

# Integrasi Sensor Pintar dengan Sistem IoT untuk Memantau Kadar Gas Nitrogen pada Reaktor Biogas

## *Integration of Smart Sensors with IoT Systems to Monitor Nitrogen Gas Levels in Biogas Reactors*

Son Ali Akbar<sup>1\*</sup>, Muhammad Azis Sidiq<sup>1</sup>, Anton Yudhana<sup>1</sup>, Rahmat Rian Hidayat<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Program Studi Teknik Elektro, Universitas Ahmad Dahlan, Indonesia

<sup>2</sup> Manajemen Informasi dan Komunikasi, Sekolah Tinggi Multi Media, Indonesia

<sup>1</sup>Jalan Ahmad Yani (Ringroad Selatan) Tamanan Banguntapan Bantul Yogyakarta 55166, Indonesia

<sup>2</sup>Jalan Magelang Km. 6 Yogyakarta 55284, Indonesia

son.akbar@te.uad.ac.id

Diterima : 5 Januari 2025 || Direvisi : 5 Januari 2025 || Disetujui: 15 Maret 2025

**Abstrak** – Energi terbarukan merupakan salah satu energi yang berasal dari proses alam akan tetapi tetap ada dan dapat digunakan secara terus menerus. Penggunaan energi baru terbarukan merupakan bentuk masyarakat mengurangi penggunaan bahan bakar fosil. Salah satu energi baru terbarukan yang berada pada lingkup rumah tangga yaitu biogas. Biogas adalah gas yang dihasilkan oleh mikroorganisme selama fermentasi anaerobik bahan organik. Penelitian ini mengusulkan metode monitoring gas nitrogen berbasis *Internet of Things (IoT)* yang mampu mengetahui kadar gas nitrogen yang terkandung dalam biogas. Perancangan perangkat keras sistem untuk mendeteksi kadar gas nitrogen digunakan perangkat sensor MQ-135 dan ESP8266 untuk pengolahan data melalui internet atau secara langsung. Hasil *monitoring* menunjukkan kadar gas nitrogen yang terdapat pada biogas tidak melebihi 20.000 ppm. Sesuai dengan kadar standar yang ditetapkan berupa kadar nitrogen sebesar 2% - 5% atau 20.000 ppm. Oleh karena itu, biogas memenuhi kriteria.

**Kata Kunci:** biogas, nitrogen, *Internet of Things (IoT)*

**Abstract** – Renewable energy is a type of energy derived from natural processes and can be used continuously. The use of new and renewable energy represents a societal effort to reduce reliance on fossil fuels. Biogas is one of the newest sustainable energy sources in the home. One such renewable energy source applicable at the household level is biogas, a gas produced by microorganisms through the anaerobic fermentation of organic matter. This study presents an *Internet of Things (IoT)*-based nitrogen gas monitoring system for determining the quantities of nitrogen gas in biogas. The hardware system for detecting nitrogen gas levels utilizes an MQ-135 sensor and an ESP8266 microcontroller for processing data via the internet or in real-time. Monitoring results indicate that the nitrogen gas concentration in biogas does not exceed 20,000 ppm, which aligns with the established standard range of 2%–5% nitrogen, or approximately 20,000 ppm. Based on these findings, the biogas is deemed to meet the required quality criteria.

**Keywords:** biogas, nitrogen, *Internet of Things (IoT)*

### PENDAHULUAN

Pemanfaatan biogas sebagai energi terbarukan semakin mendapatkan perhatian di berbagai belahan dunia, termasuk Indonesia (Budiman, 2021). Biogas dihasilkan dari proses fermentasi bahan organik, seperti limbah pertanian, kotoran hewan, dan sampah organik, yang diolah dalam biogas *digester* (Singh et al., 2019). Energi ini merupakan alternatif yang ramah lingkungan karena dapat mengurangi emisi gas rumah kaca dan mengurangi ketergantungan pada sumber energi fosil (Silva Neto & Gallo, 2021). Selain itu, biogas dapat digunakan untuk menghasilkan listrik,

pemanas, atau bahan bakar kendaraan, sehingga berkontribusi pada keberlanjutan energi (Pratiwi et al., 2019). Dengan penerapan teknologi ini, diharapkan dapat meningkatkan efisiensi pengelolaan limbah dan mendukung program energi bersih, yang sangat penting dalam menghadapi perubahan iklim global (Rafiee et al., 2021).

Biogas yang dihasilkan dari proses fermentasi anaerobik tidak hanya mengandung gas-gas energi seperti metana dan karbon dioksida, tetapi juga mengandung unsur hara yang penting, termasuk nitrogen (Atelge et al., 2020). Nitrogen dalam biogas,

yang sebagian besar berasal dari bahan organik yang terurai, hadir dalam bentuk amonia ( $\text{NH}_3$ ) dan senyawa nitrogen lainnya .

Teknologi monitoring kadar gas pada biogas yang berbasis *Internet of Things* (IoT) membawa revolusi dalam pengelolaan produksi biogas dengan meningkatkan efisiensi dan akurasi pemantauan (Prasetya et al., 2022). Sistem IoT mengintegrasikan sensor gas elektronik yang dapat mengukur konsentrasi gas seperti metana ( $\text{CH}_4$ ), karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ), dan hidrogen sulfida ( $\text{H}_2\text{S}$ ) termasuk nitrogen secara waktu nyata. Data yang dikumpulkan oleh sensor ini dapat dikirim ke *platform cloud* untuk dianalisis, memungkinkan operator untuk memantau kondisi fermentasi anaerobik dari jarak jauh melalui aplikasi atau *dashboard* daring (Sadi et al., 2022).

Penelitian ini melakukan penerapan prototipe pemantaun jarak jauh produksi biogas berbasis IoT melalui jaringan internet di Perternakan Adi Makmur Sejahtera, Moyudan, Kabupaten Sleman, Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta. Menurut data kepemilikan para peternak yakni memiliki sekitar 50 ekor sapi dan menghasilkan sekitar 200 kg kotoran perhari.

## KAJIAN PUSTAKA

Terdapat penelitian yang bertujuan untuk merancang *digester* biogas portabel yang memanfaatkan limbah organik dan kotoran sapi sebagai starter (Obileke et al., 2020). Penelitian ini juga menghasilkan pupuk organik cair sebagai produk sampingan dari proses pembentukan biogas. Melibatkan uji kebocoran, uji nyala api untuk mendeteksi gas metana, serta pengukuran kadar unsur N, P, dan K pada pupuk organik cair yang dihasilkan. Hasil yan diperoleh berupa pupuk organik cair (*bio-slurry*) dengan kandungan unsur hara seperti nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K) telah memenuhi standar yang berlaku dengan nilai N 0,06%, P 1,73 ppm, dan K 346,05 ppm (Erfiani et al., 2023).

Penelitian tentang penerapan IoT seperti untuk mengembangkan sistem pemantauan kualitas udara berbasis *Internet of Things* (IoT) dengan menggunakan *web server*. Sistem ini dirancang untuk mendeteksi gas berbahaya seperti CO, NO<sub>2</sub>, dan partikel PM 2.5, yang dapat berdampak negatif terhadap kesehatan. Sistem menggunakan mikrokontroler AVR ATmega 328p sebagai pusat kontrol dan ESP 8266-01 untuk komunikasi dengan jaringan internet. Sensor yang

digunakan MQ 07, MQ 135, dan Dust Sensor. Hasil menunjukkan bahwa kadar CO dan PM 2.5 berada dalam batas aman bagi manusia, tetapi kadar NO<sub>2</sub> tergolong tidak sehat (Sadi et al., 2022).

Penelitian lain tentang penerapan IoT pada biogas *digester* dengan mengintegrasikan sensor tekanan pada solenoid (Arifin et al., 2024). Data pembacaan sensor dikirim ke *platform IoT Cloud* (Sulistiyanto & Mawardi, 2024).

## METODOLOGI PENELITIAN

### Penampungan Kotoran Ternak (*Biogas Digester*)

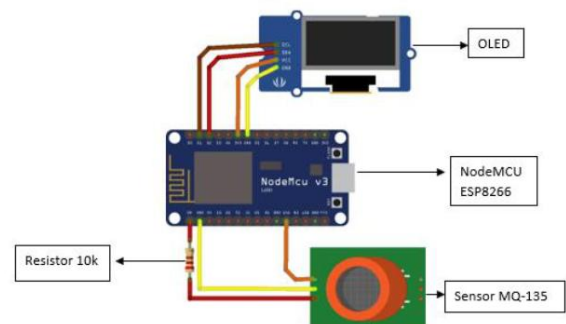
Biogas *digester* pada peternakan Adi Makmur Sejahtera menjadi media pengujian prototipe untuk mengukur kadar unsur nitrogen (Soebagia et al., 2021). Gambar 1 menunjukkan biogas *digester*.



Gambar 1 Biogas Digester

### Diagram Integrasi Sistem

Diagram pengkabelan merupakan diagram yang menunjukkan tata letak dari rangkaian alat. Selain itu dengan adanya diagram pengkabelan pengguna dapat lebih mudah memahami rangkaian alat. Gambar 2 menunjukkan diagram integrasi sistem antara setiap komponen elektronis yang digunakan.



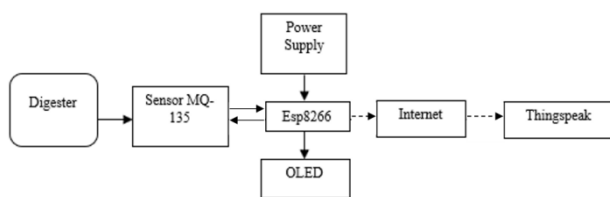
Gambar 2 Diagram Integrasi Sistem

Rangkaian terdiri dari komponen mikrokontroler ESP8266, Sensor MQ-135, dan *Organic Light*-

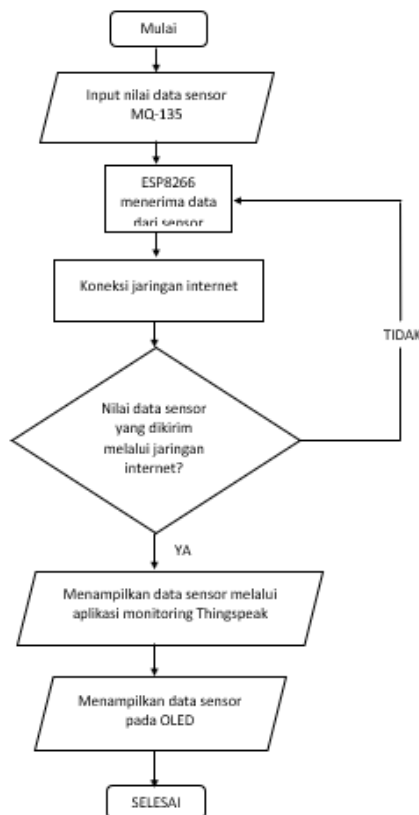
*Emitting Diode* (OLED). OLED digunakan untuk menampilkan nilai kadar gas selain pada aplikasi *Thingspeak*. Mikrokontroler ESP8266 yang digunakan sudah memiliki modul yang dapat terhubung ke jaringan *Wireless Fidelity* (WiFi) (Ismangil et al., 2023). Sensor yang digunakan untuk mendeteksi kandungan nitrogen adalah Sensor MQ-135, kelebihan dari sensor MQ-135 memiliki kepekaan yang baik terhadap gas berbahaya (Alfanz et al., 2016).

### Proses Alur Kerja Sistem Prototipe

Rancang bangun alat ini diawali dengan menghubungkan semua alat sehingga menjadibrancang bangun sistem yang akan digunakan.



Gambar 3 Diagram Blok Sistem Alat



Gambar 4 Alur Kerja Sistem Alat

Sistem diawali dengan pembacaan nilai yang terdeteksi oleh sensor Gas MQ-135 kemudian data dikirimkan pada Arduino sebagai pengendali dan membaca data. Data yang telah diperoleh kemudian dikirimkan melalui ESP8266 melalui jaringan WiFi akan

terkoneksi melalui platform *website Thingspeak* yang kemudian data dapat dipantau secara jarak jauh. Gambar 3 menunjukkan diagram blok sistem. Alur kerja sistem keseluruhan dapat ditunjukkan pada Gambar 4.

Gambar 4. menjelaskan prosedur menjalankan sistem. Mikrokontroler untuk melakukan inisialisasi variabel data dari sensor nitrogen, kemudian membaca data digital yang dikonversi menjadi level kadar gas. Informasi level kadar gas akan ditampilkan pada *website Thingspeak* melalui jaringan internet maupun ditampilkan pada layer OLED secara waktu nyata.

### Kalibrasi Sensor

Sensor MQ-135 harus dilakukan kalibrasi untuk menentukan gas amonia (nilai PPM). Gas amonia ini yang selanjutnya dikonversi menjadi gas nitrogen dengan menentukan kadar unsur nitrogen yang terkandung dalam senyawa  $\text{NH}_3$ . Hal yang pertama yang perlu diketahui yaitu mencari spesifikasi dari MQ-135 melalui *datasheet* MQ-135. Persamaan 1 menjabarkan matematis nilai konversi PPM unsur gas amonia.

$$ppm = 10^{\left\{ \frac{[\log(\text{ratio}) - b]}{m} \right\}} \quad (1)$$

Dimana  $m$  dan  $b$  adalah hasil penentuan nilai titik tengah *datasheet*. Persamaan 2 menjabarkan koversi unsur ammonia ke unsur nitrogen.

$$N = 1xAr \frac{n}{Mr} x 100\% \quad (2)$$

Dimana  $Mr$  adalah kadar nitrogen sebesar 17 g/ml.

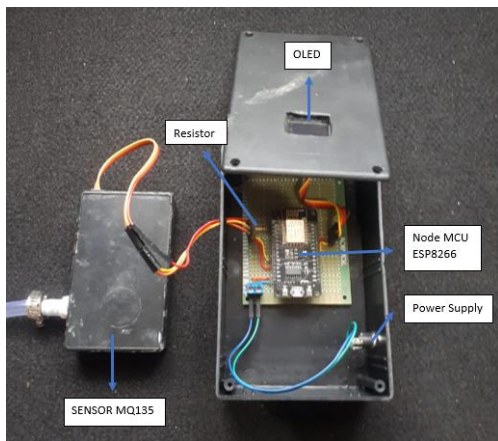
### HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian sistem ptototipe pemantau gas nitrogen dalam *digester* dilakukan dengan menempatkan prorotipe yang dihubungkan pada pipa keluaran *digester*. Pemberian ambang batas pada penelitian ini sebesar 20.000 ppm karena jika kadar melebihi nilai tersebut maka pupuk yang dihasilkan akan berdampak buruk pada tanaman.

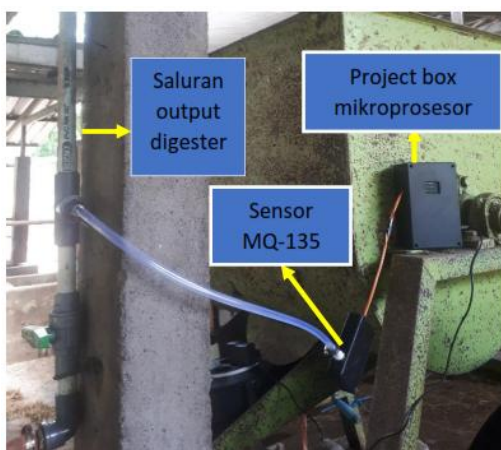
### Implementasi Prototipe

Penelitian *monitoring* gas nitrogen pada biogas berbasis IoT (*Internet of Things*) yang digunakan untuk mengukur kandungan nitrogen pada *digester*. Alat ini terdiri dari beberapa komponen utama yaitu sensor MQ 135, ESP8266, OLED dan adaptor. Komponen alat ini dirangkai menjadi satu didalam *project box* dengan ukuran 10x6 cm. Gambar 5 menunjukkan prototipe alat

pemantauan kadar gas nitrogen. Gambar 6 menunjukkan pemasangan prototipe pada *digester*.



**Gambar 5** Prototipe Pemantauan Kadar Gas Nitrogen

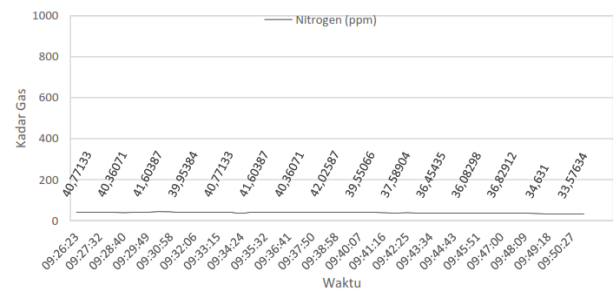


**Gambar 6** Pemasangan Prototipe pada Digester

Pada pemasangan prototipe pada digester membutuhkan material pipa paralon yang digunakan sebagai saluran biogas dari digester menuju ke perangkat dapur seperti kompor. Sensor gas dipasang pada pipa yang kemudian dapat membaca nilai kadar gas nitrogen.

### Hasil Kalibrasi Sensor

Proses kalibrasi dilakukan dengan menempatkan serangkaian sensor di ruang terbuka dengan melakukan pengondisian kandungan gas serta untuk mencegah perubahan kadar kandungan gas yang ekstrim, dan data disimpan setiap kali dibaca. Gambar 7 menunjukkan hasil pembacaan kalibrasi sensor dalam grafik.



**Gambar 7** Hasil Proses Kalibrasi Nilai Diruangan Terbuka

Gambar 7 menjelaskan perolehan hasil proses kalibrasi dengan menempatkan sensor diruangan terbuka guna mencari nilai rata-rata nitrogen pada udara bebas. Nilai rata-rata kadar nitrogen yang diperoleh pada udara bebas sebesar 38 ppm.

### Hasil Ukur Kadar Gas Nitrogen

Pengujian ini bertujuan mengetahui kandungan gas pada digester pada rentang waktu dini hari, pagi, siang dan malam hari. Tabel 1 hingga Tabel 4 menunjukkan hasil pembacaan kadar gas nitrogen pada digester.

**Tabel 1** Kadar Gas Nitrogen Dini Hari

| Tanggal/Jam          | N2 (ppm) |
|----------------------|----------|
| 25 Mei 2023/01:00:00 | 4041,965 |
| 25 Mei 2023/02:00:00 | 3923,023 |
| 25 Mei 2023/03:00:00 | 3923,023 |
| 25 Mei 2023/04:00:00 | 3923,023 |
| 25 Mei 2023/05:00:00 | 3865,189 |
| 25 Mei 2023/06:00:00 | 3697,934 |

Tabel 1 menunjukkan bahwa kadar nitrogen mencapai puncaknya pada dini hari, tepatnya pukul 01:00, dengan nilai sebesar 4041,965 ppm, sementara kadar nitrogen terendah tercatat pada pukul 06:00 dengan nilai sebesar 3697,934 ppm. Data ini mencerminkan pola fluktuasi yang signifikan selama periode malam hingga pagi hari.

**Tabel 2** Kadar Gas Nitrogen Pagi Hari

| Tanggal/Jam          | N2 (ppm) |
|----------------------|----------|
| 25 Mei 2023/07:00:00 | 3697,934 |
| 25 Mei 2023/08:00:00 | 3644,19  |
| 25 Mei 2023/09:00:00 | 3539,58  |
| 25 Mei 2023/10:00:00 | 3488,67  |
| 25 Mei 2023/11:00:00 | 3389,547 |
| 25 Mei 2023/12:00:00 | 3389,547 |

Selanjutnya, Tabel 2 menyajikan kadar nitrogen di pagi hari, yakni pada saat *digester* mulai diisi kembali dengan kotoran sapi segar. Proses pengisian ini menyebabkan kadar nitrogen dalam *digester*

mengalami penurunan karena kotoran lama yang telah menghasilkan gas digantikan dengan kotoran baru. Pada periode ini, kadar nitrogen tertinggi terjadi pada pukul 07:00 dengan nilai 3697,934 ppm, sedangkan kadar terendah tercatat pada pukul 12:00 sebesar 3389,547 ppm.

**Tabel 3** Kadar Gas Nitrogen Siang Hari

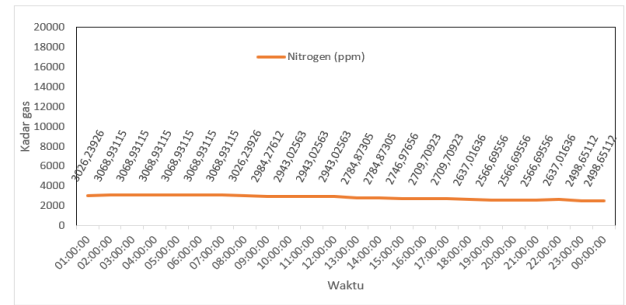
| Tanggal/Jam          | N2 (ppm) |
|----------------------|----------|
| 25 Mei 2023/13:00:00 | 3389,547 |
| 25 Mei 2023/14:00:00 | 3112,368 |
| 25 Mei 2023/15:00:00 | 3068,931 |
| 25 Mei 2023/16:00:00 | 2943,026 |
| 25 Mei 2023/17:00:00 | 2943,026 |
| 25 Mei 2023/12:00:00 | 3389,547 |

Tabel 3 menggambarkan kadar nitrogen pada siang hari, dimana nilai tertinggi ditemukan pada pukul 13:00 dengan kadar sebesar 3389,547 ppm. Setelah itu, kadar nitrogen terus mengalami penurunan secara bertahap hingga mencapai nilai terendah pada pukul 18:00, yakni sebesar 2746,977 ppm. Penurunan kadar nitrogen pada siang hari ini diduga kuat dipengaruhi oleh proses pengisian kotoran yang dilakukan pada pagi hari, yang mengubah komposisi gas dalam *digester*.

**Tabel 4** Kadar Gas Nitrogen Malam Hari

| Tanggal/Jam          | N2 (ppm) |
|----------------------|----------|
| 25 Mei 2023/19:00:00 | 2532,394 |
| 25 Mei 2023/20:00:00 | 2746,977 |
| 25 Mei 2023/21:00:00 | 2823,413 |
| 25 Mei 2023/22:00:00 | 2862,608 |
| 25 Mei 2023/23:00:00 | 2943,026 |
| 25 Mei 2023/00:00:00 | 2943,026 |

Pada Tabel 4, pengujian dilakukan pada malam hari, dengan kadar nitrogen terendah ditemukan pada pukul 19:00 sebesar 2532,394 ppm. Seiring berjalannya waktu, kadar gas nitrogen dalam *digester* mulai mengalami peningkatan, hingga akhirnya mencapai puncaknya pada pukul 00:00 dengan kadar sebesar 2943,026 ppm. Kenaikan ini kemungkinan besar disebabkan oleh proses alami yang terjadi dalam *digester*, di mana kotoran yang telah dimasukkan mulai menghasilkan gas secara bertahap.

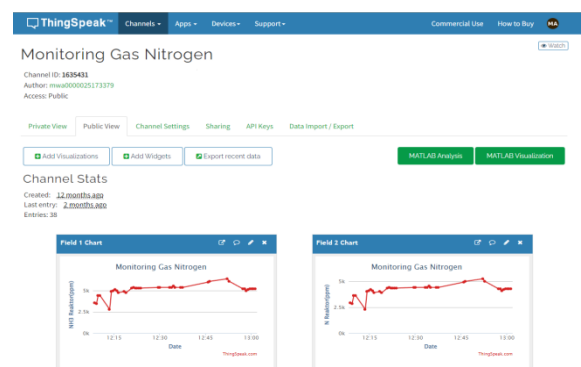


**Gambar 8** Grafik Rata-Rata Hasil Ukur di Empat Rentang Waktu

Hasil pengujian gas nitrogen hari kedua terlihat pada Gambar 8 bahwa kandungan nilai akan mencapai kadar maksimal saat dini hari dan mencapai kadar gas nitrogen minimal terjadi saat pagi hari setelah pengisian *digester* secara berkala setiap harinya. Lamanya waktu fermentasi juga akan mempengaruhi kadar gas nitrogen yang diperoleh pada biogas yang terdapat pada digeser. Berdasarkan Peraturan Menteri Pertanian No.28 / Permentan / OT.140 / 2 / 2009, hasil penelitian menunjukkan bahwa kandungan gas nitrogen dari biogas sebesar 2% atau 20.000 bagian per juta (ppm).

### Pengamatan pada OLED dan aplikasi *Thingspeak*

Hasil ukur yang diperoleh melalui sensor dapat divisualisasikan pada aplikasi aplikasi *Thingspeak* dan OLED yang masing-masing ditunjukkan pada Gambar 9 dan Gambar 10.



**Gambar 9** Visualisasi Pembacaan Sensor pada Aplikasi *Thingspeak*



**Gambar 10** Visualisasi pembacaan Sensor pada OLED

Gambar 9 menunjukkan hasil pembacaan nilai data sensor yang dikirimkan keaplikasi melalui jaringan internet. Adapun tampilan aplikasi *Thinkspeak* yaitu berupa grafik kadar gas nitrogen yang sudah terdeteksi oleh sensor. Nilai yang ditampilkan pada aplikasi *Thinkspeak* didapat dari nilai kandungan gas nitrogen serta ammonia sensor MQ-135.

## KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pemantauan yang dilakukan terhadap kadar gas nitrogen pada *digester* di Peternakan Adi Makmur Sejahtera, yang berlokasi di Moyudan, Kabupaten Sleman, Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta, didapatkan hasil bahwa kadar gas nitrogen dalam biogas tidak melebihi ambang batas 20.000 ppm. Hasil ini sesuai dengan standar yang telah ditetapkan, yaitu kadar nitrogen berada dalam rentang 2% hingga 5%, atau setara dengan 20.000 ppm. Dengan demikian, biogas yang dihasilkan oleh *digester* di peternakan tersebut dapat dinyatakan memenuhi kriteria yang telah ditentukan dalam standar tersebut dan layak untuk digunakan sesuai peruntukannya.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini dapat dilaksanakan dengan baik berkat bantuan hibah penelitian internal UAD dengan Nomor: PIPP-296/SP3/LPPM-UAD/VI/2021.

## DAFTAR PUSTAKA

Alfanz, R., Nurhadi, A., & Laksmo, J. A. (2016). Perancangan dan Implementasi Sistem Monitoring Produksi Biogas pada Biodigester. *Jurnal Nasional Teknik Elektro*, 5(1), 2–8. <https://doi.org/10.20449/jnte.v5i1.216>

Arifin, I., Baqaruzi, S., & Zoro, R. (2024). Analisis Sistem Kendali Dua Posisi Pada Solenoid Valve Untuk Produk Biogas Control and Monitoring (Common-Bigot) From Animal Waste. *Injection: Indonesian Journal of Vocational Mechanical Engineering*, 1(2), 47–57. <https://doi.org/10.58466/injection.v1i2.1385>

Atelge, M. R., Krisa, D., Kumar, G., Eskicioglu, C., Nguyen, D. D., Chang, S. W., Atabani, A. E., Al-Muhtaseb, A. H., & Unalan, S. (2020). Biogas Production from Organic Waste: Recent Progress and Perspectives. *Waste and Biomass Valorization*, 11(3), 1019–1040. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-00546-0>

Budiman, I. (2021). The complexity of barriers to biogas digester dissemination in Indonesia: challenges for agriculture waste management. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 23(5), 1918–1929. <https://doi.org/10.1007/s10163-021-01263-y>

Erfiani, M., Priyanti, I., Manurung, M., Yuliana, D., & Ramadhan, M. F. (2023). Rancang Bangun Reaktor

Biogas Portable Menggunakan Limbah Sampah Organik Dan Starter Kotoran Sapi. *Jurnal Teknologi Lingkungan Lahan Basah*, 11(2), 365. <https://doi.org/10.26418/jtlb.v11i2.66011>

Ismangil, A., Adiguna, G., & Harsani, P. (2023). Prototipe Kontrol Biogas Pada Kotoran Sapi Berbasis Internet of Things (IoT). *Instrumentasi*, 47(1), 55. <https://doi.org/10.31153/instrumentasi.v47i1.302>

Obileke, K., Mamphweli, S., Meyer, E. L., Makaka, G., & Nwokolo, N. (2020). Design and Fabrication of a Plastic Biogas Digester for the Production of Biogas from Cow Dung. *Journal of Engineering*, 2020, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2020/1848714>

Prasetya, H. E. G., Amalia, R., Azisa, A. F. B., Fitri, A. L., & Jibrin, M. R. (2022). Rancang Bangun Smart Biogas Plant Menggunakan Teknologi Internet of Things (IoT). *Suara Teknik : Jurnal Ilmiah*, 13(2), 5. <https://doi.org/10.29406/stek.v13i2.4864>

Pratiwi, I., Permatasari, R., & Homza, O. F. (2019). Pemanfaatan Limbah Kotoran Ternak Sapi dengan Reaktor Biogas di Kabupaten Ogan Ilir. *Ikraith-Abdimas*, 2(3), 1–10. <https://doi.org/https://doi.org/10.37817/ikraith%20abdimas.v2i3.569>

Rafiee, A., Khalilpour, K. R., Prest, J., & Skryabin, I. (2021). Biogas as an energy vector. *Biomass and Bioenergy*, 144, 0–72. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105935>

Sadi, S., Mulyati, S., & Setiawan, P. B. (2022). Internet of Things Pada Sistem Monitoring Kualitas Udara Menggunakan Web Server. *Formosa Journal of Multidisciplinary Research*, 1(4), 1085–1094. <https://doi.org/10.55927/fjmr.v1i4.679>

Silva Neto, J. V., & Gallo, W. L. R. (2021). Potential impacts of vinasse biogas replacing fossil oil for power generation, natural gas, and increasing sugarcane energy in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110281. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110281>

Singh, B., Szamosi, Z., & Siménfalvi, Z. (2019). State of the art on mixing in an anaerobic digester: A review. *Renewable Energy*, 141, 922–936. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.072>

Soebagia, H., Notosudjono, D., & Bachaki, K. (2021). Analisis Peningkatan Gas Metana (CH<sub>4</sub>) Pada Digester Portabel Dengan Kotoran Sapi Sebagai Sumber Energi Biogas Berbasis Internet of Things (IoT). *Jurnal Teknik | Majalah Ilmiah Fakultas Teknik UNPAK*, 22(1), 19–26. <https://doi.org/10.33751/teknik.v22i1.3734>

Sulistiyan, S., & Mawardi, I. (2024). Portable Smart Biogas Digester Using Pressure Sensor and Safety Valve Based on Internet of Things. *Journal of Electrical Engineering and Computer (JEECOM)*, 6(1), 243–251. <https://doi.org/10.33650/jeeecom.v6i1.8540>