JOURNAL OF INSTRUMENTATION AND HARDWARE
ISSN: 3047-180X (Online)
Vol. 4 No. 1 (2026) 1 – 12
https://jih.akamigas.ac,.id/index.php/inhardware

INHARDWARE

Rancang Bangun Sistem Monitoring Hydrogen Fuel Cells Berbasiskan Industrial Internet of Things

Ahmad Ardha Juwarsa[1]*, Chalidia Nurin Hamdani[1], Astrie Kusuma Dewi[1]

[1] *Program Studi Teknik Instrumentasi Kilang, Politeknik Energi dan Mineral Akamigas Cepu – Blora – Central Java, 59311, INDONESIA*

*Corresponding Author: ardha.djuwarsa@gmail.com
DOI: https://doi.org/10.53026/6egh5t53

Article Info

Received: 23 Juni 2025
Accepted: 1 Juni 2025
Available online: 20 Juni 2025

Keywords

IIOT, PEMFC, *Hydrogen,* PLC, *Monitoring*

Abstrak

Polymer Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) dianggap sebagai teknologi untuk transisi energi berbasis hydrogen. Berkat efisiensi dan tidak adanya emisi. Namun, kompleksitas pemilaharaan, degradasi membrane, dan ketidakstabilan kinerja dalam kondisi operasional yang dinamis masih menjadi penghalang utama. Penelitian ini membahas starategi implementasi Industrial Internet of Things (IIOT) untuk mengatasi masalah tersebut melalui pendekatan pemantauan berbasis sensor dan penggunaan arsitektur IIOT dengan rujukan ISO/IEC 30162. Data tegangan, arus, daya, tekanan, dan temperature pada sensor akan dikumpulkan secara kontinu dari Programmable Logic Controller (PLC) yang terhubung pada Gateway untuk diteruskan pada platform IIOT. Tantangan seperti cybersecurity dan pemilihan protocol komunikasi antar perangkat yang handal akan dibahas pada implementasi yang dilaksanakan. Hasil dari implementasi ini membuktikan bahwa integrasi antara teknologi IIOT dengan PEMFC akan membuat sistem arsitektur jaringan pengiriman data yang lebih handal.

Abstract

The Polymer Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) is considered a promising technology for the hydrogen-based energy transition due to its efficiency and zero emissions. However, maintenance complexity, membrane degradation, and performance instability under dynamic operating conditions remain major challenges. This study discusses the implementation strategy of the Industrial Internet of Things (IIOT) to address these issues through a sensor-based monitoring approach and the use of an IIOT architecture based on ISO/IEC 30162. Voltage, current, power, pressure, and temperature data from sensors will be continuously collected via a Programmable Logic Controller (PLC) connected to a Gateway, which then transmits the data to the IIOT platform. Challenges such as cybersecurity and the selection of reliable communication protocols between devices are also addressed in the implementation. The results of this implementation demonstrate that the integration of IIOT technology with PEMFC creates a more reliable data transmission network architecture

This is an open access article under the CC BY-NC-SA 4.0 license.

© 2026 TIK PEM Akamigas Publisher.
https://jih.akamigas.ac.id/index.php/inhardware

1. PENDAHULUAN

Sumber energi terbarukan telah menjadi alternatif, karena sumber energi tidak terbarukan yang tersedia semakin langka dan mahal. Selain itu kebutuhan akan sumber energi yang lebih bersih telah semakin meningkat sehingga diperlukan transisi dari yang menyebabkan polusi ke energi hijau [1]. Banyak negara dan perusahaan telah berinvestasi pada energi hijau, dalam program penelitian, dan pemanfaatannya yang luas dalam beberapa tahun terakhir [2].

Di alam semesta ini, unsur hydrogen (H2) merupakan unsur terbanyak [3]. Unsur ringan ini ditemukan di Bumi, terutama dalam air dan senyawa organik [3]. Hydrogen hanya terdiri dari satu proton dan satu elektorn, dengan berat atomnya adalah 1,00794 satuan massa atom [3]. Karena sifat molekul nya yang kecil dan ringan, hydrogen dapat keluar melalui beberapa jenis material [3]. Sehingga dapat menyebabkan penggetasan yang mengakibatkan saluran transmisi hydrogen mengalami kegagalan mekanis [3]. Oleh karena itu, penggunaan Stainless Steel diperlukan agar tidak terjadi penggetasan pada media transmisinya.

Energi hydrogen dan fuel cells adalah sumber energi alternatif dan perangkat konversi energi yang bersih karena memiliki emisi karbon yang rendah. Serta efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan sumber energi alternatif dan teknologi konversi energi lainnya [2]. Beberapa jenis fuel cells seperti *Solid Oxide Fuel Cells* (SOFC), *Direct Methanol Fuel Cells* (DMFC) dan *Proton Exchange Membrane* (PEM) *Fuel Cells* (PEMFC) [4]. Dari strukturnya PEMFC terdiri dari susunan cell yang disusun secara modular menyesuaikan dengan kebutuhan daya. Setiap cell terdiri dari Gas Diffussion Layer (GDL), Membrane Electrode Assembly (MEA), dan plat insulasi, serta elektroda pada setiap akhir dari tumpukan cell [5]. Serta pemindahan panas yang tercipta akibat reaksi elekrokimia pada PEMFC akan lebih sulit karena penggunaan oksigen murni yang mengakibatkan MEA akan rusak [6]. Untuk itu, penggunaan hydrogen murni dengan udara bertekanan sebagai sumber daya lebih banyak digunakan [6].

Fuel cells memiliki densitas energi yang tinggi karena bahan bakar disimpan dalam tangki hydrogen terpisah dan mudah diganti atau diisi ulang [7]. Sedangkan respon dinamis yang lambat dapat diatasi melalui penggunaan modul konverter DC-DC dan super capacitor dalam sistem [7]. Karena fuel cells merupakan teknologi baru di pasaran, sehingga masih banyak hambatan yang dihadapi. Beberapa kekurangan dari teknologi *fuel cells* seperti biaya yang tinggi, dan respon dinamis yang lambat [7]. Sehingga perlu mengetahui sistem pemantauan yang handal agar dapat mengendalikan parameter dari *fuel cells*.

Pertumbuhan teknologi yang dinamis membuat teknologi pemantauan jarak jauh berkembang salah satu teknologi pemantuan adalah dengan memanfaatkan Internet of Things (IOT) [8]. IOT adalah perangkat fisik yang terhubung dengan jaringan dan mengirimkan data melalui internet [8]. Penelitian yang dilakukan oleh [8] menggunakan sistem pemantauan berbasis IOT pada *fuell cells* menggunakan Raspberry Pi 4 dengan pengiriman data berbasis *Message Queuing Telemetry Transport* (MQTT). Dengan antarmuka labview dan NodeRed Dashboard.

Namun, dalam konteks industri, digunakan pendekatan yang lebih khusus, yaitu *Indstrial Internet of Things* (IIOT). IIOT merupakan pengembangan dari IOT yang secara khusus dirancang untuk lingkungan industri, dengan penekanan pada reliabilitas, keamanan data, dan integrasi dengan sistem konntrol seperti PLC. Struktur jaringan yang kokoh merupakan elemen fundamental dari setiap IIoT [9]. Pentingnya IIOT terletak pada kemampuannya dalam meningkatkan efisiensi operasional, meminimalkan waktu henti, dan mendukung pengambilan keputusan berbasis data real-time secara lebih akurat [10]. Perbedaan mendasar pada IOT dan IIOT terletak pada aplikasi tingkat keamanannya, dimana IOT lebih umum digunakan sebagai perangkat konsumen seperti *smart home*, sedangkan IIOT dirancang untuk sistem industri dengan kebutuhan kehandalan dan keamanan data yang jauh lebih tinggi.

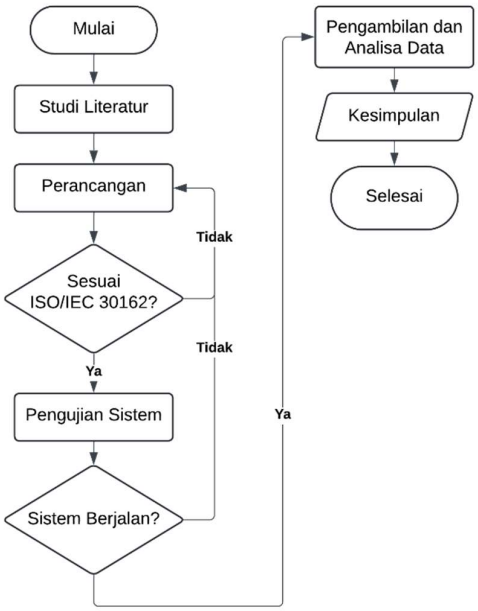
Berdasarkan latar belakang yang telah dibahas, penelitian ini bertujuan untuk merancang sistem pemantauan *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC) berbasis *Industrial Internet of Things* (IIOT) yang andal dan terintegrasi. Dalam proses perancangannya, diperlukan pemahaman tentang bagaimana menghubungkan sensor, aktuator, dan kontroler ke dalam sistem IIOT secara efektif, sehingga data operasional seperti temperature dan pressure dapat dimonitor secara real-time. Selain itu, penelitian ini juga mengkaji aspek keamanan sistem monitoring melalui pengujian terhadap serangan siber, serta menilai sejauh mana kekuatan sinyal internet memengaruhi performa keseluruhan sistem. Terakhir, penelitian ini mengevaluasi pengaruh data temperature dan pressure terhadap kinerja PEMFC, untuk mengetahui parameter operasional yang paling signifikan dalam mendukung efisiensi dan stabilitas sistem

2. METODA

Penelitian diawali dari sudi literatur, dimana penulis mengumpulkan informasi terkait sistem IIoT dan PEMFC. Informasi ini berguna sebagai referensi dalam merangcang sistem IIoT pada PEMFC. Perancangan ini termasuk pemilihan sistem kendali untuk PEMFC dan kebutuhan dari sistem IIoT. Pada saat perancangan penulis membandingkan hasil rancangan dengan rekomendasi dari ISO/IEC 30162. Jika sudah sesuai maka akan dilakukan simulasi atau pengujian sistem dari hasil rancangan penulis. Apabila sistem tidak berjalan dengan baik maka akan dilakukan perancangan ulang dengan memodifikasi bagian yang tidak sesuai. Setelah sistem berjalan

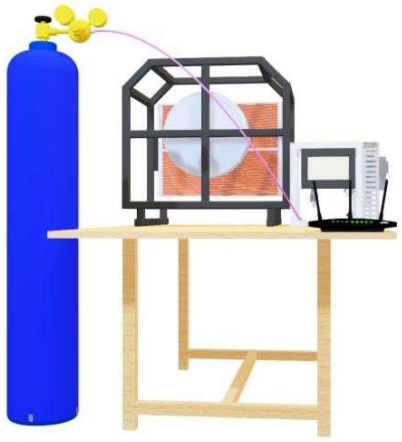
Journal of Instrumentation and Hardware Vol. 4 No. 1 (2026) p. 1-12

dengan baik, maka akan dilakukan pengambilan data yaitu membandingkan hasil pemantauan lokal dengan pemantauan sistem IIoT. Variabel yang menjadi pembanding penulis adalah jaringan internet menggunakan 4G. Untuk alur penelitian ini dapat dilihat pada gambar 1.



Gambar 1 *Alur Penelitian*

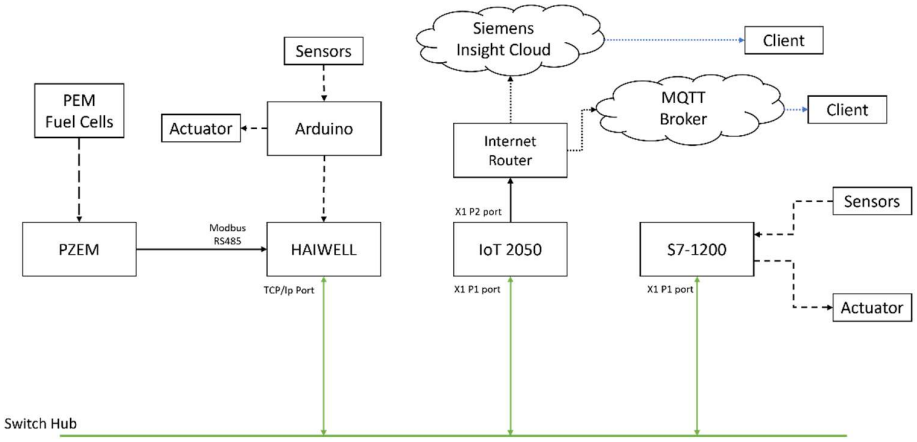
Penelitian ini berencana merancang sistem IIoT pada PEMFC. Tujuan dari perancangan sistem IIoT ini adalah mengimplementasikan sistem IIoT mengacu pada standar ISO/IEC 30162 tentang konektivitas pada jaringan IIoT. Serta membandingkan pemantauan berbasis sistem IIoT dengan sistem pemantauan lokal. Implementasi ini menggunakan IIoT Gateway siemens iot2050 dengan kontroler PLC siemens S7-1200. Design awal dari penelitian ini dapat dilihat pada gambar 2.



Gambar 2. *Design 3D Rancang Bangun IIOT Pada PEMFC*

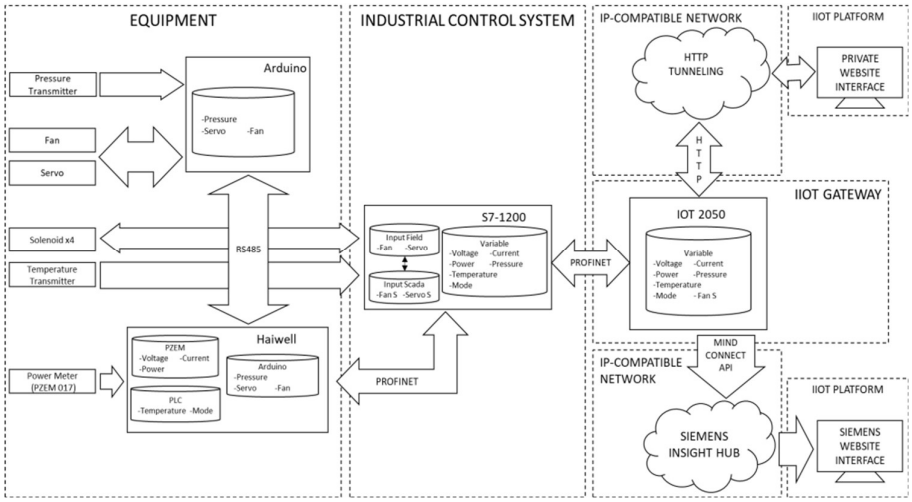
Sensor yang digunakan untuk melakukan pemantauan pada PEMFC adalah pressure transmitter, RTD PT100 serta temperatur transmitter, dan PZEM-017 untuk mengetahui keluaran tegangan dari PEMFC. Kontroler untuk mengatur mode proses dari PEMFC adalah PLC siemens S7-1200 dengan tipe CPU 1214C dc/dc/rly. Untuk pemantauan lokal menggunakan HMI Haiwell B7-HW yang terhubung dalam jaringan lokal. Sedangkan untuk pemantauan dengan sistem IIoT menggunakan IIoT Gateway siemens iot2050 yang terhubung dengan modem wifi sehingga dapat memiliki akses ke jaringan internet melalui sinyal telekomunikasi menggunakan kartu identifikasi pelanggan telekomunikasi dengan internet protokol yaitu 4G.

Pada blok diagram 3 merupakan rancangan topologi jaringan sistem IIoT yang dirancang oleh penulis. Topologi jaringan yang dirancang berdasarkan rekomendasi dari standar ISO/IEC 30162. IIoT gateway terhubung dengan 2 perangkat yaitu PLC dan HMI dalam satu jaringan lokal sehingga memungkinkan pertukaran data terjadi.



Gambar 3. *Topologi Jaringan Sistem IIOT*

Sensor yang digunakan adalah pressure transmitter untuk mengetahui tekanan gas hydrogen pada PEMFC, RTD PT-100 sebagai elemen pengukur perubahan temperature pada PEMFC, temperature transmitter sebagai pengubah sinyal keluaran dari RTD PT-100 yaitu reistansi menjadi sinyal standar 0-10V dan power meter PZEM-017 untuk mengetahui keluaran tegangan dari PEMFC. Aktuator yang digunakan adalah 2 buah solenoid valve. Fungsi dari aktuator tersebut adalah untuk membuka dan menutup aliran dari hydrogen menuju PEMFC.Hasil pengukuran dari sensor akan diteruskan ke PLC. Sedangkan pengukuran dari power meter akan diteruskan ke HMI. Kemudian HMI akan menampilkan hasil pengukuran pada layar, dan menulis hasil pengukuran dari power meter ke datablock pada PLC. Selanjutnya HMI juga akan membaca hasil pengukuran sensor yang disimpan pada memori bit PLC dan menampilkan pada layar. Setelah data terkumpul pada PLC, IIoT gateway akan membaca data pada datablock dan memori bit dari PLC. Kemudian data tersebut akan dikirim menuju server siemens menggunakan protokol Hypertext Transfer Protocol (HTTP). Setelah data dikirim, data kemudian akan diproses menggunakan mindconnect API untuk menampilkan variabel yang dikirim menggunakan fitur dashboard pada siemens insighthub. Seperti pada gambar 4.

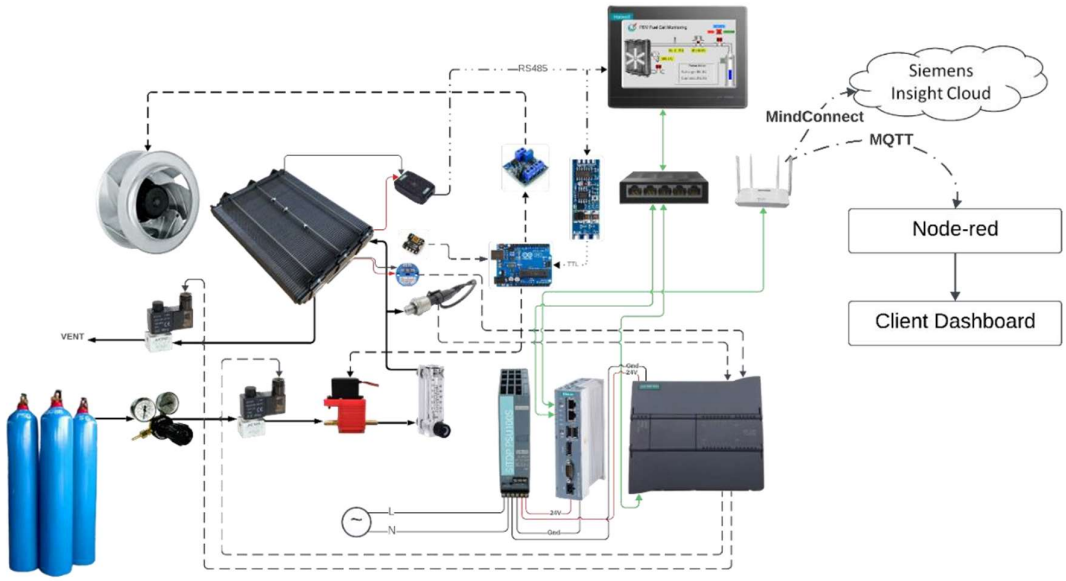


Gambar 4. *Arsitektur IIOT Pada Prototype*

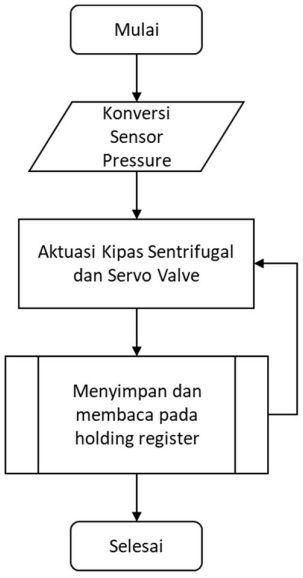
Pada rancangan hardware ini terdiri dari 2 sistem yaitu sistem hydrogen *fuelcell* dan sistem IIoT. Pada sistem PEMFC perangkat yang digunakan adalah tabung, pressure regulator, servo valve, rotameter, pressure transmiter, PEMFC, PZEM-017, RTD PT100, temperatur transmiter, kipas sentrifugal, solenoid valve, Haiwell B7-HW, PLC

Journal of Instrumentation and Hardware Vol. 4 No. 1 (2026) p. 1-12

siemens S7-1200, Arduino Uno, RS-485 to TTL Converter dan catu daya. Pada sistem IIoT, perangkat jaringan yang digunakan adalah siemens IOT2050, switch hub, dan Modem WiFi. Hasil data yang disimpan pada memori PLC akan dibaca oleh siemens IOT2050 kemudian akan dienkripsi menggunakan protokol S7 dan dikirim menuju server siemens insighthub dengan broker privat dari siemens melalui jaringan internet dengan Application Programming Interface (API) Mindconnect. Sedangkan unutk rancangan hardware dari sistem hydrogen dan sistem IIoT dapat dilihat pada gambar 5.



Gambar 5. *Rancang Hardware*

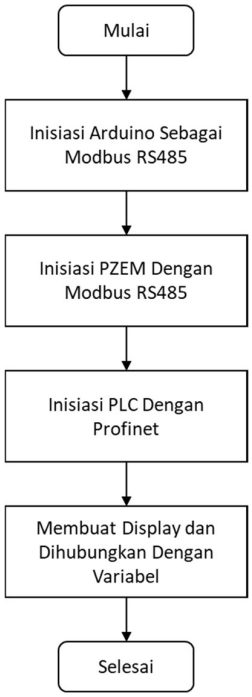


Gambar 6. *Alur Program Arduino Uno*

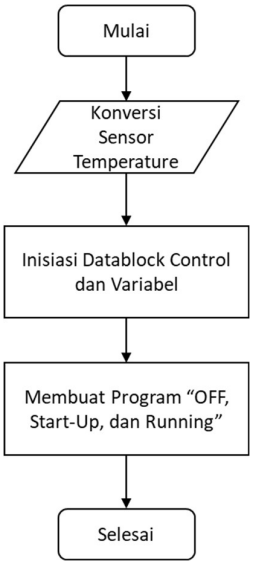
Sedangkan untuk perancangan *software* dari sistem ini terdiri dari 3 bagian, yaitu program Arduino, program PLC, dan program HMI Haiwell Cloud SCADA. Arduino Uno akan diprogram menggunakan Arduino IDE, dengan alur pemrograman seperti gambar 6. Dimana sensor tekanan akan dikonversi menjadi nilai tegangan, kemudian akan diubah menjadi nilai pembacaan sesungguhnya. Selanjutnya aktuasi kipas sentrifugal dan servo valve dengan memberikan nilai PWM pada output pin masing-masing alat. Setelah itu, menyimpan dan membaca variabel pada holding register dimana data yang awalnya dalam bentuk integer akan diubah menjadi unsigned

integer 16 bit. Dalam program ini menggunakan 4 holding register, dimana pada register 0 digunakan untuk menyimpan data bukaan servo, register 1 digunakan untuk menyimpan data kecepatsan kipas sentrifugal, register ke 2 dan ke 3 digunakan untuk menyimpan data float dari hasil pembacaan tekanan. Sedangkan untuk konfigurasi Modbus pada Arduino menggunakan baudrate 9600 bps. Penggunaan pada nilai ini dikarenakan PZEM 017 yang juga menggunakan baudrate yang sama. Dengan slave id pada No 2 dan power meter pada No 1.

HMI Haiwell B7-HW akan diprogram menggunakan Haiwell Cloud SCADA dengan alur pemrograman seperti gambar 7. Dimana dengan memanfaatkan protokol komunikasi yang mendukung yaitu Modbus RS485 dan Profinet. Hal pertama adalah melakukan konfigurasi Modbus untuk Arduino dan PZEM 017 yaitu baudrate 9600 bps dan konfigurasi holding register yang akan dibaca dan ditulis oleh HMI serta menentukan interval pembacaan variabel. Rentang pembacaan yang dipilih adalah 400ms. Selanjutnya konfigurasi protokol profinet untuk PLC yaitu dengan memasukkan alamat IP dari PLC ke HMI dan menentukan pembacaan bit yang sesuai pada PLC.



Gambar 7. *Alur Pemrograman HMI*



Gambar 8. *Alur Pemrograman PLC*

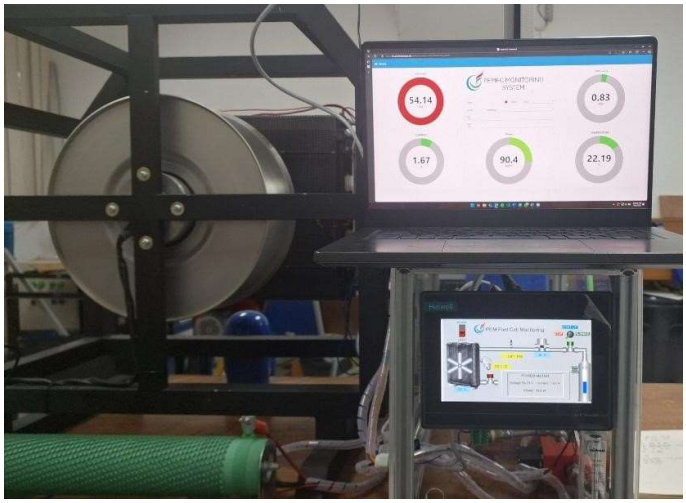
Journal of Instrumentation and Hardware Vol. 4 No. 1 (2026) p. 1-12

PLC Siemens S7-1200 akan diprogram menggunakan TIA Portal V17. PLC akan membaca nilai temperature dari transmitter dengan menormalisasikan dan scaling nilai pembacaan dari input analog yaitu 0 hingga 27648 menjadi 0 – 100°C. Hasil pembacaan ini akan disimpan pada datablock variabel bersamaan dengan hasil pembacaan dari Arduino dan PZEM 017. Datablock ini terdiri dari tegangan, arus, daya, tekanan dan temperature. Sedangkan datablock control akan terdiri dari bukaan servo valve dan kecepatan kipas sentrifugal.

Selanjutnya, membuat program PEMFC saat off, start-up, dan running. Pada mode off solenoid valve input akan menutup kemudian solenoid valve output akan membuka selama 10 detik kemudian menutup. Hal ini untuk mengeluarkan udara hydrogen yang masih terdapat pada PEMFC setelah pemakaian. Pada mode start-up, PEMFC akan di purging menggunakan hydrogen selama 2 detik pada interval 5 detik. Waktu purging yang lama dengan interval yang cepat ini untuk mengeluarkan gas lainnya yang berada dalam sistem PEMFC sehingga memastikan hanya gas hydrogen yang ada dalam sistem. Pada mode running, sistem dapat sepenuhnya berjalan dengan purging selama 0,5 detik dan interval 15 detik.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

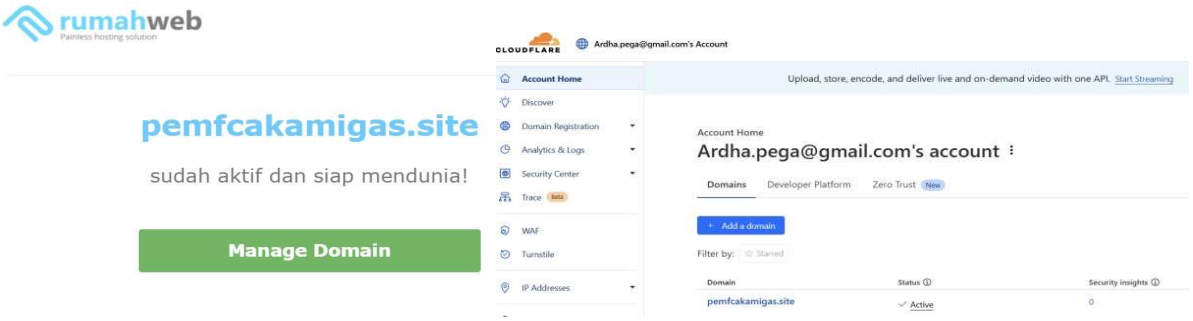
Dalam penelitian ini, pemantauan dilakukan menggunakan PLC Siemens S7-1200 sebagai pengendali utama dan Human Machine Interface (HMI) Haiwell untuk pemantauan lokal. Sedangkan pemantauan berbasis IIOT menggunakan Siemens IoT 2050 sebagai gateway menuju platform IIOT Siemens InsightHub dengan menggunakan Application Programming Interface (API) MindConnect. Hasil implementasi dari rancang bangun ini adalah prototype sistem pemantauan PEMFC seperti pada gambar 9. Rancang bangun ini berfungsi untuk pemantauan variabel dari PEMFC yaitu tegangan, arus, energi, temperature, dan tekanan, serta melakukan kendali bukaan kerangan dan kecepatan kipas melalui HMI dan dashboard yang telah dibuat serta juga menyimpan data hasil pemantuan untuk dianalisa lebih lanjut.



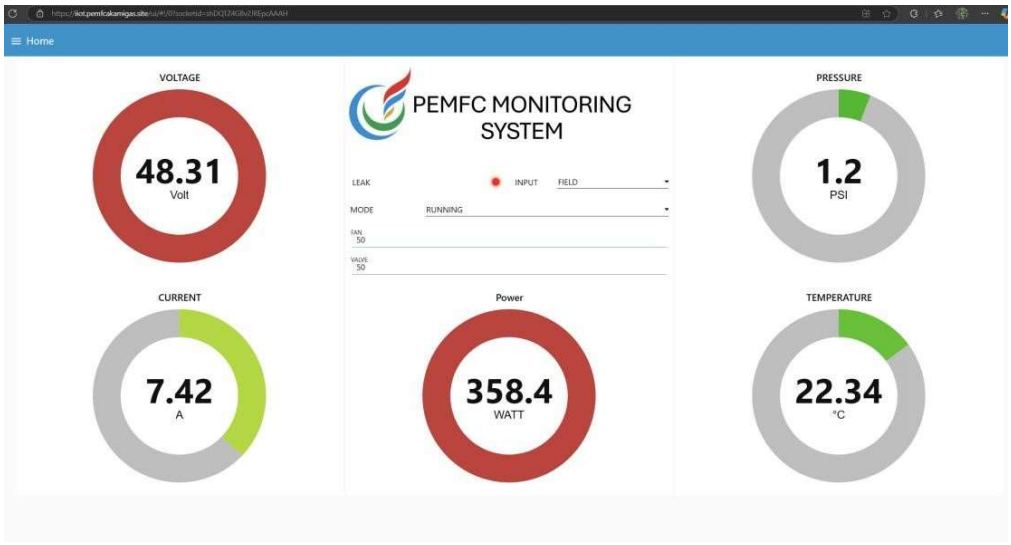
Gambar 9. *Hasil Rancang Bangun*

3.1. Evaluasi Pengujian Sistem IIoT

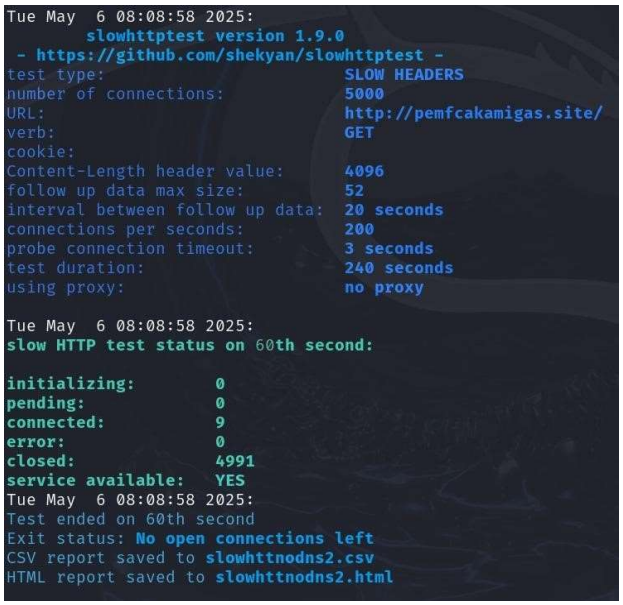
Untuk sistem pemantauan IIOT pada PEMFC, pengujian dilakukan untuk memastikan data yang masuk sudah sesuai dan benar. Serta pada gambar 10 pembelian nama domain agar alamat website dapat diakses menggunakan internet. Namun domain ini perlu diproteksi menggunakan cloudflared. Domain ini perlu didaftarkan pada sistem cloudflared untuk memantau lalulintas yang masuk pada sistem IIOT. Pendaftaran domain pada sistem cloudflared perlu mengganti NameServer agar dapat diakses oleh cloudflared. Selanjutnya dengan sistem zero trust yaitu model keamanan jaringan yang secara otomatis tidak mempercayai siapapun yang dapat mengakses sistem IIOT yang telah dibuat. Sistem ini akan menggunakan metode http tunneling pada IoT 2050 dengan autentikasi menggunakan alamat email yang telah didaftarkan. Setelah domain telah terdaftar dan http tunneling pada IoT 2050 telah dibuat. Berikutnya menguji apakah domain dapat diakses dengan metode autentikasi email. Dapat dilihat pada gambar 11 bahwa dashboard dapat diakses dengan alamat domain yang sesuai yaitu iiot.pemfcakamigas.site/ui.



Gambar 10. *Pendaftaran Domain Pada Cloudflare*



Gambar 11. Tampilan Dashboard IIoT



Gambar 12. *Proses Serangan Siber Slowhttp*

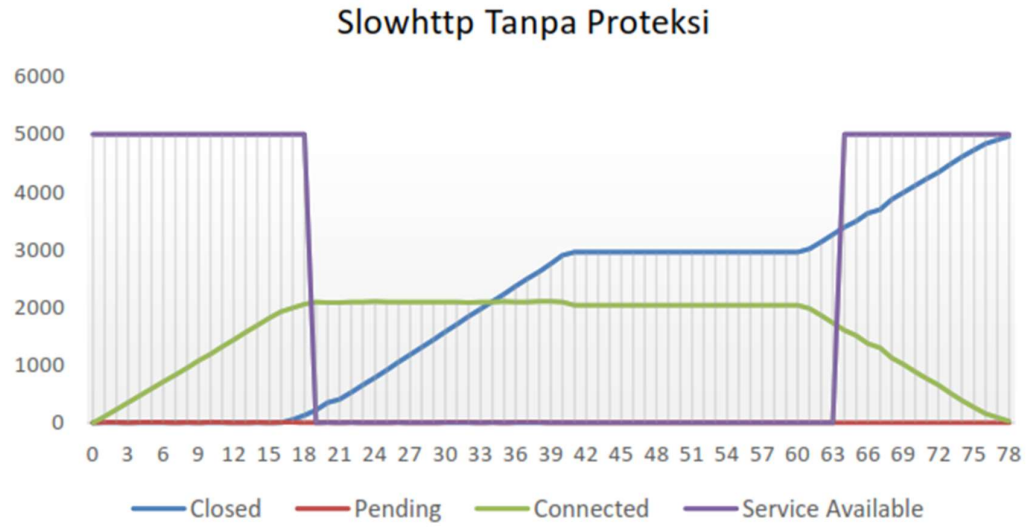
Journal of Instrumentation and Hardware Vol. 4 No. 1 (2026) p. 1-12

3.2. Pengujian Keamanan Sistem IIoT

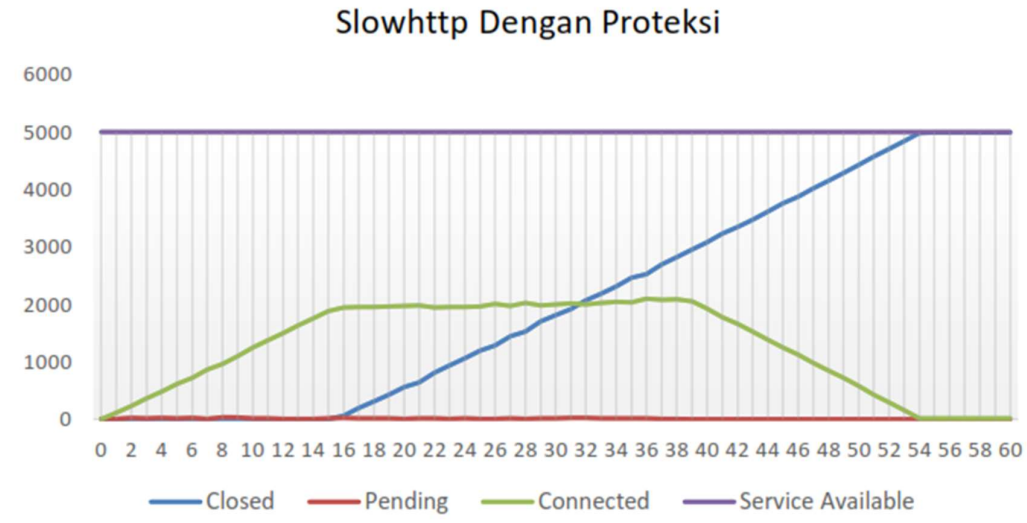
Untuk menguji sistem keaman dari sistem IIOT ini, menggunakan metode slowhttp. Slowhttp adalah jenis serangan jaringan Denial of Service (DoS) yang bertujuan membuat server kehabisan sumber daya dengan mengirimkan permintaan http secara sangat lambat. Pemilihan serangan siber ini sesuai dengan metode akses dari dashboard yaitu menggunakan http tunneling. Jenis serangan siber slowhttp yang digunakan adalah Slow Headers dimana mengirim permintaan http pada server secara sangat lambat byte demi byte. Dapat dilihat pada gambar 12 serangan siber dilakukan pada domain utama pemfcakamigas.site. serangan ini mengggunakan sistem operasi kali linux. Dengan konfigurasi 5000 koneksi dengan koneksi per detik adalah 200 pada permintaan panjang data sebanyak 4096. Hal ini dilakukan untuk memastikan kehandalan server dalam mengatasi serangan dan memastikan kehandalan agar dapat diakses.

3.3. Analisa Keamanan Sistem IIoT

Setelah melakukan pengujian keamanan Arsitektur IIOT PEMFC, didapatkan dua data yaitu slowhttp degan proteksi dan tanpa proteksi. Kedua data ini digunakan untuk membandingkan kehandalan server dalam menyajikan data. Dapat dilihat pada gambar 13 respon server setelah dilakukan penyerangan tanpa proteksi memiliki down time pada detik ke-19 hingga detik ke-63, atau selama 44 detik. Dapat dilihat juga usaha dari server untuk menutup koneksi yang lambat, namun respon dari server tanpa proteksi ini masih belum cepat sehingga menyebabkan service down time.



Gambar 13. *Grafik Respon Slowhttp Tanpa Proteksi*



Gambar 3.14. *Grafik Respon Slowhttp Dengan Proteksi*

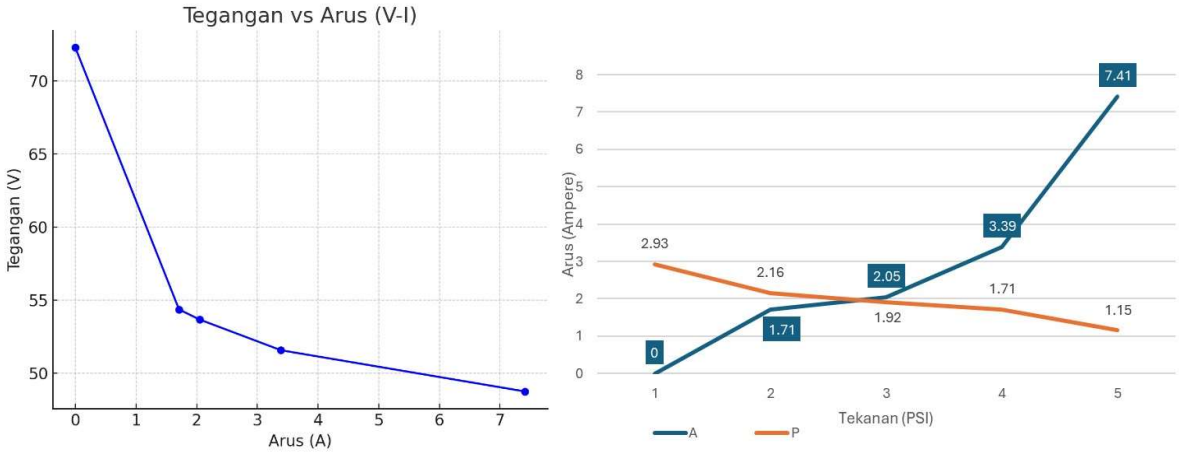
Sedangkan pada system IIOT yang terproteksi dengan cloudflare dapat dilihat bahwa server dapat menutup semua permintaan dari serangan siber slowhttp tanpa menyebabkan down time pada sistem. Dapat dilihat pada gambar 14 bahwa sistem yang terproteksi menggunakan cloudflare menutup permintaan pada detik ke-16 hingga detik ke-26 sehingga memiliki respon yang lebih cepat yang menyebabkan server masih dapat diakses.

3.4. Hasil dan Evaluasi Pengujian PEMFC

Untuk evaluasi performa, PEMFC akan dihubungkan dengan beban yaitu brake resistor dengan resistansi yang dapat diatur hingga 33 Ohm. Pada percobaan ini, PEMFC akan dihubungkan dengan 4 variabel resistansi selama masing-masing 5 menit dengan bukaan valve dan kecepatan kipas sentrifugal yang berada di 50%. Untuk purging dari gas Hydrogen dilakukan selama 0.5 detik pada interval 10 detik. Dapat dilihat pada tabel 1. data dari hasil pengujian PEMFC yang telah dilakukan.

Tabel 1. *Hasil Pengujian PEMFC*

Resistansi Beban (Ohm)	Arus Beban (A)	Tegangan PEMFC (V)	Daya Dari PEMFC (W)
-	0	72.3	0
33.3	1.71	54.37	92.9
27.2	2.05	53.68	110
15.7	3.39	51.58	174.8
7	7.41	48.76	361.3



(a) **(b)**

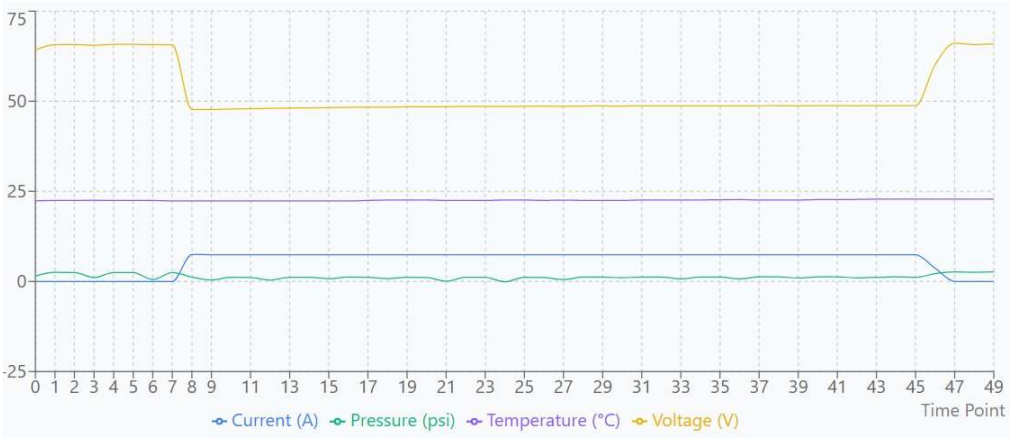
Gambar 15. ***(a).*** *Grafik Tegangan Terhadap Arus*
(*b*). *Grafik Arus Terhadap Tekanan*

Dapat dilihat pada gambar 15(a) grafik tegangan terhadap arus dari PEMFC memiliki trend penurunan. Namun beban yang diberikan belum cukup untuk menentukan area yang efisien untuk penggunaan PEMFC.

Hal ini dikarenakan daya yang dirancang dari PEMFC Ballard FCGEN 1020 ACS bisa mencapai 3000 Watt. Hal yang berpengaruh pada pengoperasian PEMFC adalah pressure dapat dilihat pada gambar 15(b). bahwa ketika PEMFC diberikan beban yang semakin meningkat maka tekanan dari PEMFC juga menurun. Hal ini dikarenakan reaksi yang terjadi saat beban meningkat menjadi lebih sering yang membuat tekanan pada PEMFC menurun.

Pada gambar 16. dapat dilihat grafik data hasil tes PEMFC pada resistansi 7 Ohm. Pada saat PEMFC masih belum diberikan beban, maka tegangan yang diukur mencapai 65.75 Volt, namun saat diberikan beban respon tegangan langsung menurun hingga 48 Volt. Sedangkan arus memiliki peningkatan menjadi 7.42 Ampere. Tetapi nilai temperature dari PEMFC masih stabil pada 22°Celcius.

Journal of Instrumentation and Hardware Vol. 4 No. 1 (2026) p. 1-12



Gambar 16. *Grafik Time Series PEMFC Saat Beban 7 Ohm*

Untuk perubahan pressure yang lebih terlihat dapat dilihat pada gambar 17. dimana grafik menunjukkan kondisi PEMFC yang fluaktif akibat purging oleh gas hydrogen setiap 10 detik selama 0.5 detik. Namun saat area beban belum diberikan pressure menunjukkan nilai hingga 2.5 Psi, dan saat beban diberikan, tekanan yang berada pada PEMFC menjadi turun hingga 1.2 Psi.



Gambar 17. *Grafik Pressure Saat Beban 7 Ohm*

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian prototype rancang bangun IIOT pada PEMFC, dapat disimpulkan bahwa sistem monitoring berbasis IIOT yang dirancang dengan mengacu pada standar ISO/IEC 30162 dan menggunakan pendekatan gateway telah berhasil memantau data dari PEMFC secara handal. Integrasi antara sensor, aktuator, dan kontroler dilakukan melalui berbagai protokol komunikasi seperti Modbus RS-485 untuk pengukuran dan kendali, Profinet untuk komunikasi antar perangkat industri, serta HTTP sebagai metode tunneling yang memungkinkan akses sistem melalui domain. Pengujian terhadap ketahanan sistem juga menunjukkan bahwa penggunaan proteksi Cloudflare dapat mempertahankan konektivitas dari serangan siber jenis slowhttp. Meskipun demikian, performa sistem sangat tergantung pada kestabilan koneksi internet. Data temperatur dan tekanan dapat dikirim dan disimpan setiap 10 detik, di mana tekanan menunjukkan pengaruh signifikan terhadap arus keluaran PEMFC, sementara temperatur belum menunjukkan korelasi yang signifikan berdasarkan hasil pengujian.

.

DAFTAR PUSTAKA

[1] P. Arun Kumar, M. Geetha, K. R. Chandran, and P. Sanjeevikumar, "PEM fuel cell system identification and control," *Lect. Notes Electr. Eng.*, vol. 435, pp. 449–457, 2018, doi: 10.1007/978981-10-4286-7_44.

[2] W. R. W. Daud, R. E. Rosli, E. H. Majlan, S. A. A. Hamid, R. Mohamed, and T. Husaini, "PEM fuel cell system control: A review," *Renew. Energy*, vol. 113, pp. 620–638, 2017, doi:10.1016/j.renene.2017.06.027.

[3] F. Dawood, M. Anda, and G. M. Shafiullah, "Hydrogen production for energy: An overview," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 7, pp. 3847–3869, 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.12.059.

[4] E. L. Dewi, T. Ismujanto, and G. T. Chandrasa, "Pengembangan dan aplikasi fuel cell," *Pros. Semin. Nas. Teknoin 2008*, vol. 3169887, no. 021, pp. A51–A5Dewi, E. L., Ismujanto, T., Chandrasa, G., 2018.

[5] Q. Chen, G. Zhang, X. Zhang, C. Sun, K. Jiao, and Y. Wang, "Thermal management of polymer electrolyte membrane fuel cells: A review of cooling methods, material properties, and durability," *Appl. Energy*, vol. 286, no. September 2020, p. 116496, 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.116496.

[6] J. C. Kurnia, B. A. Chaedir, A. P. Sasmito, and T. Shamim, "Progress on open cathode proton exchange membrane fuel cell: Performance, designs, challenges and future directions," *Appl. Energy*, vol. 283, no. April 2021, 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.116359.

[7] S. D. Sonderskov, L. Torok, and S. Munk-Nielsen, "Monitoring performance indicators of PEM fuel cell backup power systems," *INTELEC, Int. Telecommun. Energy Conf.*, vol. 2018-Octob, 2018, doi:10.1109/INTLEC.2018.8612294.

[8] F. A. S. AL-Taie and A. S. Al-Araji, "Design of a Real-Time Monitoring and Controlling System for the PEM Fuel Cell Model Based on LabVIEW with IoT Technology," *Int. J. Intell. Eng. Syst.*, vol. 16, no. 4, pp. 611–629, 2023, doi: 10.22266/ijies2023.0831.50.

[9] S. Latif *et al.*, "Deep learning for the industrial internet of things (Iiot): A comprehensive survey of techniques, implementation frameworks, potential applications, and future directions," *Sensors*, vol. 21, no. 22, 2021, doi: 10.3390/s21227518.

[10] D. Lou, J. Holler, D. Patel, U. Graf, and M. Gillmore, "The Industrial Internet of Things Networking Framework," pp. 1–70, 2021.