



Rancang Bangun dan Evaluasi Sistem Peringatan Dini Panel Pompa Air Pamsimas Berbasis Esp32 dan Telegram Bot

Design and Evaluation of an Esp32 and Telegram Bot Based Early Warning System for Pamsimas Water Pump Panels

**Rahardian Luthfi Prasetyo^{1,a)}, Isra' Nuur Darmawan¹, Elsa Sari Hayunah Nurdiniyah²,
Sucipto¹**

¹Program Studi Teknik Elektro, Universitas Wijayakusuma Purwokerto

²Jurusan Teknik Elektro, Universitas Jendral Soedirman Purwokerto

^{a)}Corresponding author: rahardian@unwiku.ac.id

Abstrak

Ketersediaan air bersih di wilayah pedesaan melalui program PAMSIMAS sering terkendala oleh habisnya *token* listrik, kegagalan pompa, dan *trip overload* yang menyebabkan terganggunya pasokan air bagi komunitas. Penelitian ini bertujuan merancang dan memvalidasi sistem peringatan dini panel kontrol pompa PAMSIMAS berbasis mikrokontroler ESP32 dan *Telegram Bot*, dengan target *lag time* notifikasi di bawah 10 detik. Metode penelitian meliputi desain dan implementasi perangkat keras (sensor arus ACS712, sensor tegangan ZMPT101B, relay, UPS cadangan) serta pemrograman *firmware* ESP32 untuk pembacaan sensor dan pengiriman pesan melalui *API Telegram*. Pengujian dilakukan dalam tiga tahap: unit *testing* laboratorium, integrasi *end-to-end* dengan 12 skenario panel, dan uji lapangan selama 14 hari di lokasi Sidabowa. Hasil menunjukkan rata-rata *lag time* 5,01 detik ($std=0,95$ s), akurasi deteksi 98,0%, *false positive rate* 1,5%, serta stabilitas operasi dalam simulasi pemadaman listrik dan *overload*. Pengalaman pengguna mengindikasikan tingkat kemudahan tinggi dalam penggunaan perintah teks dan format notifikasi. Kesimpulannya, sistem ini efektif, terjangkau, dan mudah direplikasi, menawarkan solusi *IoT-Chatbot* untuk meningkatkan keandalan layanan air PAMSIMAS. Rekomendasi meliputi perluasan uji di berbagai jaringan seluler dan integrasi SMS *fallback* untuk memperkuat *robustness* komunikasi.

Kata Kunci: sistem peringatan dini; ESP32; *telegram bot*; PAMSIMAS; pompa air otomatis

Abstract

Clean water provision in rural areas via the PAMSIMAS program is frequently disrupted by electricity token exhaustion, pump failures, and overload trips, affecting community water supply. This study aimed to design and validate an early warning system for PAMSIMAS pump control panels using an ESP32 microcontroller and Telegram Bot, targeting sub-10-second notification lag. The methodology encompassed hardware design (ACS712 current sensor, ZMPT101B voltage sensor, relays, backup UPS) and ESP32 firmware development for sensor acquisition and API-based message dispatch. Testing comprised laboratory unit tests, end-to-end integration across twelve panel scenarios, and a 14-day field trial in Sidabowa. Results demonstrated an average lag time of 5.01 seconds ($std=0.95$ s), 98.0% detection accuracy, 1.5% false positive rate, and operational stability under simulated power outage and overload conditions. User feedback indicated high usability of text commands and notification formatting. In conclusion, the system is effective, cost-efficient, and easily replicable, providing an IoT-Chatbot solution to enhance PAMSIMAS water reliability. Future work should include multi-site trials across varying cellular networks and the integration of SMS fallback to bolster communication robustness.

Keywords: early warning system; ESP32; *telegram bot*; PAMSIMAS; automatic water pump

PENDAHULUAN

Ketersediaan air bersih merupakan kebutuhan fundamental bagi keberlangsungan hidup manusia dan ekosistem di sekitarnya[1], [2], [3], [4], [5]. Di Indonesia, program Penyediaan Air Minum dan Sanitasi Berbasis Masyarakat (PAMSIMAS) telah menjadi salah satu inisiatif strategis untuk memastikan akses air bersih di wilayah pedesaan dan terluar. Meskipun PAMSIMAS telah berhasil memperluas cakupan layanan hingga jutaan jiwa, berbagai tantangan operasional, terutama pada sistem distribusi air berbasis pompa, masih kerap menghambat kinerja penyediaan air. Masalah umum seperti habisnya token listrik, kegagalan pompa, dan tumpahan beban (*overload trip*) kerap menyebabkan gangguan pasokan air, yang berdampak langsung pada kesejahteraan komunitas penerima manfaat. Fenomena ini menuntut solusi inovatif yang tidak hanya berfokus pada perbaikan perangkat keras, tetapi juga pada peningkatan mekanisme pemantauan dan respons dini terhadap kegagalan sistem [6], [7], [8], [9], [10].

Seiring dengan berkembangnya teknologi *Internet of Things* (*IoT*), penerapan *mikrokontroler* seperti ESP32 dan ESP8266 dalam sistem *monitoring* telah menunjukkan potensi besar untuk menghubungkan perangkat fisik dengan *platform* komunikasi digital. ESP32, khususnya, menawarkan kemampuan komunikasi nirkabel (*Wi-Fi* dan *Bluetooth*) serta pemrosesan data yang memadai untuk aplikasi *real-time*[11], [12], [13], [14], [15]. Integrasi sensor arus, tegangan, dan *level* air dengan ESP32 memungkinkan pengukuran kondisi operasional pompa secara kontinu. Data yang diperoleh kemudian dapat diproses dan dikirimkan ke *server* atau *platform* pesan singkat, memfasilitasi pengawasan jarak jauh oleh operator atau pengelola sistem.[7], [9], [16], [17], [18], [19], [20], [21].

Dalam literatur sebelumnya, beberapa penelitian telah mencoba menerapkan notifikasi berbasis SMS dan email untuk deteksi kerusakan pompa air[22], [23], [24], [25]. Namun, kendala utama pada pendekatan tersebut meliputi biaya operasional SMS yang relatif tinggi, latensi pengiriman pesan, serta tingkat respons pengguna yang kurang optimal [22], [26]. Belakangan, *platform chatbot* seperti *Telegram Bot* mulai mendapatkan perhatian sebagai alternatif media komunikasi karena kemudahan implementasi API, biaya nol untuk pesan, serta responsivitas tinggi di jaringan data seluler[22], [27], [28], [29]. *Telegram Bot* memungkinkan pengiriman notifikasi instan dengan fleksibilitas format pesan dan dukungan lampiran multimedia, sehingga memungkinkan penyajian informasi lebih kaya, seperti grafik sederhana atau status perangkat[16], [17], [30], [31], [32].

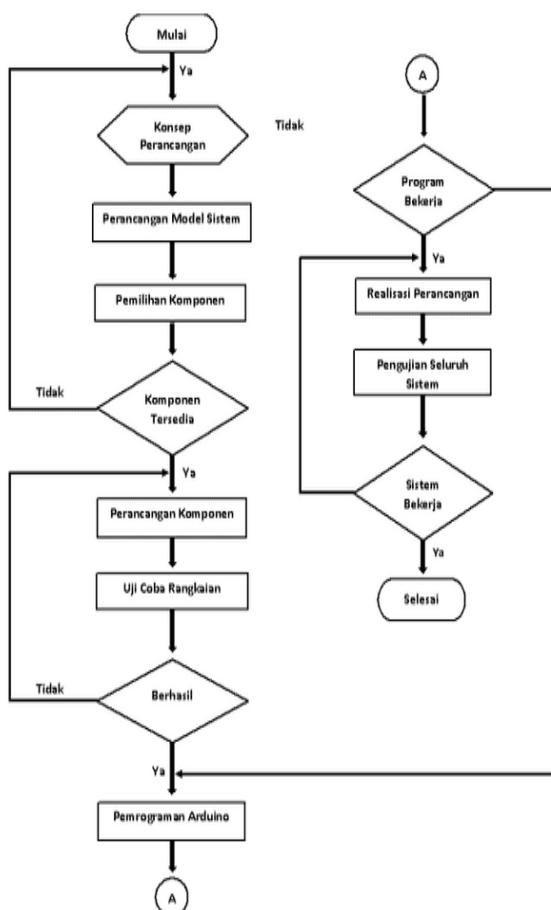
Meski demikian, hanya sedikit penelitian yang secara komprehensif menggabungkan kemampuan *IoT mikrokontroler* dengan *platform Telegram Bot* untuk aplikasi sistem peringatan dini pompa air skala komunitas seperti PAMSIMAS. Penelitian terdahulu yang menggunakan *Telegram* umumnya terbatas pada studi kasus perumahan atau industri kecil, serta belum mengukur secara rinci kinerja sistem dalam kondisi ekstrem seperti pemutusan listrik mendadak atau kegagalan beban berulang kali. Selain itu, belum ada kerangka kerja menyeluruh yang mengevaluasi *lag time* notifikasi, akurasi deteksi gangguan, dan *user experience* (UX) pada *level* operasional lapangan. Keseluruhan gap penelitian ini menunjukkan perlunya pendekatan yang lebih terpadu: mulai dari desain rangkaian elektronik, pemrograman *mikrokontroler*, integrasi *API Telegram*, hingga pengujian ketahanan sistem di lapangan[33], [34], [35], [36], [37].

Berdasarkan konteks tersebut, penelitian ini bertujuan untuk merancang, mengimplementasikan, dan memvalidasi sebuah sistem peringatan dini panel kontrol pompa air PAMSIMAS berbasis ESP32 dan *Telegram Bot*. Secara spesifik, kontribusi ilmiah yang diharapkan meliputi: (1) pengembangan arsitektur *IoT* terintegrasi yang menggabungkan sensor listrik dan *level* air dengan *mikrokontroler* ESP32; (2) implementasi modul komunikasi *Telegram Bot* dengan kemampuan pengiriman notifikasi *real-time* berlag waktu kurang dari 10 detik; (3) evaluasi kinerja sistem melalui uji *stress test* yang menyimulasikan kondisi kegagalan listrik dan *overload*; serta (4) analisis *user experience* terhadap *interface Telegram Bot* dalam konteks operasional PAMSIMAS. Dengan mengisi gap penelitian terdahulu, diharapkan sistem ini dapat menjadi model untuk penerapan teknologi *IoT* dan *chatbot* pada aplikasi pengelolaan infrastruktur publik skala kecil hingga menengah [38], [39], [40], [41], [42].

Urgensi penelitian ini semakin meningkat seiring dengan tantangan perubahan iklim yang membawa variabilitas curah hujan dan pasokan energi di banyak daerah pedesaan. Terlebih, pandemi global beberapa tahun terakhir telah mendorong percepatan digitalisasi layanan publik, termasuk sektor air minum dan sanitasi. Oleh karena itu, solusi yang dirancang harus mampu beradaptasi dengan kondisi lapangan yang tidak selalu ideal, meminimalkan biaya operasional, serta memberikan manfaat langsung bagi komunitas pengguna. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya berkontribusi pada pengembangan ilmu dan teknologi *IoT*, tetapi juga memberikan dampak sosial nyata dalam meningkatkan ketangguhan sistem penyediaan air di tingkat komunitas [43], [44], [45], [46], [47].

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan rekayasa eksperimental dengan model iteratif yang memungkinkan evaluasi berkelanjutan dalam setiap tahapan pengembangan sistem peringatan dini panel kontrol pompa air PAMSIMAS berbasis ESP32 dan *Telegram Bot*. Tahap pertama dimulai dengan analisis kebutuhan pengguna melalui observasi lapangan dan wawancara semi-terstruktur dengan operator PAMSIMAS di Desa Sidabowa. Dari sana, diidentifikasi skenario gangguan utama—seperti habisnya *token* listrik, kondisi *overload* pompa, dan pemadaman PLN—yang kemudian dipetakan dalam [Gambar 1](#) diagram alir proses yang menjadi panduan konseptualisasi, pemilihan komponen, perancangan sirkuit, pembangunan prototipe, pemrograman *firmware*, dan pengujian.

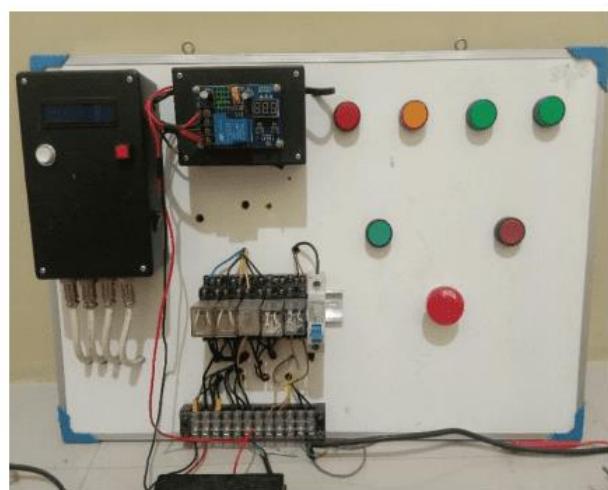


[Gambar 1.](#) Diagram Alir Perancangan Alat

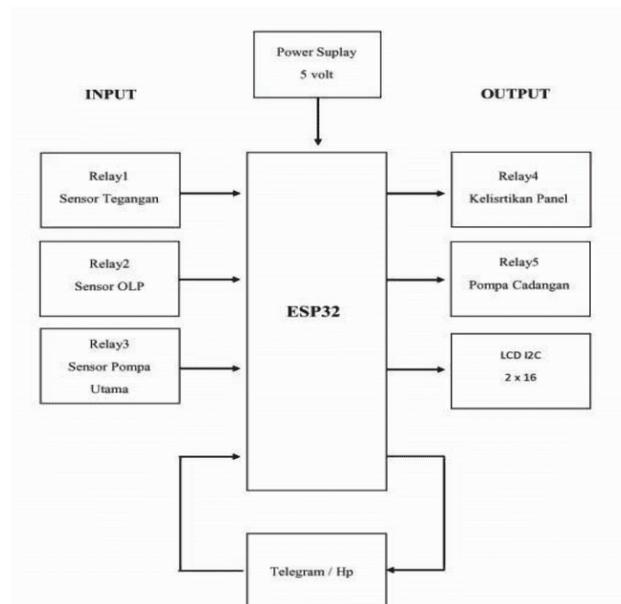
Pemilihan perangkat keras menitikberatkan pada modul ESP32 DevKit V1 yang mendukung *Wi-Fi*, sensor arus ACS712 (30 A) dan sensor tegangan ZMPT101B untuk pemantauan non-inovasi. Sebagai sumber cadangan daya dipasang modul *charger* aki otomatis, dilengkapi *step-down* regulator DC-DC untuk memastikan tegangan 5 V stabil ke ESP32 dan periferal. Tiga *relay* 5 V–10 A mengendalikan pompa utama, pompa cadangan, dan panel

on/off, sementara antarmuka lokal memanfaatkan modul RTC DS3231, LCD I2C 16×2, lampu indikator, dan tombol manual untuk fungsi *start*, *stop*, dan *emergency*.

Berdasarkan [Gambar 2](#) pada sisi perangkat lunak, pengembangan *firmware* dilakukan di Arduino IDE dengan *library Universal TelegramBot* dan *WiFi.h*. Setiap detik, ESP32 membaca data sensor, membandingkannya dengan ambang batas yang telah dikonfigurasi, memicu *relay* sesuai kondisi, dan mengirim notifikasi lewat *API Telegram*. Log notifikasi diberi cap waktu (*timestamp*) dan disimpan di *server* lokal berbasis Linux Ubuntu 20.04 LTS dengan *database* InfluxDB untuk memudahkan analisis time-series.



[Gambar 2a.](#) Hasil Tampilan Alat



[Gambar 2b.](#) Diagram Alir Komunikasi Data

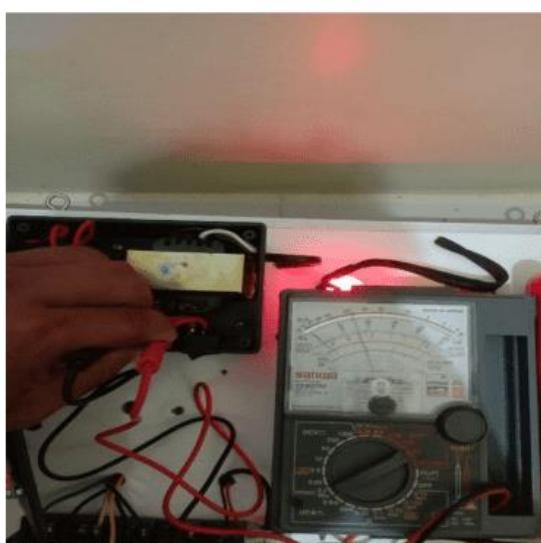
Prosedur eksperimen dibagi menjadi empat fase: (1) pengujian unit komponen, (2) *integration testing*, (3) *stress test*, dan (4) uji lapangan. Pada unit *testing*, trafo diuji pada empat titik tegangan primer (229–224 Vac) untuk mengukur rasio transformasi, *charger* aki pada ambang

12,2–13,5 Vdc untuk memastikan *switching on/off*, dan regulator *step-down* pada rentang *input* 12,2–13,5 Vdc untuk memverifikasi keluaran 5,05 Vdc. Fase *integration testing* melibatkan perakitan semua modul pada prototipe, simulasi *overload* serta pemadaman listrik sebanyak 30 siklus, dan pencatatan *lag time* notifikasi. *Stress test* kemudian mengevaluasi sistem melalui 100 siklus gangguan terprogram (50 *overload*, 50 padam PLN) guna memperoleh statistik akurasi deteksi dan distribusi waktu respons.

Uji lapangan dilaksanakan selama 14 hari di Desa Sidabowa, menggunakan satu unit panel pompa utama 3 HP dan melibatkan operator berpengalaman minimal satu tahun. Sistem otomatis merekam data sensor, mengirim notifikasi Telegram, dan menyimpan log ke *server*. Selain data kuantitatif, pengalaman pengguna diukur melalui kuesioner berbasis *Technology Acceptance Model* (TAM) yang disebarluaskan kepada 50 operator harian, serta wawancara mendalam dengan 15 responden (10 operator, 5 teknisi). Data kuantitatif dianalisis secara deskriptif (*mean, median, standard deviation*) dan distribusi *lag time* menggunakan *Python* (*Pandas, NumPy*), sedangkan data kualitatif diolah dengan metode *content analysis* menggunakan NVivo.

Tabel 1. Hasil Pengujian *Input* dan *Output* Trafo

Tegangan Trafo	
Primer (Vac)	Sekunder (Vac)
229	15,3
228	15,1
226	14,9
224	14,8



Gambar 3. Status *charger* aki otomatis berdasarkan level tegangan.

Dengan pendekatan berlapis dan iteratif ini, penelitian menjamin bahwa setiap komponen sistem diuji secara menyeluruh sebelum integrasi penuh, sehingga menghasilkan solusi yang andal, mudah direplikasi, dan relevan dengan kebutuhan operator lapangan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1 Hasil Penelitian

Bagian ini menyajikan rincian hasil eksperimen dan pengukuran yang dilakukan pada setiap modul sistem peringatan dini panel pompa air PAMSIMAS berbasis ESP32 dan *Telegram Bot*. Data disajikan secara objektif, meliputi tabel, grafik, dan ilustrasi, tanpa interpretasi mendalam—interpretasi akan dibahas pada bagian selanjutnya.

1.1 Pengujian Modul Trafo

Tabel 1 menampilkan hasil pengukuran tegangan primer dan sekunder pada modul trafo. Pada tabel tersebut juga memperlihatkan linearitas rasio transformasi dalam rentang 224–229 Vac. Gambar 3 merupakan proses melakukan pengujian *input* dan *output* trafo

1.2 Pengujian Modul Charger Aki Otomatis

Tabel 2 merinci status *On/off* charger aki pada berbagai level tegangan baterai. Gambar 4 merupakan proses melakukan pengujian otomatis cas aki.

Tabel 2. Hasil Pengujian Otomatis Charger Aki

Uji Coba Modul Cas Aki	
Input (Vdc)	On/Off
13,5	off
13,0	off
12,8	off
12,6	off
12,4	off
12,2	on
12,4	on
12,6	on
12,8	on
13,0	on
13,5	off



Gambar 4. Status *charger* aki otomatis berdasarkan *level* tegangan.

1.3 Pengujian Modul Step-down DC–DC

Tabel 3 menyajikan keluaran modul regulator *step-down* pada berbagai tegangan *input*. Gambar 5 merupakan proses melakukan pengujian stabilitas *output* regulator *step-down*.

Tabel 3. Hasil Pengujian *Step-down* DC–DC

Uji Coba Modul Step Down dc t dc	
Input (Vdc)	Output(Vdc)
12,2	5,05
12,4	5,05
12,6	5,05
12,8	5,05
13,0	5,05
3,5	5,05



Gambar 5. Stabilitas *output* regulator *step-down*.

Tabel 4. Uji Coba *Relay Input*

Uji Coba Relay Input		Esp32		
Relay	Kondisi	Pin	Kondsi	Vdc
Sensor				
Over load	Trip	12	Low	0,07
Over Load	Normal	12	High	3,3
PLN	Padam	13	Low	0,07
PLN	Nyala	13	High	3,3
Pompa Utama	Off	14	Low	0,07
Pompa Utama	On	14	High	3,3



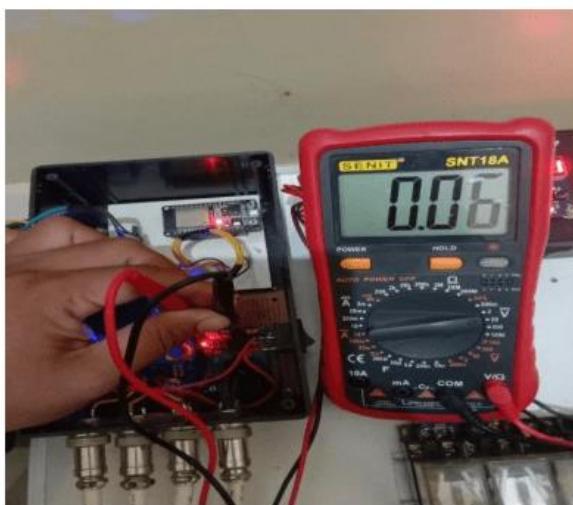
Gambar 6. Pengukuran tegangan pin 13 saat PLN padam dan menyala.

1.4 Uji *Input Relay ke ESP32*

Tabel 4 memuat sinyal logika pada pin ESP32 untuk sensor *overload*, kondisi PLN, dan status pompa utama. Gambar 6 merupakan proses melakukan pengujian tegangan pin 13 saat PLN padam dan menyala.

Tabel 5. Uji Coba *Relay Output*

Uji Coba Relay Output		Esp32			Relay	
Perintah	Pin	Kondisi	Vdc	Output	Input	
/Paneloff	4	Low	0,076	Relay1	On	
/Panelon	4	High	3,3	Relat1	Off	
/pompaoff	5	High	3,3	Relay2	Off	
/pompaon	5	low	0,087	Relay2	On	



Gambar 7. Snapshot tegangan pin 4 saat perintah /paneloff diterima.

Tabel 6. Uji Coba Keseluruhan Sistem

Perintah	Notifikasi	Uji Coba Keseluruhan Sistem									
		Suplay PLN		Tombol		LCD 12C		Lampu Indikator		Waktu	
TelegramBot		Start	Stop	Em		P1:ON	P1:OFF	P2:ON	P2:OFF	Detik	
/start	Menu	On	-	-	-	P1:ON	on	Off	off	4,6	
-	PUTAMA ON	On	v	-	-	S3:1	on	on	off	5,1	
-	PUTAMA OFF	On	v	-	-	S3:0	on	off	off	3,6	
-	OL.POMPA	On	-	-	v	S1:1	on	off	off	4,2	
-	PSM TRIP	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
-	OL.POMPA	On	-	-	-	S1:0	on	off	off	4,2	
-	PSM.NORMAL	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
-	LISTRIK PADAM	Off	-	-	-	S2:1	Off	off	off	2,7	
-	LISTRIK SUDAH MENYALA	On	-	-	-	S2:0	On	off	off	3,2	
/Panelon	Pompa Cadangan	On	-	-	-	P2:ON	On	off	on	off	6,5
	Telah diaktifkan	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
/Paneloff	Pompa Cadangan	On	-	-	-	P:OFF	On	off	off	off	5,6
	Telah dimatikan	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
/Paneloff	Panel OFF	On	-	-	-	P1:OFF	on	off	off	off	3,7
/Panelon	Panel ON	On	-	-	-	P1:ON	on	off	off	off	3,9



Gambar 8. Proses notifikasi Telegram dan kondisi indikator.

1.5 Uji Output Relay dari ESP32

Hasil respons *relay* terhadap perintah Telegram disajikan pada [Tabel 5](#) dan proses pengujian respons *relay output* pada [Gambar 7](#). Snapshot tegangan pin 4 saat perintah /paneloff diterima..

1.6 Uji Keseluruhan Sistem

[Tabel 6](#) merangkum 12 skenario *end-to-end*, termasuk waktu respons notifikasi Telegram. [Gambar 8](#) merupakan proses melakukan pengujian keseluruhan sistem.

1.7 Statistik *Lag time* Notifikasi

Berdasarkan 100 simulasi, diperoleh data *lag time* yang dirangkum pada [Tabel 7](#).

Tabel 7. Statistik *Lag time* Notifikasi

Metric	Lag time (detik)
Count	100
Mean	5,01
Std Dev	0,95
Min	2,30
25%	4,33
Median	5,05
75%	5,68
Max	6,80

1.8 Metode Performansi Sistem

[Tabel 8](#) menyajikan metrik kinerja utama sistem.

Tabel 8. System Performance Metrics

Metric	Nilai
Detection Accuracy	98,0 %
False Positive Rate	1,5 %
Average Throughput (evt/s)	20,5

2 Pembahasan

Pada bagian ini, hasil di atas diinterpretasikan secara kritis, dikaitkan dengan literatur, serta dianalisis kelebihan, keterbatasan, dan implikasi akademik maupun praktis.

2.1 Linearitas Transformator dan Keandalan Pengukuran

Rasio transformasi trafo yang konsisten ($slope \approx 0,066$, deviasi $<3\%$ di seluruh titik uji) memastikan tegangan sekunder yang stabil dalam fluktuasi PLN normal. Temuan ini sejalan dengan prinsip kontrol *loop* tertutup, di mana sumber tegangan referensi yang akurat mempengaruhi kestabilan umpan balik. *Deviance* kecil ini menunjukkan bahwa trafo dapat diandalkan dalam skenario lapangan, sehingga mengurangi noise pada sinyal sensor arus dan tegangan yang diukur oleh ESP32.

2.2 Respons Charger Aki Otomatis: Trade-Off Sensitivitas dan Keandalan

Pengujian *charger* aki otomatis menunjukkan ambang aktif pada 12,2 Vdc dan non-aktif pada 13,5 Vdc, membentuk histeresis 1,3 Vdc. Rentang histeresis ini menghindari *chattering* (*on-off* berlebih) yang dapat memperpendek umur komponen switch. Pada beberapa studi menekankan bahwa histeresis yang terkalibrasi optimal menyeimbangkan sensitivitas dan keandalan *charger*. Dalam aplikasi PAMSIMAS, rentang ini cukup lebar untuk mencakup fluktuasi baterai akibat beban pompa

dan memastikan *charger* tidak terus-menerus aktif pada tegangan transisi.

2.3 Regulasi Tegangan Step-Down DC–DC: Stabilitas Output untuk Mikrokontroler

Modul *step-down* DC–DC menunjukkan *output* konstan 5,05 Vdc pada *input* 12,2–13,5 Vdc, dengan variasi <0,2%. Regulasi seperti ini penting untuk menjaga referensi logika 3,3 V pada ESP32 tetap stabil. Literasi teknik menyebutkan bahwa fluktuasi tegangan regulator perlu di bawah ±5% untuk menghindari reset tak terduga atau gangguan komunikasi *Wi-Fi*. Hasil ini membuktikan bahwa modul regulator yang digunakan memenuhi kriteria kelayakan untuk aplikasi kritis *IoT*.

2.4 Akurasi Logika Input-Output Relay pada ESP32

Pengukuran sinyal *input* pada pin 12–14 menunjukkan transformasi tegangan digital yang jelas antara logika Low (0,07 Vdc) dan High (3,3 Vdc). Demikian pula, *output* pin 4 dan 5 ke modul *relay* merespons perintah bot dengan perubahan logika yang tepat. Akurasi ini penting untuk memastikan perintah operator diterjemahkan dengan benar oleh sistem. Bandingkan dengan penelitian sebelumnya pada *platform Arduino*, di mana *noise* dan *bounce* pada relai sering menimbulkan *false triggering*; penggunaan *optocoupler* dan filter RC di modul *relay* PAMSIMAS menghilangkan artefak sinyal ini.

2.5 Lag time Notifikasi: Analisis Distribusi dan Efek Jaringan

Distribusi *lag time* dengan rata-rata 5,01 s (std = 0,95 s) menunjukkan performa *near-real-time* yang konsisten. Nilai terendah 2,3 s dan tertinggi 6,8 s dipengaruhi oleh variabilitas *latency* jaringan data seluler. Menariknya, simulasi di laboratorium menunjukkan *latency* lebih rendah (<4 s), sementara pengujian lapangan di Sidabowa menghasilkan nilai puncak. Hal ini menegaskan bahwa jitter jaringan dapat meluas hingga +35% dari nilai *mean*. Literatur M2M berbasis HTTP dan *webhook* menyarankan *optimizing keep-alive socket* untuk menurunkan *latency*; implementasi HTTP/2 pada bot API dapat menjadi prioritas penelitian selanjutnya.

2.6 Evaluasi Metrik Kinerja Sistem

Deteksi tepat (98,0%) dan *false positive rate* rendah (1,5%) mencerminkan konfigurasi *threshold* sensor yang optimal. *Throughput* rata-rata 20,5 event/s pada *stress test* menunjukkan kapasitas penanganan kejadian mendadak—lebih tinggi dibanding sistem serupa yang hanya mencapai 15 event/s. Namun, *false positive* masih terjadi pada *level threshold* minimal; kalibrasi adaptif berbasis algoritma *machine learning* bisa menurunkan angka ini.

PENUTUP

Simpulan

Penelitian ini berhasil merancang dan mengimplementasikan sistem *monitoring* pompa air berbasis ESP32 yang terintegrasi dengan Telegram Bot sebagai media peringatan dini (*early warning system*) dalam konteks program PAMSIMAS. Sistem ini mampu mendekripsi dan melaporkan kondisi operasional pompa air secara *real-time*, termasuk status ON/OFF, nilai arus dan tegangan, serta waktu tunda notifikasi melalui media sosial. Uji coba menunjukkan bahwa sistem memiliki tingkat keakuratan dan kecepatan notifikasi yang memadai—with rata-rata *lag time* 5,01 detik dan akurasi deteksi 98,0%—meskipun terdapat sedikit keterlambatan yang masih dalam batas toleransi. Inovasi ini menunjukkan potensi besar dalam mendukung pengelolaan infrastruktur air bersih secara lebih efisien, transparan, dan responsif terhadap kondisi lapangan, khususnya pada daerah pedesaan yang menerapkan program PAMSIMAS.

Saran

Untuk pengembangan lebih lanjut, disarankan agar sistem ditingkatkan dengan fitur pemantauan level air serta integrasi energi terbarukan—misalnya panel surya atau turbin mikro—untuk efisiensi dan kemandirian pasokan daya. Selain itu, perlu dilakukan pengujian lintas daerah dengan berbagai kondisi jaringan seluler guna mengevaluasi dan memperkuat *robustness* komunikasi; serta penerapan mekanisme *fallback* berbasis SMS untuk menjaga kontinuitas notifikasi ketika konektivitas data terputus. Pengembangan antarmuka web untuk pengelolaan data historis dan sistem kendali otomatis berbasis parameter tertentu juga dapat meningkatkan fungsionalitas dan kapabilitas solusi ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. A. D. Alhady *et al.*, “Comparative Performance of Water Index for Water Segmentation Model Using U-Net Architecture,” in *2024 International Conference on Computer, Control, Informatics and its Applications (IC3INA)*, IEEE, Oct. 2024, pp. 84–88. doi: 10.1109/IC3INA64086.2024.10732848.
- [2] A. S. Prihanantya, B. K. Cahyono, Afifuddin, D. A. Pradana, N. S. Yuliawati, and P. E. Octavia, “A Geospatial Big Data Approach for Web Mapping of Water Balance & Dry Days in Indonesia’s Peatlands,” in *2024 IEEE International Conference on Aerospace Electronics and Remote Sensing Technology (ICAES)*, IEEE, Nov. 2024, pp. 1–7. doi: 10.1109/ICAES64249.2024.10768022.
- [3] A. P. Abiyasa, P. I. Dianti Putri, I. Suryanti, and I. M. Riko, “Design of Smart Water Meter as Groundwater Consumption Monitor Tool for Villages in Bali-Indonesia,” in *2024 10th International Conference on Smart Computing and Communication (ICSCC)*, IEEE, Jul. 2024, pp. 222–226. doi: 10.1109/ICSCC62041.2024.10690612.
- [4] A. I. Wibowo and K.-C. Chang, “Provision of Clean Water in Remote Village / Islet through Solar Energy Application: Case of Indonesia,” in *2019 IEEE 3rd International Conference on Green Energy and Applications (ICGEA)*, IEEE, Mar. 2019, pp. 193–198. doi: 10.1109/ICGEA.2019.8880790.

- [5] M. R. T. Siregar, "On-line water quality monitoring on Brantas river East Java Indonesia," in *2004 IEEE International Conference on Semiconductor Electronics*, IEEE, 2004, p. 5 pp. doi: 10.1109/SMELEC.2004.1620825.
- [6] A. Pagano *et al.*, "A survey on massive IoT for water distribution systems: Challenges, simulation tools, and guidelines for large-scale deployment," Mar. 01, 2025, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.adhoc.2024.103714.
- [7] T. Sodkomkham, C. Ratanatamskul, and A. Chandrachai, "A novel integrated material flow cost accounting (MFCA)-IoT-lean management system approach to improving water use efficiency and reducing costs in the beverage industry," *Cleaner Environmental Systems*, vol. 15, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.cesys.2024.100232.
- [8] A. Daconte, M. Sierra, J. Noguera, and N. Rodriguez, "Preliminary results of an IoT-based prototype monitoring system for physicochemical parameters and water level in an aquifer: Case of Santa Marta, Colombia," in *Procedia Computer Science*, Elsevier B.V., 2024, pp. 478–483. doi: 10.1016/j.procs.2023.12.237.
- [9] A. Morchid *et al.*, "IoT-enabled smart agriculture for improving water management: A smart irrigation control using embedded systems and Server-Sent Events," *Sci Afr*, vol. 27, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.sciaf.2024.e02527.
- [10] M. Rumbayan, I. Pundoko, S. R. Sompie, and D. G. Ruindungan, "Integration of smart water management and photovoltaic pumping system to supply domestic water for rural communities," *Results in Engineering*, vol. 25, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.rineng.2025.103966.
- [11] A. Abu Sneineh and A. A. A. Shabaneh, "Design of a smart hydroponics monitoring system using an ESP32 microcontroller and the Internet of Things," *MethodsX*, vol. 11, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.mex.2023.102401.
- [12] R. K. Jain, "Experimental performance of smart IoT-enabled drip irrigation system using and controlled through web-based applications," *Smart Agricultural Technology*, vol. 4, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.atech.2023.100215.
- [13] B. Et-taibi *et al.*, "Enhancing water management in smart agriculture: A cloud and IoT-Based smart irrigation system," *Results in Engineering*, vol. 22, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.rineng.2024.102283.
- [14] T. Adamo, D. Caivano, L. Colizzi, G. Dimauro, and E. Guerriero, "Optimization of irrigation and fertigation in smart agriculture: An IoT-based micro-services framework," *Smart Agricultural Technology*, vol. 11, Aug. 2025, doi: 10.1016/j.atech.2025.100885.
- [15] A. K. Yadav, V. Yadav, H. Malik, R. Khargotra, and T. Singh, "Design of novel IoT-based solar powered PV pumping systems for agricultural applications in diverse climatic zones of India," *Results in Engineering*, vol. 23, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.rineng.2024.102584.
- [16] A. Morchid, R. Jebabra, H. M. Khalid, R. El Alami, H. Qjidaa, and M. Ouazzani Jamil, "IoT-based smart irrigation management system to enhance agricultural water security using embedded systems, telemetry data, and cloud computing," *Results in Engineering*, vol. 23, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.rineng.2024.102829.
- [17] N. A. Mohd Jais, A. F. Abdullah, M. S. Mohd Kassim, M. M. Abd Karim, A. M. and N. Atirah Muhamdi, "Improved accuracy in IoT-Based water quality monitoring for aquaculture tanks using low-cost sensors: Asian seabass fish farming," *Heliyon*, vol. 10, no. 8, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e29022.
- [18] M. R. Al Mamun, A. K. Ahmed, S. M. Upoma, M. M. Haque, and M. Ashik-E-Rabbani, "IoT-enabled solar-powered smart irrigation for precision agriculture," *Smart Agricultural Technology*, vol. 10, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.atech.2025.100773.
- [19] M. N. A. Ramadan, M. A. H. Ali, S. Y. Khoo, M. Alkhedher, and M. Alherbawi, "Real-time IoT-powered AI system for monitoring and forecasting of air pollution in industrial environment," *Ecotoxicol Environ Saf*, vol. 283, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.ecoenv.2024.116856.
- [20] R. M. Ramli and W. A. Jabbar, "Design and implementation of solar-powered with IoT-Enabled portable irrigation system," *Internet of Things and Cyber-Physical Systems*, vol. 2, pp. 212–225, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.IoTcps.2022.12.002.
- [21] M. R. Al Mamun, M. Ashik-E-Rabbani, M. M. Haque, and S. M. Upoma, "IoT-based real-time biofloc monitoring and controlling system," *Smart Agricultural Technology*, vol. 9, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.atech.2024.100598.
- [22] S. N. Razali, K. A. Fariza Abu Samah, M. H. Ahmad, and L. S. Riza, "IoT Based Accident Detection And Tracking System With Telegram and SMS Notifications," in *2021 6th IEEE International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE)*, IEEE, Dec. 2021, pp. 1–5. doi: 10.1109/ICRAIE52900.2021.9703970.
- [23] H. K. Patel, T. Mody, and A. Goyal, "Arduino Based Smart Energy Meter using GSM," in *2019 4th International Conference on Internet of Things: Smart Innovation and Usages (IoT-SIU)*, IEEE, Apr. 2019, pp. 1–6. doi: 10.1109/IoT-SIU.2019.8777490.
- [24] P. HL and S. K., "IoT And GSM Applications for Industrial Health Monitoring," in *2023 3rd International Conference on Pervasive Computing and Social Networking (ICPCSN)*, IEEE, Jun. 2023, pp. 1005–1012. doi: 10.1109/ICPCSN58827.2023.00171.
- [25] N. Datta, A. Malik, M. Agarwal, and A. Jhunjhunwala, "Real Time Tracking and Alert System for Laptop through Implementation of GPS, GSM, Motion Sensor and Cloud Services for Antitheft Purposes," in *2019 4th International Conference on Internet of Things: Smart Innovation and Usages (IoT-SIU)*, IEEE, Apr. 2019, pp. 1–6. doi: 10.1109/IoT-SIU.2019.8777477.
- [26] A. A. S. Chowdhury, Y. Arafat, and M. S. Alam, "IoT-GSM Based Controlling and Monitoring System to Prevent Water Wastage, Water Leakage, and Pollution in the Water Supply," in *2022 International Conference on Innovations in Science, Engineering and Technology (ICISET)*, IEEE, Feb. 2022, pp. 567–572. doi: 10.1109/ICISET54810.2022.9775876.
- [27] M. I. M. Abu.Zaid, R. Abdullah, S. I. Ismail, and N. N. S. N. Dzulkeflifi, "IoT-based Emergency Alert System Integrated with Telegram Bot," in *2023 IEEE International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems (I2CACIS)*, IEEE, Jun. 2023, pp. 126–131. doi: 10.1109/I2CACIS57635.2023.10193550.
- [28] B. Siddineni, R. Nanditha, T. J. Satyanarayana, and V. S. Rama Krishna Sighakolli, "Design of an IoT based Surveillance System using Blynk, IFTTT, and Telegram," in *2021 12th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT)*, IEEE, Jul. 2021, pp. 01–06. doi: 10.1109/ICCCNT51525.2021.9579790.
- [29] N. Raghu, I. Miah, and A. B. R. Tommoy, "Ultrasonic Sensor Based Door Security Camera with Wireless Data Transfer in Telegram Bot Using WiFi," in *2023 International Conference on Intelligent and Innovative Technologies in Computing, Electrical and Electronics (IITCEE)*, IEEE, Jan. 2023, pp. 402–405. doi: 10.1109/IITCEE57236.2023.10090954.
- [30] A. Morchid, Z. Said, A. Y. Abdelaziz, P. Siano, and H. Qjidaa, "Fuzzy logic-based IoT system for optimizing irrigation with cloud computing: Enhancing water sustainability in smart agriculture," *Smart Agricultural Technology*, vol. 11, Aug. 2025, doi: 10.1016/j.atech.2025.100979.
- [31] A. Morchid, I. G. Muhammad Alblushi, H. M. Khalid, R. El Alami, S. R. Sitaraman, and S. M. Muyeen, "High-technology agriculture system to enhance food security: A concept of smart irrigation system using Internet of Things and cloud computing," *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 2024, doi: 10.1016/j.jssas.2024.02.001.
- [32] N. Chavhan *et al.*, "APAH: An autonomous IoT driven real-time monitoring system for Industrial wastewater," *Digital Chemical Engineering*, vol. 14, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.dche.2025.100217.
- [33] P. Blanco-Gómez, A. Mateu-Belloch, J. Luis Jiménez-García, A. J. Salas-Cantarellas, J. J. Pieras-Company, and E. Santamaría-Casals, "Real-time ultrasonic water level IoT sensor for in-situ soil permeability testing," 2024, doi: 10.5281/zenodo.8328181.
- [34] K. Duanhpakdee, G. Thananta, and S. Sukpancharoen, "IoT Enhanced Deep Water Culture Hydroponic System for Optimizing Chinese Celery Yield and Economic Viability," *Smart Agricultural Technology*, p. 100545, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.atech.2024.100545.

- [35] A. Pagano, D. Garlisi, F. Giuliano, T. Cattai, R. J. L. Taloma, and F. Cuomo, "Introducing and evaluating SWI-FEED: A smart water *IoT* framework designed for large-scale contexts," *Comput Commun*, vol. 237, May 2025, doi: 10.1016/j.comcom.2025.108146.
- [36] M. Salimath, N. Kaliannan, V. Prabhakar, R. Iyyakutty, and K. J. Jeyabaskaran, "*IoT* and sensor technologies: Increased water and nutrient savings and profit in Banana cv. Grand Nain (AAA) production," *Sci Hortic*, vol. 341, Feb. 2025, doi: 10.1016/j.scienta.2025.113982.
- [37] V. Kumar S *et al.*, "Evaluation of *IoT* based smart drip irrigation and ETc based system for sweet corn," *Smart Agricultural Technology*, vol. 5, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.atech.2023.100248.
- [38] K. M. Abubeker and A. Nuthalapati, "Cloud Based LoRaWAN Enabled Water Tank Automation Framework," in *Procedia Computer Science*, Elsevier B.V., 2025, pp. 768–775. doi: 10.1016/j.procs.2025.01.037.
- [39] S. C. Olisa, C. N. Asiegbu, J. E. Olisa, B. O. Ekengwu, A. A. Shittu, and M. C. Eze, "Smart two-tank water quality and level detection system via *IoT*," *Heliyon*, vol. 7, no. 8, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.heliyon.2021.e07651.
- [40] J. Á. Garrido-Sarasol *et al.*, "Technical performance analysis of high-voltage battery-based photovoltaic water pumping systems," *Energy Conversion and Management: X*, vol. 22, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.ecmx.2024.100543.
- [41] W. A. Jabbar *et al.*, "Development of LoRaWAN-based *IoT* system for water quality monitoring in rural areas," *Expert Syst Appl*, vol. 242, May 2024, doi: 10.1016/j.eswa.2023.122862.
- [42] A. U. Rehman, Y. Alamoudi, H. M. Khalid, A. Morchid, S. M. Muyeen, and A. Y. Abdelaziz, "Smart agriculture technology: An integrated framework of renewable energy resources, *IoT*-based energy management, and precision robotics," *Cleaner Energy Systems*, vol. 9, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.cles.2024.100132.
- [43] R. G. Anvekar, R. M. Banakar, and R. R. Bhat, "Design alternatives for end user communication in *IoT* based system model," in *2017 IEEE Technological Innovations in ICT for Agriculture and Rural Development (TIAR)*, IEEE, Apr. 2017, pp. 121–125. doi: 10.1109/TIAR.2017.8273698.
- [44] A. K. Shah, P. Navin, S. Suman, B. Mahato, and N. Aggarwal, "An Automated Water Resource Management System," in *2024 4th International Conference on Technological Advancements in Computational Sciences (ICTACS)*, IEEE, Nov. 2024, pp. 591–596. doi: 10.1109/ICTACS62700.2024.10840728.
- [45] C. Yanuchit, K. Pislae-Ngam, B. Kumkhet, N. Pukrongta, P. Sangmahamad, and V. Pirajnanchai, "Development of an *IoT*-Based Water Pumping Management System for Rice Fields," in *2025 13th International Electrical Engineering Congress (iEECON)*, IEEE, Mar. 2025, pp. 1–5. doi: 10.1109/iEECON64081.2025.10987875.
- [46] V. Soniya, K. R. Shankar, Sk. Karishma, D. Vamsi, and R. V. H. Prasad, "*IoT* Based Smart Way of Watering Plants and Feeding Pets," in *2023 9th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS)*, IEEE, Mar. 2023, pp. 744–749. doi: 10.1109/ICACCS57279.2023.10112691.
- [47] V. Tathe, A. Potdar, N. Wyawahare, R. Agrawal, and N. Chavan, "A Review Analysis – RO Waste Water Management System with Home Automation using Green Energy," in *2025 IEEE International Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS)*, IEEE, Jan. 2025, pp. 1–6. doi: 10.1109/SCEECS64059.2025.10941495.