

Sistem Monitoring dan Pengamanan Otomatis Tekanan Gas Alam Berbasis IoT pada Regulating Station

¹Krisna Dwi Aditya 1, ²Moh Sahal, ³Merinda Lestandy, ⁴Haneef Nouval Alannibras Humaidi

¹Program Studi Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Malang, Malang

¹krisnadwiaditya31@gmail.com, ²mohsahal562@gmail.com, ³merindalestandy@umm.ac.id, ⁴haneefnouval@umm.ac.id

Regulating stations play a critical role in maintaining stable pressure during natural gas distribution, yet conventional monitoring still relies on manual observation and static threshold alarms that only respond after an abnormal condition occurs. This paper presents the design and implementation of an Internet of Things (IoT) based monitoring and automatic safety system for natural gas pressure at a regulating station, developed as the physical and cyber layers of a three-layer Cyber-Physical System (CPS) architecture. An ESP32 microcontroller serves as the edge-computing unit, acquiring pressure data from a 4-20 mA pressure transmitter through a 120 Ω shunt resistor and a 12-bit ADC, along with gas-leak concentration data from an MQ-2 sensor. Using a rule-based threshold method, the system classifies conditions into normal, low, warning, or critical states, displays results locally via a 16x2 LCD and three-color LED indicators, and automatically closes a Normally Open solenoid valve through a relay when a hazardous condition is detected, following a fail-safe design principle. Sensor data is transmitted to a server every ten seconds via HTTP REST API and briefly visualized through a web-based monitoring dashboard. Testing results show a pressure-measurement error of only 0.10%, well below the $\pm 1\%$ Full Scale tolerance target, and an average detection-to-action latency of 1.8 seconds, meeting the ≤ 2.5 -second safety target, with reliable automatic shut-off performance under simulated leak and overpressure scenarios. These results demonstrate that the proposed IoT-based CPS architecture offers an accurate, responsive, and cost-effective solution for real-time pressure monitoring and automatic safety protection at natural gas regulating stations, with further potential development through more precise gas-sensor calibration and integration of more efficient communication protocols such as MQTT for industrial-scale implementation.

Keywords: Internet of Things; ESP32; Cyber-Physical System; regulating station; pressure sensor; fail-safe

Regulating station berperan penting dalam menjaga kestabilan tekanan gas alam selama proses distribusi, namun pemantauan yang dilakukan secara konvensional masih banyak mengandalkan pembacaan manual dan alarm berbasis ambang batas statis yang hanya bereaksi setelah kondisi tidak normal terjadi. Penelitian ini merancang dan mengimplementasikan sistem monitoring serta pengamanan otomatis tekanan gas alam berbasis *Internet of Things* (IoT) pada regulating station, yang dikembangkan sebagai lapisan fisik dan lapisan siber dari arsitektur *Cyber-Physical System* (CPS) tiga lapis. Mikrokontroler ESP32 digunakan sebagai *unit edge computing* yang mengakuisisi data tekanan dari *pressure transmitter* 4-20 mA melalui resistor shunt 120 Ω dan ADC 12-bit, serta data konsentrasi gas dari sensor MQ-2. Berdasarkan metode *rule-based threshold*, sistem mengklasifikasikan kondisi menjadi normal, *low*, *warning*, atau *critical*, menampilkannya secara lokal melalui LCD 16x2 dan indikator LED tiga warna, serta secara otomatis menutup *solenoid valve* tipe *normally open* melalui relay ketika kondisi berbahaya terdeteksi, sesuai prinsip *fail-safe*. Data sensor dikirim ke *server* setiap 10 detik melalui *HTTP REST API* dan divisualisasikan secara singkat melalui *dashboard web*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem memiliki kesalahan pengukuran tekanan sebesar 0,10%, jauh lebih baik dari target toleransi $\pm 1\%$ *Full Scale*, serta *latensi* deteksi-ke-aksi rata-rata 1,8 detik yang memenuhi target keselamatan $\leq 2,5$ detik, dengan kinerja *shut-off*

otomatis yang andal pada skenario kebocoran dan *overpressure* yang disimulasikan. Hasil ini menunjukkan bahwa arsitektur CPS berbasis IoT yang diusulkan merupakan solusi yang akurat, responsif, dan ekonomis untuk pemantauan tekanan *real-time* serta pengamanan otomatis pada *regulating station* gas alam, dan berpotensi dikembangkan lebih lanjut melalui kalibrasi sensor gas yang lebih presisi serta integrasi protokol komunikasi yang lebih efisien seperti MQTT untuk penerapan pada skala industri.

Kata Kunci: Internet of Things; ESP32; Cyber-Physical System; regulating station; sensor tekanan gas; fail-safe

I. Pendahuluan

Gas alam merupakan salah satu sumber energi utama yang banyak digunakan pada sektor industri, pembangkit listrik, maupun rumah tangga. *Regulating station* berperan penting dalam mengatur dan menjaga tekanan gas alam agar tetap berada pada batas aman sebelum disalurkan ke konsumen. Ketidakstabilan tekanan, baik berupa kenaikan maupun penurunan yang tidak normal, dapat menyebabkan gangguan operasional, penurunan efisiensi, hingga potensi risiko keselamatan yang signifikan [1].

Pada praktiknya, pemantauan tekanan gas di *regulating station* masih banyak dilakukan secara konvensional, yaitu hanya mengandalkan pembacaan sesaat dan alarm berbasis ambang batas (*threshold*) yang bersifat reaktif. Metode ini memiliki keterbatasan karena hanya memberikan respons setelah kondisi tidak normal terjadi, sehingga operator tidak memperoleh informasi kondisi tekanan secara berkelanjutan dan dari jarak jauh [2].

Perkembangan teknologi *Internet of Things* (IoT) membuka peluang untuk membangun sistem *monitoring* tekanan gas secara *real-time* dan terintegrasi. Mikrokontroler ESP32 menjadi salah satu platform yang banyak digunakan karena telah dilengkapi modul WiFi, kemampuan pemrosesan yang memadai, serta mendukung komunikasi data berbasis web secara langsung, sehingga data tekanan dapat dikumpulkan secara kontinu dan dikirimkan ke sistem pemantauan tanpa memerlukan infrastruktur PLC-SCADA konvensional yang mahal [3], [4], [5].

Penelitian ini secara khusus berfokus pada perancangan lapisan fisik (*physical layer*) dan lapisan siber (*cyber layer*) dari sebuah arsitektur *Cyber-Physical System* (CPS) untuk *monitoring* tekanan gas alam pada *regulating station*. Modul kecerdasan buatan dan dashboard web pada lapisan aplikasi turut dikembangkan dalam penelitian yang lebih luas, namun pembahasan pada makalah ini ditekankan pada sisi IoT, yaitu desain perangkat keras, *algoritma firmware* ESP32, dan mekanisme *fail-safe* berbasis *solenoid valve*, sedangkan sisi *dashboard web* hanya disinggung secara singkat sebagai bagian pelengkap sistem [6].

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan merancang dan mengimplementasikan arsitektur CPS berbasis ESP32 untuk memonitor tekanan gas alam secara *real-time* serta menjalankan mekanisme pengamanan otomatis melalui *solenoid valve* saat kondisi tidak normal terdeteksi, dan mengevaluasi kinerjanya dari sisi akurasi sensor, *latensi* komunikasi, dan *latensi* respons keselamatan.

II. Metode Penelitian

A. Arsitektur Sistem *Internet of Things* (IoT)

Sistem yang dikembangkan mengadopsi arsitektur *Cyber-Physical System* (CPS) tiga lapis yang terdiri dari *physical layer*, *cyber layer*, dan *application layer*. *Physical layer* terdiri dari komponen mekanis *regulating station*, meliputi pipa HDPE, ball valve, regulator, *pressure gauge*, dan *solenoid valve* tipe *Normally Open* (NO). *Cyber layer* menempatkan ESP32 sebagai *unit edge computing* yang membaca sinyal tekanan dan konsentrasi gas, mengklasifikasikan kondisi sistem, mengendalikan aktuatur, serta mengirimkan data ke *server* melalui HTTP REST API setiap 10 detik. *Application layer*, yang mencakup

SWITCH ON/OFF
(Saklar Utama)

Menghidupkan / mematikan sistem

DC 12V

CATU DAYA (POWER SUPPLY)

AC 220V

DC 12V

SENSOR PRESSURE TRANSMITTER
(Mengukur Tekanan)

TNR
(Sensor Gas Detector)

ESP32
(Kontrol Utama)

- BACA SENSOR
- LOGIKA SISTEM
- KONTROL OUTPUT

LCD 16x2

Pressure : 1.25 Bar
Gas : NORMAL

LED INDICATOR

POWER (HIJAU) NORMAL (KUNING) ALARM (MERAH)

INPUT RESET

PUSH BUTTON (RESET)

Digunakan untuk mereset sistem setelah kondisi STOP / ALARM. Sistem akan kembali ke kondisi standby / normal jika sensor sudah dalam kondisi aman.

BUZZER (ALARM)

Bunyi alarm saat kondisi tidak normal

RELAY

SOLENOID VALVE

Menutup aliran gas saat kondisi tidak normal

LED STATUS

ALARM (MERAH) WARNING (KUNING) NORMAL (HIJAU)

Indikator status sistem

KETERANGAN GARIS

- Sinyal / Data
- Catu Daya DC 12V
- Input Reset (Push Button)
- Alarm / Notifikasi

ALUR KERJA SISTEM

1. Switch ON/OFF di posisi ON (I) → sistem aktif.
2. Sensor Pressure Transmitter dan TNR (Sensor Gas Detector) membaca kondisi.
3. ESP32 memproses data dan mengambil keputusan.
4. Jika normal → sistem normal LED Hijau, solenoid valve terbuka.
5. Jika tidak normal → alarm aktif (buzzer, LED merah, solenoid valve tertutup).
6. Setelah kondisi aman, tekan Push Button (Reset) → sistem kembali standby/normal.

FUNGSI KOMPONEN TAMBAHAN

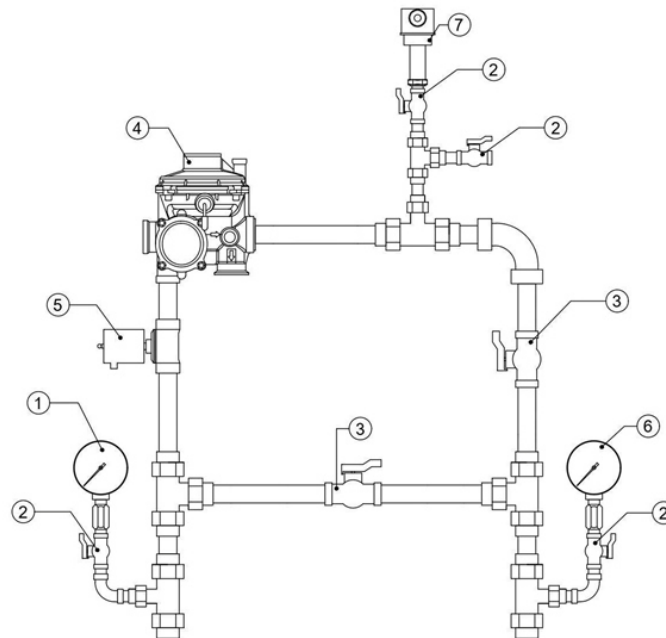
- Switch ON/OFF : Menghidupkan / mematikan seluruh sistem.
- Push Button : Mereset sistem setelah kondisi STOP / ALARM.
- LED Indikator : Menampilkan status sistem (Power, Normal, Alarm).
- LED STATUS & BUZZER : Alarm / peringatan saat kondisi tidak normal.

Konfigurasi pin ESP32 meliputi pin ADC (GPIO34) untuk *pressure transmitter*, pin I2C (GPIO21 = SDA, GPIO22 = SCL) untuk LCD 16x2, serta pin digital output untuk relay/*solenoid valve*, buzzer, dan LED indikator. Desain perangkat keras mengikuti prinsip *fail-safe*: pemilihan *solenoid valve* tipe *Normally Open* memastikan bahwa ketika sistem kehilangan daya, katup akan menutup secara otomatis sehingga mencegah aliran gas yang tidak terkendali [9], [10]. Parameter ambang batas (*threshold*) yang digunakan sebagai dasar klasifikasi kondisi ditunjukkan pada Tabel 1.

No	Parameter	Value
1	Setpoint Normal Tekanan	0,1 bar
2	Normal Min-Max Tekanan	0,090 - 0,15 bar
3	Drop Warning	$\leq 0,05$ bar
4	Drop Critical	$\leq 0,02$ bar
5	Spike Warning	$\geq 0,2$ bar

6	Spike Critical	$\geq 0,5$ bar
7	Gas Normal	0 - 900
8	Gas Low	901 - 2499
9	Gas Warning	2500 - 3499
10	Gas Critical	3500 - 4095

Konfigurasi mekanis *regulating station* yang menjadi objek penerapan sistem, lengkap dengan jalur perpipaan dan komponen pendukungnya, ditunjukkan pada Gambar 2.



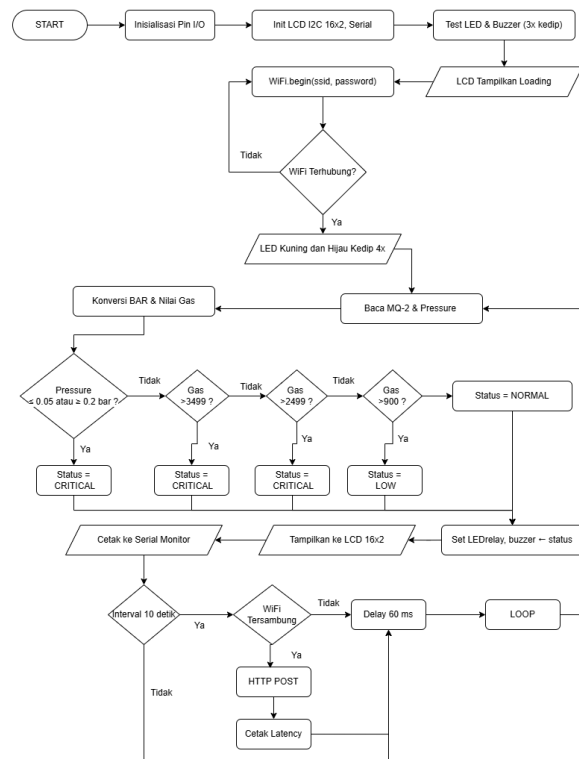
Gambar 2. Skema Perpipaan dan Komponen Fisik *Regulating Station*

Gambar 2 memperlihatkan tujuh komponen utama yang membentuk jalur perpipaan *regulating station* beserta cara kerjanya. Komponen (1) adalah *pressure gauge inlet* yang berfungsi mengukur tekanan gas pada sisi masuk sebelum gas memasuki regulator. Komponen (2) adalah *ball valve 1/2"* yang berfungsi membuka dan menutup aliran gas agar tekanannya dapat terbaca oleh *pressure gauge* dan *release* tekanan berlebih. Komponen (3) adalah *ball valve 1"* yang mengatur buka-tutup aliran *bypass* gas menuju sisi *outlet*. Komponen (4) adalah regulator ESKA yang berfungsi menurunkan tekanan gas dari nilai awal yang tinggi menjadi tekanan kerja yang lebih rendah sesuai dengan pengaturan yang diinginkan. Komponen (5) adalah *solenoid valve* yang berfungsi serupa dengan *ball valve*, namun dapat dikendalikan secara otomatis, berbeda dengan *ball valve* yang masih dioperasikan secara manual. Komponen (6) adalah *pressure gauge outlet* yang berfungsi mengukur tekanan gas pada sisi keluar setelah tekanan diturunkan oleh regulator. Komponen (7) adalah *pressure transmitter* yang berfungsi mengonversi sinyal tekanan yang bersifat analog menjadi data digital untuk selanjutnya ditampilkan pada *dashboard* pemantauan.

C. Perancangan Perangkat Lunak

Perangkat lunak yang ditanamkan pada ESP32 dirancang agar sistem dapat bekerja secara otomatis dan stabil sejak dinyalakan. Program diawali dengan inisialisasi pin I/O, LCD I2C 16x2, dan komunikasi serial, dilanjutkan dengan pengujian LED dan buzzer sebanyak tiga kali kedipan sebagai indikasi bahwa perangkat keras berfungsi, kemudian dilakukan koneksi WiFi menggunakan `WiFi.begin(ssid, password)`.

Setelah WiFi terhubung, ESP32 memasuki loop utama, yaitu membaca sinyal sensor MQ-2 dan *pressure transmitter*, mengonversinya menjadi nilai bar dan ppm gas, kemudian mengklasifikasikan kondisi berdasarkan aturan ambang batas berjenjang: tekanan $\leq 0,05$ bar atau $\geq 0,2$ bar dan/atau konsentrasi gas > 3499 dinyatakan *Critical*: gas 2500-3499 dinyatakan *Warning*: gas 901-2499 dinyatakan *Low*: selain itu dinyatakan Normal. Status ini ditampilkan pada LCD 16x2 dan dicetak ke serial monitor, sedangkan pada interval 10 detik data juga dikirim ke server melalui HTTP POST apabila WiFi tersambung, disertai pencatatan latency komunikasi [5], [11]. Alur logika lengkap program *firmware* ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Diagram Alir (Flowchart) Program *Firmware* ESP32

D. Lapisan Aplikasi (*Dashboard Web*)

Sebagai pelengkap sistem, data yang dikirim ESP32 juga diterima oleh *dashboard web* berbasis PHP dan MySQL untuk kebutuhan visualisasi dan penyimpanan data historis. Karena fokus pembahasan makalah ini adalah pada *physical* dan *cyber layer*, rincian implementasi *dashboard web* serta modul kecerdasan buatan (*Rule-Based Threshold*, *Isolation Forest*, *Fuzzy Logic*) pada *application layer* tidak dibahas secara mendalam dan dapat dilihat pada penelitian lanjutan yang lebih luas [12].

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Implementasi perangkat keras berhasil menjalankan seluruh fungsi yang direncanakan. ESP32 dapat mengambil data sensor secara teratur setiap 1 detik dan mengirimkan informasi ke *server* melalui HTTP REST API dengan rata-rata *latensi* di bawah 500 milidetik. Pengujian akurasi sensor *pressure transmitter* dilakukan pada empat titik referensi menggunakan *pressure gauge* terkalibrasi, dengan hasil ditunjukkan pada Tabel 2 [3], [13].

Tabel 2. Hasil Pengujian Akurasi Sensor *Pressure Transmitter*

Titik Uji	Hasil Pengujian
0,00	0,00 bar (error 0,00%)
0,03	0,029 bar (error 0,10%)
0,07	0,071 bar (error 0,10%)
0,10	0,099 bar (error 0,10%)

Hasil pengujian menunjukkan selisih pembacaan sistem terhadap nilai acuan hanya sebesar 0,001 bar atau setara kesalahan 0,10%, jauh lebih rendah dari ambang toleransi $\pm 1\%$ *Full Scale* yang ditetapkan. Hal ini menunjukkan bahwa rangkaian pengkondisian sinyal 4-20 mA ke tegangan bekerja secara linear dan akurat [14].

Pada pengujian mekanisme *fail-safe*, sistem klasifikasi kondisi berhasil mengubah indikator dari hijau (Normal) menjadi kuning (Waspada) dalam waktu kurang dari 1 detik setelah terjadi perubahan pembacaan sensor. Pada kondisi berbahaya, buzzer berbunyi secara terus-menerus dan *solenoid valve* menutup secara otomatis dalam waktu rata-rata 1,8 detik, memenuhi target spesifikasi *latensi* deteksi-ke-aksi $\leq 2,5$ detik [9].

Selain akurasi pengukuran, pengujian juga dilakukan terhadap performa komunikasi data antara ESP32 dan *server*, dengan hasil ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Pengujian Latensi Komunikasi ESP32-Server

Parameter	Nilai
Rata-rata Latensi API (ESP32 ke <i>Server</i>)	1015,5 ms
Latensi Minimum	509 ms
Latensi Maksimum	1579 ms
<i>Delay</i> Pembaruan <i>Dashboard</i>	0,80 s
Waktu Tulis <i>Database</i>	0,67 s
Tingkat Keberhasilan Komunikasi (54 <i>request</i>)	100% (54/54)

Sensor gas MQ-2 menunjukkan sensitivitas tinggi terhadap keberadaan gas dan asap, namun sensitivitas ini juga berisiko menimbulkan *false positive* akibat faktor lingkungan seperti asap rokok atau uap kimia lain, sehingga diperlukan kalibrasi ambang batas yang lebih tepat pada pengembangan berikutnya [5].

Mekanisme *safety shut-off* yang dijalankan *solenoid valve* tipe *Normally Open* dengan prinsip *fail-safe* menunjukkan kinerja yang andal, karena ketika terjadi kegagalan daya, aliran gas akan terputus secara otomatis tanpa bergantung pada logika kontrol perangkat lunak. Prinsip ini sejalan dengan praktik desain sistem keselamatan industri yang menempatkan kondisi aman sebagai status *default* [9].

Sebagai konteks pelengkap, lapisan aplikasi yang dikembangkan pada penelitian yang lebih luas menunjukkan bahwa integrasi metode *Rule-Based Threshold*, *Isolation Forest*, dan *Fuzzy Logic* pada *dashboard web* mampu mencapai akurasi deteksi anomali hingga 92,6%, namun pembahasan detail mengenai modul kecerdasan buatan dan *dashboard* tersebut berada di luar cakupan makalah ini [12], [15].

Sebagai gambaran ringkas atas hasil tersebut, performa ketiga metode pada dataset pengujian sebanyak 1.346 sampel (742 normal, 604 anomali) dirangkum pada Tabel 4 dan Tabel 5.

Tabel 4. Performa Komparasi Tiga Metode Deteksi Anomali

Metode	Acc.	Prec. (Norm.)	Recall (Norm.)	F1 (Norm.)	Prec. (Anom.)	AUC
Rule-Based	0.926	0.88	1.00	0.94	1.00	0.917
Isolation Forest	0.900	0.91	0.91	0.91	0.89	0.974
Fuzzy Logic	0.727	0.80	0.67	0.73	0.89	0.777

Rule-Based Threshold mencatatkan akurasi tertinggi (92,6%) dengan recall sempurna untuk kondisi normal, meskipun turut melewatkan sebagian data anomali. Isolation Forest menunjukkan kinerja paling seimbang dengan nilai AUC tertinggi (0,974), sedangkan Fuzzy Logic, meski akurasinya lebih rendah (72,7%), tetap kompetitif dalam presisi anomali dan mampu memberikan skor risiko kontinu untuk respons yang lebih proporsional.

Tabel 5. Perbandingan Kinerja Tiga Metode AI pada Dataset Pengujian

Metode	Akurasi	Precision (Anom.)	Recall (Anom.)	F1 (Weighted)	AUC
Rule-Based	0,926	1,00	0,834	0,918	0,917
Isolation Forest	0,900	0,89	0,889	0,900	0,974
Fuzzy Logic	0,727	0,89	0,669	0,730	0,777
Multi-Layer (Gabungan)	~0,94*	~0,91*	0,974*	~0,93*	~0,92*

Baris Multi-Layer (Gabungan) menunjukkan estimasi kinerja ketiga metode saat dijalankan bersama dalam skema cascade, yang secara konsisten melampaui kinerja masing-masing metode secara individual, terutama pada recall anomali yang mendekati 0,974. Sebagaimana disebutkan sebelumnya, detail penuh mengenai arsitektur dan pelatihan modul AI berada di luar cakupan makalah ini [12], [15].

Keunggulan utama sistem IoT yang dikembangkan adalah kemampuan *monitoring real-time* yang terintegrasi dengan tindakan pengamanan otomatis, serta biaya komponen yang relatif terjangkau (diperkirakan Rp1,5-2 juta untuk modul perangkat keras), sehingga dapat menjadi alternatif yang lebih ekonomis dibandingkan sistem berbasis PLC-SCADA konvensional [10].

E. Implementasi dan Pengujian Purwarupa Sistem

Untuk memvalidasi hasil pengujian pada Tabel 1 dan Tabel 2, sistem direalisasikan secara fisik dan diuji secara menyeluruh, mulai dari rangkaian perpipaan *regulating station*, modul kontrol IoT, hingga pengujian komunikasi data secara *real-time* ke dashboard web. Dokumentasi dan hasil desain perangkat ditunjukkan pada Gambar 4 sampai dengan Gambar 8.



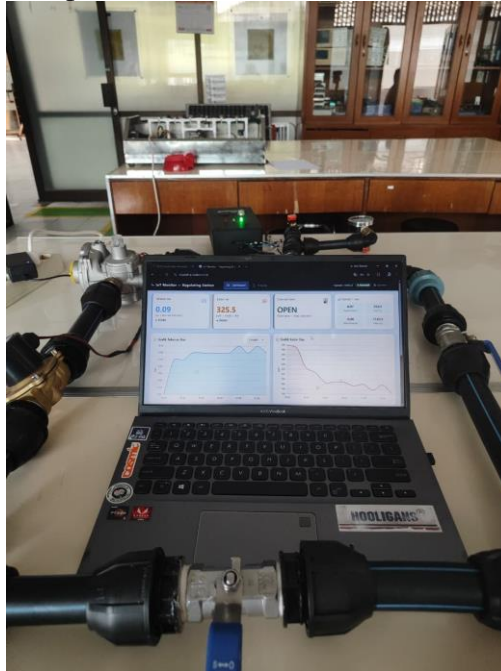
Gambar 4. Pengujian Perangkat Keras *Regulating Station*

Gambar 4 memperlihatkan proses pengujian awal perangkat keras dan kalibrasi sensor pada *regulating station* yang dibangun menggunakan rangkaian pipa HDPE, ball valve, *pressure regulator*, *pressure gauge*, serta *solenoid valve* tipe *Normally Open* (NO). Modul kontrol berbasis ESP32 dihubungkan langsung ke jalur perpipaan untuk membaca tekanan gas secara aktual, sementara laptop yang terhubung pada jaringan yang sama digunakan untuk memantau pembacaan sensor secara langsung melalui *dashboard web* selama proses pengujian berlangsung.



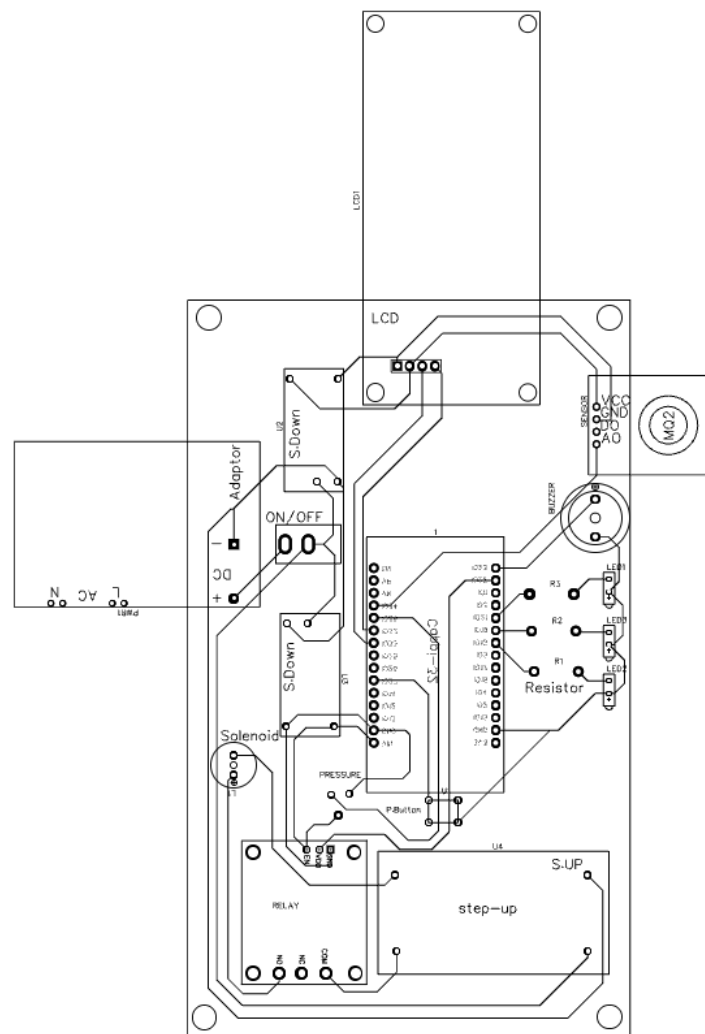
Gambar 5. Tampilan Modul Kontrol IoT dan Indikator LED

Gambar 5 menunjukkan tampilan modul kontrol IoT, lengkap dengan LCD 16x2 yang menampilkan nilai konsentrasi gas (G) dan tekanan (P) beserta status sistem, sensor gas MQ-2, tiga LED indikator (hijau/kuning/merah), push button *reset*, dan saklar ON/OFF. Pada kondisi pengujian ini, LCD menampilkan pembacaan G: 335 dan P: 0,10 bar dengan status NORMAL yang ditandai dengan indikator LED hijau menyala, menunjukkan bahwa sistem klasifikasi kondisi berbasis *rule-based threshold* bekerja sesuai dengan parameter ambang batas pada Tabel 1.



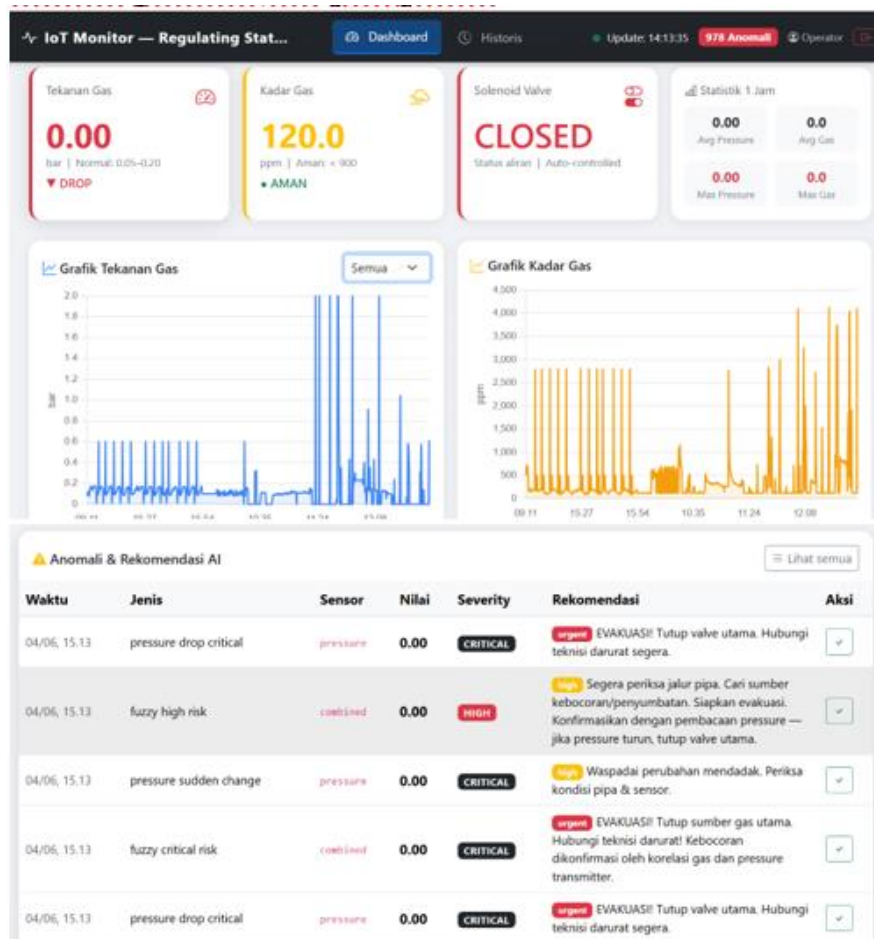
Gambar 6. Pengujian Sistem Secara *Real-Time* melalui *Dashboard Web*

Gambar 6 memperlihatkan pengujian integrasi menyeluruh antara perangkat keras dan *dashboard web* “IoT Monitoring Regulating Station” secara *real-time*. Pada saat pengujian, *dashboard* menampilkan tekanan gas 0,09 bar (status STABIL), kadar gas 325,5 ppm (status AMAN), serta status *solenoid valve* OPEN yang dikendalikan secara otomatis oleh sistem, disertai grafik tekanan dan kadar gas yang diperbarui secara berkala. Pengujian ini membuktikan bahwa data dari *physical layer* dapat dikirim oleh ESP32 melalui HTTP REST API dan ditampilkan pada *application layer* dengan *latensi* yang responsif.



Gambar 7. Desain PCB (*Printed Circuit Board*) Modul Kontrol Sistem

Gambar 7 menunjukkan hasil perancangan PCB modul kontrol sistem yang mengintegrasikan seluruh komponen perangkat keras pada satu papan rangkaian. ESP32 diletakkan sebagai pusat kendali yang terhubung dengan LCD 16x2, sensor gas MQ-2, tiga LED indikator beserta resistor pembatas arus, dan buzzer. Pada bagian bawah papan terdapat modul relay yang mengendalikan *solenoid valve* serta modul step-up untuk menyesuaikan level tegangan, sedangkan bagian catu daya terdiri dari adaptor AC-DC dan saklar ON/OFF utama. Perancangan PCB ini bertujuan untuk merapikan pengabelan, meningkatkan keandalan sambungan, serta mempermudah proses produksi dan perawatan modul kontrol IoT.



Gambar 8. Antarmuka *Dashboard Web Monitoring* dan Modul Deteksi Anomali AI

Gambar 8 menunjukkan antarmuka *dashboard web* pada kondisi anomali, sebagai bagian dari *application layer* yang dikembangkan pada penelitian yang lebih luas. *Dashboard* menampilkan status tekanan gas 0,00 bar (DROP), kadar gas 120 ppm (AMAN), serta status *solenoid valve* *CLOSED* yang tertutup secara otomatis (*auto-controlled*), dilengkapi grafik tekanan dan kadar gas serta tabel “Anomali dan Rekomendasi AI” yang mencatat jenis anomali seperti *pressure drop critical* dan *fuzzy high risk* beserta tingkat *severity* (Keparahan) dan rekomendasi tindakan bagi operator. Sebagaimana disebutkan pada bagian Metode Penelitian, rincian modul kecerdasan buatan dan *dashboard web* ini berada di luar cakupan utama makalah yang berfokus pada *physical* dan *cyber layer*.

IV. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil membuat dan menerapkan sistem pemantauan tekanan gas alam yang menggunakan IoT di stasiun pengatur, dengan ESP32 sebagai komponen utama untuk mengontrol seluruh sistem. Sistem ini bisa membaca data tekanan gas dan tingkat konsentrasi gas secara terus-menerus, lalu mengirimkan data tersebut ke *server* setiap 10 detik menggunakan *HTTP REST API*, sehingga kondisi stasiun penyetelan tekanan bisa dilihat secara langsung dan dalam tempo real dari jarak jauh melalui tampilan *web*.

Selain digunakan untuk memantau, sistem ini juga memiliki fitur keamanan otomatis yang bekerja berdasarkan prinsip *fail-safe*. Ketika sistem mendeteksi tekanan gas yang tidak wajar atau ada tanda-tanda

kebocoran, katup *solenoid valve* akan tertutup secara otomatis untuk menghentikan aliran gas, tanpa harus menunggu instruksi manual dari operator, sehingga meminimalkan risiko kecelakaan atau kerugian yang mungkin terjadi karena penanganan yang terlambat.

Hasil uji menunjukkan sistem memiliki performa yang sangat bagus, dengan kesalahan pengukuran tekanan hanya sebesar 0,10%, yang jauh lebih baik dibandingkan dengan standar toleransi yang ditentukan, yaitu $\pm 1\%$ dari skala penuh alat ukur. Selain itu, sistem juga memberikan respons yang cepat, yaitu dari saat kondisi bahaya terdeteksi hingga katup gas benar-benar tertutup membutuhkan rata-rata 1,8 detik, yang masih di bawah batas waktu keselamatan yang ditetapkan yaitu maksimal 2,5 detik.

Berdasarkan hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa sistem IoT yang dikembangkan mampu menjadi solusi untuk memantau dan mengamankan tekanan gas secara akurat, cepat, dan hemat biaya, sehingga memiliki potensi untuk diterapkan di *regulating station* skala kecil hingga menengah dalam meningkatkan keselamatan operasional. Meskipun begitu, penelitian ini masih perlu dikembangkan lebih lanjut, khususnya dalam hal mengkalibrasi sensor gas MQ-2 agar lebih akurat terhadap perubahan suhu dan kelembapan lingkungan, serta menerapkan protokol komunikasi yang lebih efisien seperti MQTT sebagai pengganti *HTTP REST API*, agar sistem bisa digunakan secara optimal dalam skala industri dengan jumlah titik pemantauan yang lebih banyak.

V. Daftar Pustaka

- [1] N. Mohd Nor, M. A. Razali, N. S. Adha Narrudin, M. Suzuki, A. Tarmizi Nasir, and A. Akhyan, "Bridging The Gap in Non-Process Energy Management: A Comprehensive Audit of A Power Plant Site Office in Power Generation Facilities Linked to Oil and Gas Operations," *Scientific Contributions Oil and Gas*, vol. 49, no. 1, pp. 137–158, Feb. 2026, doi: 10.29017/scog.v49i1.1937.
- [2] H. M. Hashemian and J. Jiang, "Pressure transmitter accuracy," *ISA Trans.*, vol. 48, no. 4, pp. 383–388, Oct. 2009, doi: 10.1016/j.isatra.2009.04.008.
- [3] S. Handaja, A. K. Dewi, and R. H. Triyanto, "Wireless Volume Corrector for Natural Gas Flow Metering Using ESP32 Microcontroller and Open-Source Web Server," *JOIV: International Journal on Informatics Visualization*, vol. 8, no. 3, p. 1303, Sep. 2024, doi: 10.62527/joiv.8.3.2160.
- [4] W. He, M. J. A. Baig, and M. T. Iqbal, "An Open-Source Supervisory Control and Data Acquisition Architecture for Photovoltaic System Monitoring Using ESP32, Banana Pi M4, and Node-RED," *Energies (Basel)*, vol. 17, no. 10, p. 2295, May 2024, doi: 10.3390/en17102295.
- [5] A. Hasan Ali, A. Hussein Duhis, N. Aad Lafta Alzurfi, and M. Jabbar Mnati, "Smart monitoring system for pressure regulator based on IOT," *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, vol. 9, no. 1, 2019, doi:10.11591/ijece.v9i5.pp3450-3456
- [6] M. K. Hasan *et al.*, "Smart grid cyber-physical systems: Components, vulnerabilities, mitigations, opportunities, and conceptual framework," *Energy Reports*, vol. 15, p. 109255, Jun. 2026, doi: 10.1016/j.egyr.2026.109255.
- [7] P. P. Ray, "A survey on Internet of Things architectures," *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, vol. 30, no. 3, pp. 291–319, Jul. 2018, doi: 10.1016/j.jksuci.2016.10.003.
- [8] J. A. Gaikwad and O. Ghodke, "LPG Gas Leakage Detection using ESP32," *International Scientific Journal of Engineering and Management*, vol. 03, no. 11, pp. 1–6, Nov. 2024, doi: 10.55041/ISJEM02131.
- [9] C. D. Fay, J. P. Healy, and D. Diamond, "Advanced IoT Pressure Monitoring System for Real-Time Landfill Gas Management," *Sensors*, vol. 23, no. 17, Sep. 2023, doi: 10.3390/s23177574.

-
- [10] M. R. Pradana, R. F. Ramadhan, and M. S. S. Putra, "RANCANG BANGUN SAFETY INSTRUMENTED SYSTEM PADA METERING REGULATING STATION," *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Energi dan Mineral*, vol. 4, no. 1, pp. 449–456, Dec. 2024, doi: 10.53026/prosidingsntem.v4i1.173.
 - [11] N. Afiyat, E. K. Pramartaningthya, and A. Prasetyo, "IoT-Based LPG Gas Leak Detection System for Real-Time Household Safety Monitoring Integrated with Telegram Bot Notifications," *G-Tech: Jurnal Teknologi Terapan*, vol. 10, no. 1, pp. 140–151, Jan. 2026, doi: 10.70609/g-tech.v10i1.8650.
 - [12] A. A. Mirani, A. Awasthi, N. O'Mahony, and J. Walsh, "Industrial IoT-Based Energy Monitoring System: Using Data Processing at Edge," *IoT*, vol. 5, no. 4, pp. 608–633, Sep. 2024, doi: 10.3390/iot5040027.
 - [13] I. Behnke and H. Austad, "Real-Time Performance of Industrial IoT Communication Technologies: A Review," *IEEE Internet Things J.*, vol. 11, no. 5, pp. 7399–7410, Mar. 2024, doi: 10.1109/JIOT.2023.3332507.
 - [14] A. Al-Fuqaha, M. Guizani, M. Mohammadi, M. Aledhari, and M. Ayyash, "Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 17, no. 4, pp. 2347–2376, Oct. 2015, doi: 10.1109/COMST.2015.2444095.
 - [15] Susanna and M. Murdianto, "Pengujian Alat Bantu Ajar Praktikum Sensor Dan Aktuator Berbasis Internet Of Things (IoT) ESP8266 Menggunakan Aplikasi Blynk Dan ThingSpeak," *PoliGrid*, vol. 5, no. 2, Nov. 2024, doi: 10.46964/poligrid.v5i2.51.