



Research Articles

Rancang Bangun Sistem Kontrol dan Monitoring Tekanan Gas Pada Biodigester Berbasis IoT: Analisis Waktu dan Stabilitas Koneksi ESP32 dan ESP32-S3 (Lilygo T Display S3)

Design and Development of a Control and Monitoring System for Gas Pressure in a Biogas Digester Based on IoT: Analysis of Connection Time and Stability of ESP32 and ESP32-S3 (Lilygo T Display S3)

Oki Saputra*, Fakhrul Irfan Khalil, Ida Ayu Widhiantari

Fakultas Teknologi Pangan dan Agroindustri, UNRAM, Nusa Tenggara Barat, INDONESIA.

Tel. (0370) 649879

*corresponding author, email: oki.saputra@unram.ac.id

Manuscript received: 30-11-2024. Accepted: 15-12-2024

ABSTRAK

Penelitian ini mengkaji kebutuhan yang semakin meningkat terhadap sistem pemantauan tekanan gas yang efisien pada biodigester, yang berperan penting dalam proses produksi energi terbarukan. Tujuan utama studi ini adalah merancang dan mengembangkan sistem kontrol serta pemantauan berbasis Internet of Things (IoT) menggunakan mikrokontroler ESP32 dan ESP32-S3 (Lilygo T Display S3). Analisis dilakukan untuk mengevaluasi durasi dan stabilitas koneksi dari kedua mikrokontroler, dengan fokus pada waktu untuk membangun koneksi WiFi dan koneksi ke Arduino IoT Cloud. Hasil menunjukkan bahwa ESP32 mencapai waktu awal koneksi WiFi sekitar 10 detik, dengan total durasi koneksi berkisar antara 1 menit 3 detik hingga 1 menit 36 detik, sedangkan ESP32-S3 mengalami kendala dalam menjaga konektivitas yang stabil, menghasilkan total waktu koneksi antara 1 menit 7 detik hingga 1 menit 21 detik karena masalah validasi sertifikat. Temuan ini menekankan pentingnya pemilihan mikrokontroler yang tepat dalam mengoptimalkan aplikasi IoT untuk sistem pemantauan tekanan gas pada biodigester, memberikan wawasan bagi pengembang dan peneliti untuk meningkatkan efisiensi serta keandalan teknologi energi terbarukan.

Kata kunci: IoT, pemantauan tekanan gas, biodigester, ESP32, ESP32-S3, analisis konektivitas, teknologi energi terbarukan.

ABSTRACT

This study explores the increasing demand for efficient gas pressure monitoring systems in biodigesters, which play a crucial role in renewable energy production. The primary objective of this research is to design and develop a control and monitoring system based on the Internet of Things (IoT) utilizing the ESP32 and ESP32-S3 (Lilygo T Display S3) microcontrollers. An analysis was conducted to assess the connection duration and stability of both microcontrollers, focusing on the time required to establish a WiFi connection and connect to the Arduino IoT Cloud. The results indicate that the ESP32 achieves an initial WiFi connection time of approximately 10 seconds, with total connection durations ranging

from 1 minute 3 seconds to 1 minute 36 seconds, while the ESP32-S3 encounters challenges in maintaining stable connectivity, resulting in total connection times between 1 minute 7 seconds and 1 minute 21 seconds due to certificate validation issues. These findings underscore the importance of selecting the appropriate microcontroller to optimize IoT applications for gas pressure monitoring systems in biodigesters, providing insights for developers and researchers to enhance the efficiency and reliability of renewable energy technologies.

Keywords: IoT, gas pressure monitoring, biodigester, ESP32, ESP32-S3, connectivity analysis, renewable energy technology.

PENDAHULUAN

Dalam konteks pemanasan global dan krisis energi yang semakin meningkat, transisi menuju sumber energi terbarukan menjadi semakin mendesak. Sumber energi terbarukan, khususnya biogas yang dihasilkan dari proses anaerobik dalam biodigester, menawarkan solusi yang ramah lingkungan dan berkelanjutan. Biogas tidak hanya berfungsi sebagai alternatif bahan bakar fosil, tetapi juga berkontribusi pada pengurangan emisi gas rumah kaca serta pengelolaan limbah organik (Ilangovan et al., 2023; Nevzorova & Kutcherov, 2019; Robinson et al., 2023). Proses anaerobik yang efisien dalam produksi biogas sangat bergantung pada sejumlah parameter operasional, termasuk tekanan gas, suhu, pH, dan rasio C/N (karbon terhadap nitrogen), yang harus dipantau secara cermat untuk memastikan optimalisasi produksi (Jiang et al., 2024; Wei et al., 2023).

Teknologi Internet of Things (IoT) telah membawa revolusi dalam pengelolaan sistem energi terbarukan dengan memungkinkan pemantauan dan kontrol secara real-time. Penggunaan IoT dalam sistem biodigester memberikan banyak keuntungan, termasuk pemantauan jarak jauh, pengumpulan data yang lebih baik, dan pengambilan keputusan yang lebih cepat (Acharya et al., 2018; Hudda et al., 2024; Rekeraho et al., 2024). Dalam konteks ini, pengukuran tekanan gas menjadi sangat penting, karena tekanan yang terlalu rendah dapat mengindikasikan masalah dalam proses anaerobik, sedangkan tekanan yang terlalu tinggi dapat menyebabkan kerusakan pada sistem. Menurut penelitian oleh Sánchez et al. (2021), pengelolaan tekanan gas yang tepat dapat meningkatkan efisiensi konversi biomassa (Silmi et al., 2017).

Mikrokontroler ESP32 dan ESP32-S3 dipilih dalam penelitian ini karena kemampuan komunikasi yang canggih dan efisiensi energi yang tinggi, yang sangat krusial dalam aplikasi IoT. ESP32 dikenal luas karena dukungannya terhadap berbagai protokol komunikasi nirkabel dan kemampuannya dalam menangani aplikasi dengan daya rendah. Sementara itu, ESP32-S3, sebagai versi terbaru, menambahkan kemampuan pemrosesan yang lebih baik dan dukungan untuk kecerdasan buatan, sehingga memberikan peluang baru dalam pengembangan aplikasi IoT yang lebih kompleks (Anshori et al., 2022; Espressif Systems, 2023b, 2023a). Kelebihan ini sangat relevan dalam konteks biodigester, di mana diperlukan pengolahan data secara real-time untuk menganalisis kondisi sistem dan mengambil tindakan yang diperlukan.

Parameter yang akan diukur dalam penelitian ini mencakup:

1. **Waktu Koneksi WiFi Mulai dan Selesai:** Parameter ini sangat penting untuk menilai latensi yang terkait dengan komunikasi nirkabel. Latensi yang tinggi dapat

menyebabkan keterlambatan dalam pemantauan data, yang dalam skenario kritis dapat berpengaruh pada keputusan yang diambil (Green et al., 2021).

2. **Durasi Koneksi WiFi:** Durasi koneksi WiFi memberikan gambaran mengenai stabilitas jaringan yang digunakan. Jaringan yang tidak stabil dapat menyebabkan hilangnya data dan mengganggu proses pemantauan (Kong et al., 2013).
3. **Waktu Koneksi IoT Cloud Mulai dan Selesai:** Pengukuran ini penting untuk mengevaluasi waktu yang dibutuhkan untuk mengirimkan data dari perangkat ke server cloud. Proses pengiriman yang lambat dapat mengakibatkan ketidaksesuaian informasi dan mempengaruhi respons system (Izaddoost & Siewierski, 2020).
4. **Durasi Koneksi IoT Cloud:** Merupakan parameter untuk membantu menilai kecepatan pemrosesan data setelah dikirim ke cloud, yang merupakan kunci dalam sistem IoT yang efektif.
5. **Total Durasi Koneksi:** Menghitung total durasi dari semua aspek konektivitas memberikan wawasan mengenai efektivitas sistem secara keseluruhan, yang esensial untuk pengambilan keputusan yang cepat dan tepat.

Untuk analisis data, rumus yang digunakan dalam penelitian ini mencakup:

- **Durasi Koneksi WiFi dan Durasi Koneksi IoT Cloud** dapat dihitung menggunakan rumus:

$$\text{Durasi} = \text{Waktu Selesai} - \text{Waktu Mulai}$$

- **Total Durasi Koneksi** dapat dihitung dengan menjumlahkan semua durasi koneksi:

$$\text{Total Durasi} = \text{Durasi Koneksi Wifi} + \text{Durasi Koneksi IoT Cloud}$$

Dalam penelitian ini, metode analisis yang diterapkan mencakup pengukuran waktu dan stabilitas koneksi, serta evaluasi efisiensi operasional sistem monitoring. Analisis ini akan menggunakan pendekatan kuantitatif untuk mendapatkan data yang akurat, serta membandingkan performa kedua jenis mikrokontroler dalam konteks aplikasi IoT. Teori komunikasi yang akan diterapkan mencakup teori Shannon-Hartley, yang menjelaskan batas kapasitas saluran komunikasi dan pentingnya bandwidth dalam konteks transmisi data (Shannon, 1948). Rumus kapasitas saluran(kanal) Shannon-Hartley dinyatakan sebagai: (Rioul & Magossi, 2014)

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$

di mana:

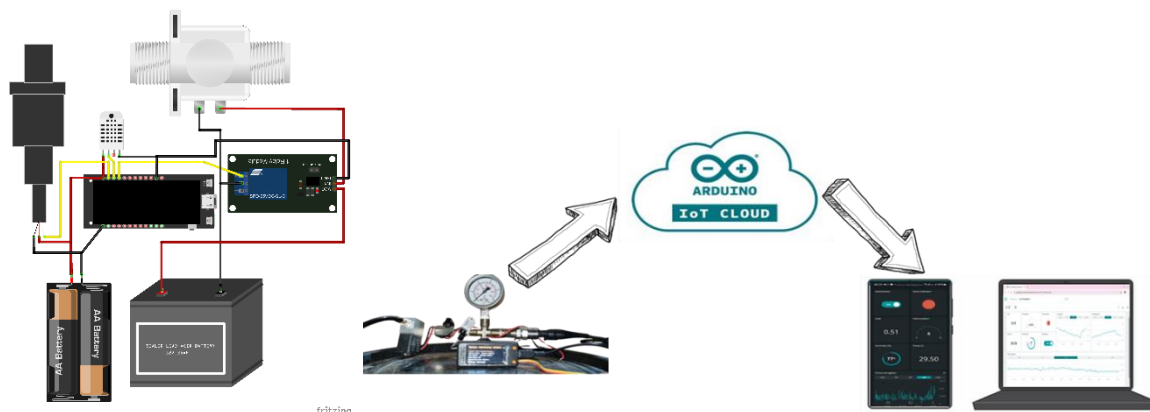
- C adalah kapasitas kanal dalam bit per detik,
- B adalah bandwidth kanal dalam Hertz,
- S adalah daya sinyal,
- N adalah daya noise.

Dengan memahami interaksi antara berbagai parameter ini, penelitian ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi yang berharga untuk pengembangan sistem monitoring yang lebih efektif dan efisien dalam konteks energi terbarukan, khususnya pada teknologi biodigester. Hasil dari penelitian ini tidak hanya akan berkontribusi pada bidang penelitian energi terbarukan, tetapi juga akan memberikan wawasan baru bagi pengembang dan peneliti yang berusaha meningkatkan efisiensi dan keandalan teknologi IoT dalam pengelolaan sumber daya energi.

BAHAN DAN METODE

Penelitian ini menggunakan beberapa bahan dan komponen penting untuk membangun sistem monitoring tekanan gas pada biodigester berbasis IoT. Bahan-bahan yang digunakan meliputi:

1. **Mikrokontroler ESP32 dan ESP32-S3:** Kedua mikrokontroler ini digunakan dalam penelitian untuk dibandingkan kinerjanya. ESP32 dipilih karena kemampuannya dalam mendukung konektivitas WiFi dan komputasi yang efisien, sedangkan ESP32-S3, yang lebih baru, menawarkan performa yang lebih baik dengan fitur tambahan seperti dukungan AI dan pemrosesan yang lebih cepat.
2. **Sensor Tekanan Gas:** Sensor yang digunakan untuk mengukur tekanan gas yang dihasilkan oleh biodigester. Sensor ini harus memiliki akurasi dan rentang pengukuran yang sesuai untuk memastikan data yang akurat.
3. **Arduino IoT Cloud:** Platform cloud yang digunakan untuk menyimpan dan memproses data dari mikrokontroler. Arduino IoT Cloud memungkinkan pengguna untuk memvisualisasikan data dan melakukan pengendalian jarak jauh secara real-time. Platform ini juga menyediakan antarmuka yang ramah pengguna untuk memantau data dari berbagai perangkat IoT.
4. **Komponen Elektronik Pendukung:** Termasuk resistor, kapasitor, dan breadboard untuk penyambungan sirkuit.



Gambar 1 Diagram Skematik Sistem Kontrol dan Monitoring Biogas

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam konteks pengembangan aplikasi Internet of Things (IoT), evaluasi performa mikrokontroler terkait dengan konektivitas nirkabel merupakan aspek fundamental yang berpengaruh langsung terhadap efektivitas sistem berbasis cloud. Penelitian ini menganalisis dua mikrokontroler yang banyak digunakan, yaitu ESP32 dan ESP32-S3 (Lilygo T Display S3), dengan fokus pada waktu koneksi serta stabilitas integrasi mereka dengan Arduino IoT Cloud. Tujuan utama dari studi ini adalah untuk membandingkan durasi koneksi WiFi dan proses sinkronisasi dengan platform cloud, sambil menganalisis berbagai faktor yang mempengaruhi variabilitas kinerja. Hasil pengujian mengungkapkan bahwa meskipun kedua mikrokontroler menunjukkan konsistensi waktu koneksi WiFi yang relatif serupa, terdapat perbedaan signifikan dalam durasi koneksi ke Arduino IoT Cloud, serta munculnya masalah tambahan terkait sertifikat pada ESP32-S3 (pengujian dilakukan sebelum sertifikat ESP32-S3 terdaftar di Arduino IoT Cloud). Pembahasan ini akan memberikan analisis mendalam mengenai temuan tersebut, mengevaluasi faktor-faktor yang mempengaruhi kinerja, serta menyajikan rekomendasi yang relevan untuk pengembangan dan pemilihan mikrokontroler dalam aplikasi IoT yang memerlukan konektivitas yang stabil dan efisien. Berikut merupakan tabel hasil uji waktu yang dibutuhkan untuk terkoneksi ke jaringan WiFi dan IoT Cloud:

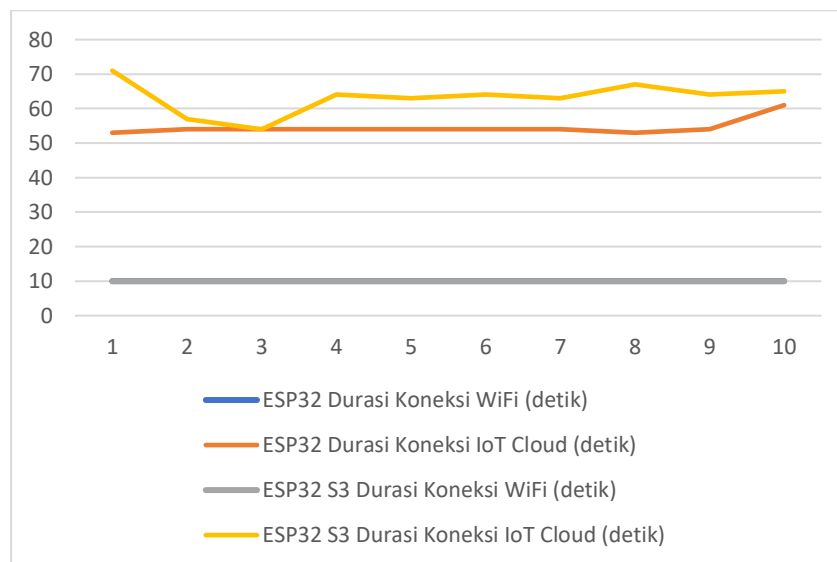
Tabel 1 Durasi Koneksi WiFi dan IoT Cloud pada Setiap Percobaan untuk Mikrokontroler ESP32

Percobaan	Waktu Koneksi WiFi Mulai	Waktu Koneksi WiFi Selesai	Durasi Koneksi WiFi	Waktu Koneksi IoT Cloud Mulai	Waktu Koneksi IoT Cloud Selesai	Durasi Koneksi IoT Cloud	Total Durasi
1	13:29:50	13:30:00	10 detik	13:30:00	13:30:53	53 detik	1 menit 3 detik
2	13:37:39	13:37:49	10 detik	13:37:49	13:38:43	54 detik	1 menit 4 detik
3	14:03:44	14:03:54	10 detik	14:03:54	14:04:48	54 detik	1 menit 4 detik
4	14:05:07	14:05:17	10 detik	14:05:17	14:06:11	54 detik	1 menit 4 detik
5	14:13:41	14:13:51	10 detik	14:13:51	14:14:45	54 detik	1 menit 4 detik
6	14:15:15	14:15:25	10 detik	14:15:25	14:16:19	54 detik	1 menit 4 detik
7	14:16:36	14:16:46	10 detik	14:16:46	14:17:40	54 detik	1 menit 4 detik
8	14:18:39	14:18:49	10 detik	14:18:49	14:19:42	53 detik	1 menit 3 detik
9	14:20:15	14:20:25	10 detik	14:20:25	14:21:19	54 detik	1 menit 4 detik
10	14:21:43	14:21:53	10 detik	14:21:53	14:23:19	55 detik	1 menit 5 detik

Tabel 2 Durasi Koneksi WiFi dan IoT Cloud pada Setiap Percobaan untuk Mikrokontroler ESP32-S3 (Lilygo T Display S3)

Percobaan	Waktu Koneksi WiFi Mulai	Waktu Koneksi WiFi Selesai	Durasi Koneksi WiFi	Waktu Koneksi IoT Cloud Mulai	Waktu Koneksi IoT Cloud Selesai	Durasi Koneksi IoT Cloud	Total Durasi
1	20:06:18	20:06:28	10 detik	20:06:28	20:07:39	1 menit 11 detik	1 menit 21 detik
2	20:09:26	20:09:36	10 detik	20:09:36	20:10:33	57 detik	1 menit 7 detik
3	20:12:33	20:12:43	10 detik	20:12:43	20:13:37	54 detik	1 menit 4 detik
4	20:16:18	20:16:28	10 detik	20:16:28	20:17:32	1 menit 4 detik	1 menit 14 detik
5	20:22:38	20:22:48	10 detik	20:22:48	20:23:51	1 menit 3 detik	1 menit 13 detik
6	20:24:08	20:24:18	10 detik	20:24:18	20:25:22	1 menit 4 detik	1 menit 14 detik
7	20:26:51	20:27:01	10 detik	20:27:01	20:28:04	1 menit 3 detik	1 menit 13 detik
8	20:29:46	20:29:56	10 detik	20:29:56	20:31:03	1 menit 7 detik	1 menit 17 detik
9	20:45:42	20:45:52	10 detik	20:45:52	20:46:56	1 menit 4 detik	1 menit 14 detik
10	20:47:31	20:47:41	10 detik	20:47:41	20:48:46	1 menit 5 detik	1 menit 15 detik

Analisis Kinerja Koneksi WiFi dan IoT Cloud: ESP32 vs. ESP32-S3



Gambar 2 Perbandingan kinerja ESP32 dan ESP32S3 (Lilygo T Display S3)

Dalam pengujian kinerja mikrokontroler ESP32, waktu koneksi WiFi rata-rata yang dibutuhkan adalah sekitar 10 detik setelah beberapa kali percobaan. Setelah terhubung ke WiFi, durasi tambahan yang diperlukan untuk koneksi ke Arduino IoT Cloud berkisar antara 53

hingga 54 detik, dengan total durasi rata-rata mencapai sekitar 1 menit 4 detik per percobaan. Namun, pada percobaan terakhir, total durasi meningkat menjadi 1 menit 36 detik, menunjukkan adanya variabilitas dalam waktu koneksi ke IoT Cloud.

Sebaliknya, pada pengujian ESP32-S3 (Lilygo T Display S3), waktu koneksi WiFi yang diperoleh juga konsisten sekitar 10 detik. Meskipun demikian, durasi koneksi ke Arduino IoT Cloud pada ESP32-S3 menunjukkan variabilitas yang lebih besar dibandingkan dengan ESP32, dengan waktu yang diperlukan berkisar antara 54 detik hingga 1 menit 11 detik, dan total durasi rata-rata sekitar 1 menit 14 detik. Masalah tambahan yang dihadapi oleh ESP32-S3 adalah kesalahan sertifikat yang tidak valid, yang berpotensi mempengaruhi stabilitas koneksi.

ESP32-S3, yang digunakan dalam varian Lilygo T Display S3, adalah mikrokontroler yang relatif baru di pasaran. Keberadaan fitur-fitur baru dan peningkatan kemampuan pada mikrokontroler ini dapat berkontribusi pada masalah yang ditemukan, termasuk kesalahan sertifikat. Kesalahan ini mungkin disebabkan oleh ketidakcocokan atau konfigurasi sertifikat digital yang tidak sesuai dengan standar yang diterima oleh platform Arduino IoT Cloud. Sebagai mikrokontroler terbaru, ESP32-S3 mungkin menghadapi tantangan dalam penyesuaian dan kompatibilitas dengan sistem yang ada, yang dapat mempengaruhi kestabilan dan waktu koneksi.

Perbandingan Koneksi WiFi dan Arduino IoT Cloud: ESP32 vs. ESP32-S3

Pengujian yang dilakukan bertujuan untuk membandingkan kinerja koneksi WiFi dan Arduino IoT Cloud antara mikrokontroler ESP32 dan ESP32-S3 menghasilkan temuan signifikan dalam hal durasi dan stabilitas koneksi. Teori dasar mengenai koneksi nirkabel dan waktu respons dalam jaringan Internet of Things (IoT) dapat memberikan informasi tambahan mengenai hasil yang diperoleh.

Menurut teori jaringan nirkabel, waktu koneksi WiFi dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk kekuatan sinyal, interferensi jaringan, dan algoritma yang digunakan oleh mikrokontroler WiFi untuk asosiasi dan otentikasi dengan titik akses (AP). Standar IEEE 802.11 mengatur prosedur koneksi WiFi yang mencakup beberapa tahap, termasuk pemindaian, autentikasi, asosiasi, dan konfigurasi IP. Dalam pengujian ini, baik ESP32 maupun ESP32-S3 menunjukkan waktu koneksi WiFi yang konsisten, rata-rata sekitar 10 detik. Durasi ini sesuai dengan teori yang menyatakan bahwa proses pemindaian dan asosiasi dapat memakan waktu beberapa detik tergantung pada kondisi lingkungan jaringan.

Koneksi ke Arduino IoT Cloud

Koneksi ke platform cloud, seperti Arduino IoT Cloud, melibatkan lebih dari sekadar koneksi WiFi. Proses ini mencakup resolusi DNS, inisiasi koneksi TCP/IP, dan pembentukan sesi MQTT (Message Queuing Telemetry Transport). MQTT adalah protokol ringan yang sering digunakan dalam aplikasi IoT karena efisiensinya dalam kondisi jaringan yang tidak stabil. Dalam konteks ini, ESP32 menunjukkan durasi koneksi ke Arduino IoT Cloud yang relatif stabil, dengan rata-rata waktu sekitar 53 hingga 54 detik setelah terhubung ke WiFi. Sebaliknya, ESP32-S3 menunjukkan variabilitas yang lebih besar dalam durasi koneksi,

berkisar antara 54 detik hingga 1 menit 11 detik. Variabilitas ini mungkin disebabkan oleh beberapa faktor, termasuk perbedaan dalam implementasi firmware, beban server cloud, dan kemungkinan kesalahan sertifikat digital yang sering terjadi pada ESP32-S3.

Kesalahan Sertifikat pada ESP32-S3

ESP32-S3 sering mengalami masalah terkait sertifikat digital yang tidak valid. Dalam konteks protokol keamanan TLS (Transport Layer Security), sertifikat digital digunakan untuk mengamankan komunikasi antara perangkat dan server. Sertifikat ini berfungsi untuk memastikan bahwa komunikasi antara mikrokontroler dan server cloud adalah aman dan terenkripsi. Kesalahan sertifikat digital dapat terjadi karena beberapa alasan, termasuk sertifikat yang sudah kadaluarsa, ketidakcocokan antara sertifikat yang digunakan oleh mikrokontroler dan server, atau masalah dalam penyimpanan dan manajemen sertifikat pada perangkat. Kesalahan ini dapat mempengaruhi stabilitas dan waktu koneksi ke server cloud, sebagaimana terlihat dalam hasil pengujian ESP32-S3. Mengingat bahwa ESP32-S3 adalah mikrokontroler terbaru, kemungkinan adanya ketidakcocokan atau kesalahan konfigurasi sertifikat digital mungkin lebih tinggi, yang dapat mempengaruhi performa koneksi secara keseluruhan.

KESIMPULAN

Penelitian ini telah melakukan evaluasi kinerja koneksi nirkabel antara mikrokontroler ESP32 dan ESP32-S3 dalam konteks aplikasi Internet of Things (IoT). Hasil penelitian menunjukkan bahwa waktu koneksi WiFi untuk kedua mikrokontroler tersebut relatif konsisten, dengan rata-rata waktu sekitar 10 detik. Namun, dalam pengujian koneksi ke Arduino IoT Cloud, mikrokontroler ESP32 menunjukkan kestabilan yang lebih baik dengan durasi koneksi rata-rata berkisar antara 53 hingga 54 detik. Sebaliknya, mikrokontroler ESP32-S3 menunjukkan variabilitas yang lebih signifikan, dengan waktu koneksi yang bervariasi antara 54 detik hingga 1 menit 11 detik. Ditemukan pula bahwa permasalahan sertifikat digital yang tidak valid pada ESP32-S3 berpotensi memengaruhi stabilitas koneksi.

Berdasarkan temuan tersebut, disarankan agar pemilihan mikrokontroler untuk aplikasi yang memerlukan konektivitas yang stabil lebih diarahkan kepada ESP32. Peningkatan firmware pada ESP32-S3 sangat diperlukan untuk mengatasi permasalahan terkait sertifikat digital, serta pengujian lebih lanjut di berbagai kondisi jaringan diharapkan dapat memberikan wawasan yang lebih mendalam mengenai kinerja koneksi. Selain itu, penyediaan dokumentasi yang lebih komprehensif mengenai konfigurasi sertifikat digital dapat membantu pengguna dalam mengatasi masalah yang mungkin timbul. Terakhir, eksplorasi lebih lanjut terhadap fitur-fitur baru yang ditawarkan oleh ESP32-S3 dianjurkan untuk memaksimalkan potensi penggunaannya dalam aplikasi IoT.

DAFTAR PUSTAKA

- Acharya, V., Hegde, V. V., Anjan, K., & Manoj Kumar, M. (2018, August 27). IoT (Internet of Things) Based Efficiency Monitoring System for Bio-Gas Plants. *2nd International Conference on Computational Systems and Information Technology for Sustainable Solutions, CSITSS 2017*. <https://doi.org/10.1109/CSITSS.2017.8447567>

- Anshori, I., Mufiddin, G. F., Ramadhan, I. F., Ariasena, E., Harimurti, S., Yunkins, H., & Kurniawan, C. (2022). Design of smartphone-controlled low-cost potentiostat for cyclic voltammetry analysis based on ESP32 microcontroller. *Sensing and Bio-Sensing Research*, 36. <https://doi.org/10.1016/j.sbsr.2022.100490>
- Espressif Systems. (2023a). *ESP32 Technical Reference Manual*. <https://www.espressif.com/en/support/download/documents>.
- Espressif Systems. (2023b). *ESP32S2 Series Datasheet SoC with Xtensa® SingleCore 32bit LX7 Microprocessor Supporting IEEE 802.11b/g/n (2.4 GHz WiFi)*. <https://www.espressif.com/en/support/download/documents>.
- Green, M., Mann, D. D., & Hossain, E. (2021). Measurement of latency during real-time wireless video transmission for remote supervision of autonomous agricultural machines. *Computers and Electronics in Agriculture*, 190. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106475>
- Hudda, S., Haribabu, K., & Barnwal, R. (2024). Energy efficient data communication for WSN based resource constrained IoT devices. *Internet of Things (Netherlands)*, 27. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2024.101329>
- Ilangovan, P., Sharmila Begum, M., & Srividhya, P. K. (2023). Development of online monitoring device and performance evaluation of biogas plants using enhanced methane prediction algorithm (EMPA). *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 56. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103041>
- Izaddoost, A., & Siewierski, M. (2020). Energy efficient data transmission in IoT platforms. *Procedia Computer Science*, 175, 387–394. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.07.055>
- Jiang, Y., Zhang, Y., Li, H., Li, H., Yan, H., & Xing, S. (2024). Research on the Control System for the Use of Biogas Slurry as Fertilizer. *Agronomy*, 14(7). <https://doi.org/10.3390/agronomy14071439>
- Kong, L., Xia, M., Liu, X.-Y., Wu, M.-Y., & Liu, X. (2013). Data Loss and Reconstruction in Wireless Sensor Networks. In *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems* (Vol. 25). <https://doi.org/10.1109/INFCOM.2013.6566962>
- Nevezorova, T., & Kutcherov, V. (2019). Barriers to the wider implementation of biogas as a source of energy: A state-of-the-art review. *Energy Strategy Reviews*, 26, 100414. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100414>
- Rekeraho, A., Cotfas, D. T., Cotfas, P. A., Tuyishime, E., Balan, T. C., & Acheampong, R. (2024). Enhancing Security for IoT-Based Smart Renewable Energy Remote Monitoring Systems. *Electronics (Switzerland)*, 13(4). <https://doi.org/10.3390/electronics13040756>
- Rioul, O., & Magossi, J. C. (2014). On shannon's formula and Hartley's rule: Beyond the mathematical coincidence. *Entropy*, 16(9), 4892–4910. <https://doi.org/10.3390/e16094892>
- Robinson, B. L., Clifford, M. J., & Selby, G. (2023). Towards fair, just and equitable energy ecosystems through smart monitoring of household-scale biogas plants in Kenya. *Energy Research and Social Science*, 98. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2023.103007>
- Silmi, F. R., Kirom, M. R., & Qurthobi, A. (2017). Analysis of the Influence of Internal Pressure Control to the Total Gas Production in Anaerobic Digester. *Procedia Engineering*, 170, 467–472. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.075>
- Wei, S., Zhang, X., & Cheng, Q. (2023). The temperature and pressure Remote intelligent control system for biogas digester based on STM32. *SHS Web of Conferences*, 166, 01060. <https://doi.org/10.1051/shsconf/202316601060>