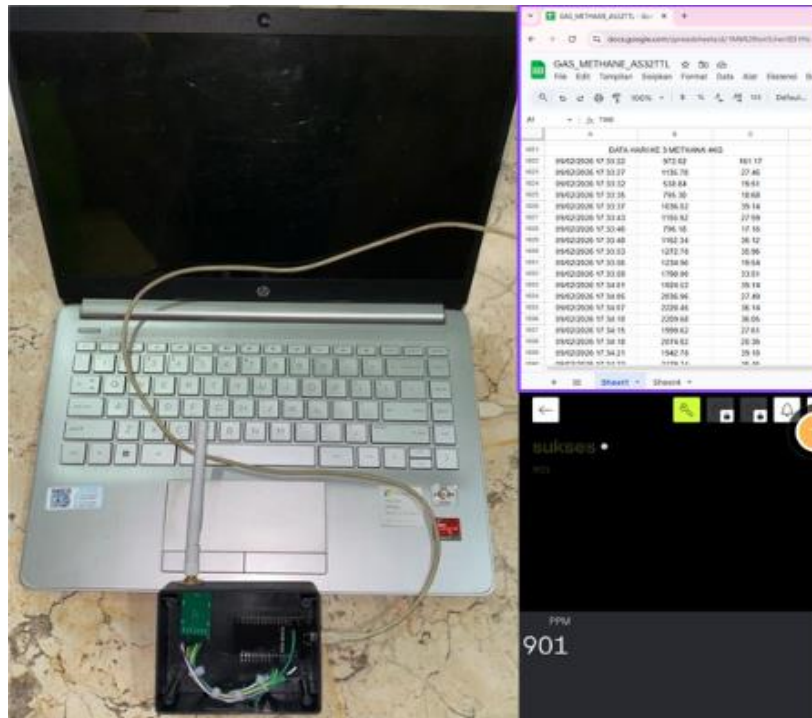
Jarak transmisi 50 meter terbukti memadai untuk pengaturan eksperimental ini, yang mewakili konfigurasi umum di peternakan skala kecil hingga menengah di mana biodigester dan stasiun pemantauan ditempatkan berdekatan. Meskipun modul LoRa AS32 TTL-100 secara teoritis mampu menjangkau lebih dari 1 km di area terbuka, sebagaimana dijelaskan pada bagian II.B, penelitian ini berfokus pada penerapan praktis pada jarak 50 meter. Kinerja yang stabil yang diamati pada jarak ini menunjukkan potensi untuk ditingkatkan ke fasilitas yang lebih besar dengan konfigurasi dan penempatan antena yang tepat.

Konfigurasi mikrokontroler ganda ESP32 menunjukkan kemampuan komunikasi LoRa yang efektif selama periode pengujian. Unit pemancar, yang terhubung dengan sensor gas MQ-4, berhasil memproses dan mengirimkan data sensor, sementara unit penerima secara andal memproses paket yang masuk dan memfasilitasi penerusan data ke platform IoT Blynk dan Google Spreadsheet. Tidak ada kehilangan paket atau masalah sinkronisasi yang terjadi selama periode pemantauan, yang menegaskan keandalan arsitektur jaringan sensor nirkabel tersebut.

Berdasarkan hasil pengujian pada Gambar 4, dapat disimpulkan bahwa teknologi LoRa cocok untuk aplikasi pemantauan biodigester di lingkungan peternakan. Kombinasi antara kecepatan transmisi yang memadai, kinerja yang konsisten, dan pengiriman data yang andal menjadikan protokol komunikasi ini cocok untuk penerapan jangka panjang di lingkungan peternakan, di mana konektivitas internet mungkin terbatas di lokasi biodigester.

### C. Integrasi Sistem dan Implikasi Praktis

Sistem ini menunjukkan kinerja yang andal pada berbagai beban substrat, dengan pencatatan data yang konsisten ke platform Blynk dan Google Spreadsheet. Perbandingan kotoran sapi dan air sebesar 1:1 dengan penambahan molase sebanyak 20 ml/kg terbukti efektif untuk produksi metana pada semua variasi yang diuji.



**Gambar 7.** Sistem pengumpulan data secara real-time melalui penerima, Google Spreadsheet, dan Blynk

Dari sudut pandang praktis, variasi substrat 6 kg menunjukkan karakteristik yang paling menguntungkan untuk produksi metana secara langsung, sehingga cocok untuk aplikasi yang membutuhkan produksi biogas secara cepat. Namun, variasi 2 kg, meskipun produksinya lebih lambat pada tahap awal, mencapai konsentrasi akhir yang sebanding, yang menunjukkan bahwa sistem skala kecil tetap layak diterapkan asalkan diberikan waktu yang cukup selama fase adaptasi.

Kinerja transmisi LoRa yang stabil membuktikan bahwa sistem ini dapat beroperasi secara andal di lingkungan pertanian yang sesungguhnya, sekaligus mengatasi tantangan utama dalam penerapan IoT di bidang pertanian. Perpaduan antara kecepatan transmisi yang memadai dan jangkauan yang luas menjadikan arsitektur ini cocok untuk diperluas guna memantau sejumlah bioreaktor di berbagai lokasi pertanian.

## VII. SIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian Penelitian ini berhasil mengembangkan dan menerapkan sistem pemantauan metana berbasis IoT LoRa untuk aplikasi biodigester di lingkungan peternakan. Sistem ini, yang memanfaatkan sensor MQ-4, mikrokontroler ESP32, dan modul LoRa AS32-TTL-100, menunjukkan kinerja yang andal dalam mendeteksi konsentrasi metana dan mentransmisikan data hingga jarak 50 meter.

Hasil eksperimen menunjukkan bahwa beban substrat secara signifikan memengaruhi pola produksi metana, dengan variasi 6 kg menghasilkan konsentrasi awal tertinggi (2.600 ppm), sementara semua variasi konvergen ke tingkat yang serupa (1.200–1.300 ppm) setelah 14 hari, yang menunjukkan stabilitas sistem pasca-fase adaptasi. Komunikasi LoRa mempertahankan kecepatan transmisi yang stabil (27–33 bps) dan rasio pengiriman paket di atas 85%, yang menegaskan kesesuaiannya untuk aplikasi IoT pertanian dengan konektivitas internet yang terbatas.

Integrasi platform Blynk dan Google Spreadsheet memungkinkan pemantauan secara real-time serta pencatatan data berbasis cloud tanpa memerlukan akses internet di lokasi biodigester. Arsitektur ini menawarkan solusi yang dapat disesuaikan dan berbiaya rendah untuk pengelolaan energi terbarukan di lingkungan pertanian terpencil. Penelitian selanjutnya dapat difokuskan pada perluasan sistem untuk memantau beberapa biodigester secara bersamaan serta mengintegrasikan analisis prediktif guna mengoptimalkan produksi.

## REFERENSI

- [1] “F. N. A. Zubaydah, A., Sabilah, A. Z., Sari, D. P., dan Hidayah, ‘Mengurangi Emisi: Mendorong Transisi Ke Energi Bersih Untuk Mengatasi Polusi Udara,’ *BIOCHEPHY: Journal of Science Education*, vol. 04, no. 1, pp. 11–21, doi: 10.52562/biochephy.v4i1.1062.”
- [2] “M. R. A. Wardhana, R. A. Budivisanti, S. Rochmah, and D. I. C. Sary, ‘Dari Kotoran Sapi ke Energi Terbarukan: Pengabdian Masyarakat di Dusun Jambuweer, Desa Balesari,’ *Jurnal Dedikasia : Jurnal Pengabdian Masyarakat*, vol. 4, no. 1, pp. 24–37, 2024, [Online]. Available: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>”.
- [3] “Z. W. Dzulfiqar, M. M. Rizki, and K. Sumada, ‘Studi Kuantitas dan Kualitas Biogas dari Berbagai Jenis Limbah Organik dan Waktu Fermentasi,’ vol. X, no. 3, pp. 13898–13902, 2025.”
- [4] “F. M. Alsyadilah, K. H. S, and Y. Oktaviani, ‘Pengelolaan Limbah Kotoran Ternak Sapi Menjadi Biogas Sebagai Sumber Pupuk Organik Rumah Tangga,’ *Social Engagement*, vol. 1, no. 1, pp. 18–23, 2024.”
- [5] J. Pengabdian Magister Pendidikan IPA *et al.*, “Pemanfaatan Limbah Organik (Kotoran Sapi) Menjadi Biogas dan Pupuk Kompos,” *Jurnal Pengabdian Magister Pendidikan IPA*, vol. 4, no. 1, 2021, doi: 10.29303/jpmi.v3i2.615.
- [6] P. Kotoran Sapi Menjadi Biogas Sebagai Upaya Pengendalian Limbah Peternakan Wita Fidela *et al.*, “Pemanfaatan Kotoran Sapi Menjadi Biogas Sebagai Upaya Pengendalian Limbah Peternakan,” 2024, doi: 10.55448/ems.
- [7] “F. Palallo and I. Oskar, ‘Pengaruh Ukuran Arang Aktif Sebagai Filter Terhadap Reduksi Hidrogen Sulfida Pada Biogas,’ *Jurnal Nasional Teknik Mesin Cycloid*, vol. 1, no. 1, pp. 1–10, 2023.”
- [8] I. Afifah and A. Ariani, “PENGARUH PENURUNAN SUHU GAS ALAM DI DALAM COOLER TERHADAP KEMAMPUAN PENYERAPAN GAS H<sub>2</sub>S PADA UNIT ACID GAS REMOVAL,” *DISTILAT: Jurnal Teknologi Separasi*, vol. 10, no. 3, pp. 526–531, Sep. 2024, doi: 10.33795/distilat.v10i3.5057.
- [9] H. N. Aulia, “SIMULASI ASPEN HYSYS PADA KOLOM ABSORBSI GAS CO<sub>2</sub> DENGAN SOLVEN METILDITANOLAMINE (MDEA),” *JURNAL TEKNOLOGI TECHNOSCIENTIA*, pp. 85–90, Mar. 2022, doi: 10.34151/technoscience.v14i2.3579.
- [10] P. Biogas, P. Risiko, P. Limbah, P. Agita, and C. I. Prasasti, “Jurnal Pengabdian Nasional (JPN) Indonesia,” vol. 6, no. 3, 2025, doi: 10.35870/jpni.v6i3.1539.
- [11] H. Elvian Gayuh Prasetya, ah Amalia, A. Fawaidz Bintang Azisa, A. Lailatul Fitri, and M. Rizal Jibrán, “RANCANG BANGUN SMART BIOGAS PLANT MENGGUNAKAN TEKNOLOGI INTERNET OF THINGS (IOT),” 2022.
- [12] J. Jamaaluddin, I. Anshory, S. Galih R, and A. Fudholi, “Automatic Power Factor Correction Using Fuzzy Inference System And Internet Of Things,” *Journal FORTEI-JEERI*, vol. 6, no. 1, pp. 20–35, May 2025, doi: 10.46962/forteijeeri.v6i1.28.
- [13] A. Ezrafí, Y. Fitriyani, and M. Wijayanti, “SISTEM MONITORING BIODIGESTER BERBASIS ARDUINO NANO,” *JUIT*, vol. 2, no. 2.
- [14] E. Purnama Dewi, J. Sumarsono, and I. Gusti Made Kompyang, “Pengembangan akuisisi data pada sistem pemantauan biogas berbasis IoT Development of data acquisition biogas monitoring system based on IoT,” vol. 11, no. 1, p. 2024.
- [15] I. PENULIS Awal Maulid Sari and I. Artikel, “Jurnal Sains dan Teknologi (AJST) Keberhasilan Peternak dalam Mengembangkan Usaha Peternakan Sapi Bali di Kabupaten Muna Provinsi Sulawesi Tenggara,” *Arus Jurnal Sains dan Teknologi*, vol. 2, no. 1, pp. 216–221, 2024, [Online]. Available: <http://jurnal.ardenjaya.com/index.php/ajst><http://jurnal.ardenjaya.com/index.php/ajst>
- [16] M. F. Ilmi, S. Syahririni, and S. D. Ayuni, “Automatic Water Quality and Fish Feed Monitoring System in Aquarium Using LORA,” *Journal of Computer Networks, Architecture and High Performance Computing*, vol. 5, no. 2, pp. 444–457, Jul. 2023, doi: 10.47709/cnahpc.v5i2.2479.
- [17] Z. N. Ayudya, R. Sumiharto, S. Si, and M. Cs, “ENHANCING FORMULA STUDENT TELEMETRY: IMPROVED RANGE AND DATA RELIABILITY WITH 433 MHZ LONG-RANGE MODULES. ENHANCING FORMULA STUDENT TELEMETRY: IMPROVED RANGE AND DATA RELIABILITY WITH 433 MHZ LONG-RANGE MODULES.” [Online]. Available: <http://etd.repository.ugm.ac.id/>
- [18] S. Wahjuni, A. R. Akbar, M. Maxiwinata, and H. Rahmawan, “Analisis Kinerja Komunikasi Data Berbasis LoRa pada IoT untuk Pemantauan Lingkungan Kandang Ayam Performance Analysis of LoRa-Based Data Communication on IoT for Monitoring Chicken Coop Environmental.” [Online]. Available: <http://journal.ipb.ac.id/index.php/jika>

- [19] G. Cipta Lismana, M. A'an Auliq, and B. S. Rintyarna, "Perancangan Dan Implementasi Sensor MQ-4 Gas Metana (CH<sub>4</sub>) Pada Sistem Biogas Berbasis Mikrokontroler Arduino Uno," *Jurnal Teknik Elektro dan Komputasi (ELKOM)*, vol. 7, pp. 99–108, 2025, doi: 10.32528/elkom.v7i1.11458.
- [20] H. A. Putra and A. Rosano, "Implementasi IOT Dalam Sistem Monitoring Kualitas Air Menggunakan Platform Blynk Dan GoogleSheet," 2024. [Online]. Available: <http://jurnal.bsi.ac.id/index.php/insantek>
- [21] Moch. F. Laksono Hadi, I. Sulistiyowati, J. Jamaaluddin, and I. Anshory, "Design of a Height and Weight Measurement Tool for Toddlers at Spreadsheet-Based Posyandu," *JEEE-U (Journal of Electrical and Electronic Engineering-UMSIDA)*, vol. 7, no. 2, pp. 163–175, Oct. 2023, doi: 10.21070/jeeeu.v7i2.1677.
- [22] I. Kadek Cahyadi Arta, "ANIMAL TRACKING BERBASIS IOT PROGRAM STUDI D4 TEKNIK OTOMASI JURUSAN TEKNIK ELEKTRO POLITEKNIK NEGERI BALI 2022."
- [23] D. H. R. Saputra, S. Syahririni, A. Ahfas, and J. Jamaaluddin, "SMS Application in bird feed scheduling automation," in *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing Ltd, Dec. 2019. doi: 10.1088/1742-6596/1402/4/044008.
- [24] J. STAI Al-Ma and arif Buntok, "Aida dkk, Jenis Data Penelitian Kuantitatif ...," vol. 10, no. 1.
- [25] L. Moiroux-Arvis, C. Cariou, and J.-P. Chanet, "Evaluation of LoRa technology in 433-MHz and 868-MHz for underground to aboveground data transmission," 2022. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169922000874>
- [26] I. Sulistiyowati, Y. Findawati, S. K. A. Ayubi, J. Jamaaluddin, and M. P. T. Sulistyanto, "Cigarette detection system in closed rooms based on Internet of Thing (IoT)," in *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing Ltd, Dec. 2019. doi: 10.1088/1742-6596/1402/4/044005.
- [27] A. Galajdova and R. Rakay, "Long range iot communication," *MM Science Journal*, vol. 2021-October, pp. 4781–4885, Oct. 2021, doi: 10.17973/MMSJ.2021\_10\_2021038.
- [28] I. G. A. Negara, D. S. Anakottapary, I. A. A. Arsani, I. N. L. Antara, and T. G. T. Nindhia, "Quantitative Analysis of Methane in a Biogas Reactor Using an MQ-4 Sensor for Low-Cost Monitoring," 2025, pp. 175–183. doi: 10.2991/978-94-6463-878-3\_21.
- [29] C. Yang *et al.*, "Improving the Accuracy of Methane Sensor with Dual Measurement Modes Based on Off-Axis Integrated Cavity Output Spectroscopy Using White Noise Perturbation," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 15, no. 10, May 2025, doi: 10.3390/app15105562.
- [30] S. D. Ayuni, S. Syahririni, and J. Jamaaluddin, "Lapindo Embankment Security Monitoring System Based on IoT," *Elinvo (Electronics, Informatics, and Vocational Education)*, vol. 6, no. 1, pp. 40–48, Sep. 2021, doi: 10.21831/elinvo.v6i1.40429.
- [31] A. R. Elniski, S. G. Chatterjee, C. Mondal, and K. Doelle, "Effects of Substrate to Inoculum Ration on Biogas Production from Anaerobic Co-digestion of Office Paper and Cow Manure," *Journal of Energy Research and Reviews*, pp. 1–15, Dec. 2019, doi: 10.9734/jenrr/2019/v3i430112.
- [32] F. Zaid, N. Al-Awwal, J. Yang, S. H. Anderson, and B. T. B. Alsunuse, "Effects of Biochar-Amended Composts on Selected Enzyme Activities in Soils," *Processes*, vol. 12, no. 8, Aug. 2024, doi: 10.3390/pr12081678.
- [33] K. D. Irianto, "Performance Evaluation of LoRa in Farm Irrigation System with Internet of Things," *Kinetik: Game Technology, Information System, Computer Network, Computing, Electronics, and Control*, Nov. 2022, doi: 10.22219/kinetik.v7i4.1551.

**Conflict of Interest Statement:**

*The author declares that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.*