

SISTEM DETEKSI DINI GANGGUAN PLTMH BERBASIS IoT DENGAN METODE THRESHOLD DAN FUZZY LOGIC

Dadang Dewantara¹, Dian Efytra Yuliana², Yanu Shalahuddin³

^{1,2,3}Fakultas Teknik, Universitas Islam Kediri; Jl. Sersan Suharmaji No.38, Manisrenggo, Kec. Kota, Kota Kediri, Jawa Timur 64128; Fax. (0354) 684651

Keywords:

PLMTH;
Internet of Things;
Threshold;
Fuzzy Logic;
Sistem Deteksi Gangguan.

Correspondent Email:

dadangdewantara2@gmail.com



Copyright © [JITET](http://www.jitet.org) (Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan). This article is an open access article distributed under terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC)

Abstrak. Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) memiliki potensi sebagai sumber energi terbarukan, namun rentan mengalami gangguan operasional yang berisiko menimbulkan kerusakan. Penelitian ini mengembangkan sistem deteksi dini gangguan berbasis Internet of Things (IoT) menggunakan metode Threshold dan Fuzzy Logic. Prototipe dirancang dengan generator DC, turbin air, sensor INA219, Arduino Uno, dan ESP32 yang terintegrasi dengan Firebase untuk monitoring real-time. Pengujian dilakukan pada tiga kondisi debit air (tinggi, normal, rendah) dengan sepuluh skenario. Hasil menunjukkan sistem mendeteksi gangguan dengan akurasi 100% dan error sensor rendah (tegangan $\pm 0,2$ V, arus $\pm 0,03$ A). Sistem proteksi otomatis mampu memutus operasi pada kondisi ekstrem serta mempertahankan stabilitas pada kondisi normal. Monitoring melalui aplikasi Android terbukti andal dengan interval 5 detik. Sistem yang diusulkan meningkatkan keamanan dan keandalan operasional PLTMH.

Abstract. Micro-hydro power plants (PLTMH) have the potential to be a source of renewable energy, but they are prone to operational disruptions that can cause damage. This study develops an early detection system for disruptions based on the Internet of Things (IoT) using Threshold and Fuzzy Logic methods. The prototype is designed with a DC generator, water turbine, INA219 sensor, Arduino Uno, and ESP32 integrated with Firebase for real-time monitoring. Testing was conducted under three water flow conditions (high, normal, low) with ten scenarios. The results show that the system detects disturbances with 100% accuracy and low sensor error (voltage ± 0.2 V, current ± 0.03 A). The automatic protection system is capable of shutting down operations under extreme conditions and maintaining stability under normal conditions. Monitoring via the Android app proved reliable with a 5-second interval. The proposed system enhances the safety and operational reliability of the PLTMH.

1. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik yang terus meningkat serta keterbatasan sumber energi fosil mendorong pengembangan energi terbarukan sebagai solusi berkelanjutan. Indonesia sebagai negara kepulauan dengan potensi sumber daya air yang melimpah memiliki peluang besar untuk mengembangkan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) sebagai alternatif penyediaan energi listrik, khususnya di daerah terpencil yang belum terjangkau jaringan listrik nasional [1].

PLTMH merupakan teknologi pembangkit listrik yang memanfaatkan energi potensial dan kinetik air untuk menghasilkan listrik dengan kapasitas hingga 100 kW. Sistem ini tidak memerlukan bahan bakar fosil dan memiliki dampak lingkungan yang minimal [2]. Penelitian Sofyan dan Sudana menunjukkan bahwa PLTMH memiliki potensi teknis yang sangat baik, di mana sistem dengan debit andalan 1,3174 m³/s dan tinggi jatuh efektif 6 meter mampu menghasilkan daya hingga 66,22 kW, yang dapat memenuhi kebutuhan listrik masyarakat hingga 23 kW [3].

Meskipun memiliki potensi yang besar, operasional PLTMH menghadapi tantangan dalam hal keandalan dan kontinuitas operasi. Sistem ini rentan terhadap berbagai gangguan operasional yang dapat mempengaruhi kinerja dan efisiensi [1]. Penelitian Akhwan dkk. mengidentifikasi bahwa fluktuasi parameter operasional seperti tegangan dan arus dapat terjadi akibat perubahan kondisi lingkungan dan beban sistem. Kondisi tersebut dapat menyebabkan penurunan kualitas daya listrik yang dihasilkan, bahkan kerusakan komponen jika tidak ditangani dengan tepat [4].

Permasalahan utama dalam operasional PLTMH adalah keterbatasan sistem monitoring dan deteksi gangguan yang mampu memberikan peringatan dini sebelum terjadi kerusakan serius. Sistem monitoring konvensional umumnya memerlukan pemeriksaan manual secara berkala, yang tidak efisien dan berpotensi terlambat dalam mendeteksi gangguan [5]. Hal ini berakibat pada downtime yang tidak perlu dan biaya pemeliharaan yang tinggi.

Perkembangan teknologi Internet of Things (IoT) memberikan peluang untuk meningkatkan sistem monitoring PLTMH menjadi lebih efektif dan efisien. Yastica dkk. Menunjukkan

bahwa implementasi sistem monitoring berbasis IoT pada PLTMH dapat meningkatkan efisiensi operasional dan mengurangi kebutuhan kunjungan fisik untuk pemantauan. Sistem IoT memungkinkan pemantauan kondisi pembangkit secara real-time dengan akurasi data yang tinggi [5].

Syahputra dkk. Telah mengembangkan prototipe sistem monitoring PLTMH berbasis IoT yang mengintegrasikan sensor tegangan dan aliran air dengan platform Blynk. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem dapat beroperasi dengan baik dalam memantau parameter dasar. Namun, sistem tersebut belum dilengkapi dengan metode analisis data yang mampu memberikan deteksi gangguan secara otomatis dan akurat [6].

Untuk meningkatkan efektivitas deteksi gangguan, diperlukan metode analisis data yang dapat menangani ketidakpastian dan variabilitas parameter operasional PLTMH. Metode Threshold dapat digunakan untuk mendeteksi kondisi abnormal berdasarkan nilai ambang batas yang telah ditentukan. Sementara itu, Fuzzy Logic mampu mengelola ketidakpastian data sensor dan memberikan keputusan yang lebih adaptif terhadap kondisi operasional yang bervariasi.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH)

Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) adalah sistem pembangkit listrik yang memanfaatkan energi potensial dan kinetik air untuk menghasilkan listrik, umumnya digunakan di daerah terpencil yang belum terjangkau jaringan listrik nasional. Potensi daya yang dapat dihasilkan PLTMH ditentukan oleh debit andalan sungai dan tinggi jatuh efektif. Debit andalan dapat dihitung menggunakan metode F.J. Mock, yang mempertimbangkan faktor hidrologi seperti curah hujan bulanan, jumlah hari hujan, kelembapan udara, dan intensitas cahaya matahari [3].

Berdasarkan studi, dengan debit andalan 1,3147 m³/s dan tinggi jatuh efektif 6 meter, potensi daya air mencapai 77,46 kW, daya turbin 69,71 kW, dan daya keluaran generator 66,22 kW. Nilai ini menunjukkan bahwa PLTMH dapat menjadi solusi efektif penyediaan energi listrik berkelanjutan bagi

masyarakat di daerah dengan sumber daya air yang memadai.

2.2. Generator

Generator merupakan perangkat yang mengubah energi mekanik menjadi energi listrik berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik (Hukum Faraday) [2]. Berdasarkan jenis arus yang dihasilkan, generator terbagi menjadi Generator DC dan Generator AC.

a. Generator DC (Direct Current)

Generator DC menghasilkan arus searah melalui komponen utama seperti armature, komutator, dan sikat karbon [2]. Jenisnya meliputi:

1. Generator Penguat Terpisah – sumber arus kemagnetan terpisah dari output generator.
 2. Generator Penguat Sendiri – arus kemagnetan berasal dari output generator itu sendiri, contoh: generator shunt.
 3. Generator Kompon – kombinasi lilitan shunt dan seri untuk kestabilan medan magnet dan kemampuan beban tinggi.
- ### b. Generator AC (Alternating Current)

Generator AC menghasilkan arus bolak-balik menggunakan rotor, stator, dan sistem penggerak seperti turbin [5]. Keunggulannya meliputi efisiensi transmisi tinggi, kemudahan transformasi tegangan, dan daya tahan yang baik. Generator AC umum digunakan pada pembangkit listrik, alternator kendaraan, dan genset.

2.3. Turbin

Turbin pada PLTMH berfungsi mengubah energi kinetik air menjadi energi mekanik yang kemudian dikonversi menjadi energi listrik. Pemilihan jenis turbin bergantung pada karakteristik sumber air, seperti head dan debit [7]. Beberapa jenis turbin yang digunakan antara lain:

Turbin Pelton adalah jenis turbin impuls untuk head tinggi, menggunakan sudu berbentuk mangkuk untuk menangkap pancaran air. Penelitian menunjukkan variasi jumlah sudu (18, 20, 22) mempengaruhi daya yang dihasilkan, dengan 18 sudu memberikan daya tertinggi (1,19 W) [6].

Turbin Francis adalah jenis turbin reaksi untuk head menengah (10–300 m) dan debit sedang–tinggi. Air dialirkan melalui saluran spiral, kemudian ke bilah turbin, dan keluar secara aksial melalui draft tube. Turbin ini

memiliki efisiensi tinggi dan daya stabil pada berbagai kondisi aliran [7].

Turbin Kaplan – turbin reaksi untuk head rendah (<30 m) dan debit tinggi, dengan bilah yang dapat disesuaikan sudutnya. Desain ini menjaga efisiensi meskipun debit bervariasi, cocok untuk sungai dangkal atau saluran irigasi [7].

2.4. PWM Charger Control

PWM (Pulse Width Modulation) charge controller adalah perangkat dalam sistem tenaga surya yang mengatur pengisian baterai dengan mengubah lebar pulsa sinyal listrik. Prinsip kerjanya mengatur rasio waktu aktif (ON) dan tidak aktif (OFF) untuk mengendalikan daya rata-rata yang diterima baterai, sehingga meningkatkan efisiensi pengisian dan mengurangi risiko overheating atau penguapan elektrolit [8].

Jenis-jenis PWM antara lain:

1. PWM Sederhana (Single Pulse PWM) – menggunakan satu pulsa berlebar tetap pada setiap periode gelombang pembawa. Mudah diimplementasikan, namun memiliki harmonisa tinggi dan efisiensi rendah untuk aplikasi daya tinggi [8].
2. PWM Multi-Pulse (Multiple Pulse PWM) – menggunakan beberapa pulsa per periode, dengan lebar dan jumlah pulsa yang dapat disesuaikan. Lebih stabil dan efisien dibanding PWM sederhana, serta mengurangi distorsi harmonik [8].
3. Sinusoidal PWM (SPWM) – menggunakan gelombang sinusoidal sebagai referensi untuk menghasilkan sinyal keluaran mendekati bentuk sinusoidal. Memiliki distorsi harmonik rendah dan efisiensi tinggi, cocok untuk aplikasi yang memerlukan kualitas daya tinggi seperti PLTMH [8].

2.5. Battery Aki

Baterai aki berfungsi sebagai media penyimpanan energi listrik yang dapat mengalami discharge apabila digunakan terus-menerus tanpa pengisian, sehingga berpotensi mengalami kerusakan (soak). Untuk itu diperlukan charger yang mengalirkan listrik DC ke baterai agar tetap dapat digunakan sebagai cadangan energi. Pada penelitian ini dirancang charger baterai 12 V yang memanfaatkan sumber AC 220 V, diturunkan menjadi 15 V untuk masukan (input). Terminal positif dan

negatif charger dihubungkan ke terminal baterai, dan pengujian dilakukan dengan mengukur tegangan baterai pada interval tertentu. Hasil pengujian menunjukkan tegangan meningkat seiring waktu pengisian, dengan perbedaan hasil antara kondisi pengisian normal dan strong [9].

Jenis baterai yang umum digunakan antara lain:

1. Aki Basah Konvensional – berisi larutan elektrolit berupa asam sulfat (H_2SO_4). Memiliki lubang pada penutup untuk penambahan air aki ketika volume berkurang akibat penguapan. Cairan bersifat korosif, dan uapnya yang mengandung hidrogen mudah terbakar [9].
2. Aki Kalsium – baterai timbal-asam dengan pelat elektroda yang dipadu kalsium. Memiliki keunggulan dibanding aki konvensional, seperti penguapan lebih rendah dan umur pakai lebih panjang [9].
3. Aki Bebas Perawatan (Maintenance-Free Battery) – baterai timbal-asam yang dirancang untuk meminimalkan kebutuhan perawatan, misalnya penambahan elektrolit, dengan teknologi yang meningkatkan efisiensi dan keandalan [9].

2.6. Mikrokontroler dan Sensor

Mikrokontroler merupakan chip atau Integrated Circuit (IC) yang dapat diprogram untuk membaca input, memproses data, dan menghasilkan output sesuai kebutuhan, sehingga berperan sebagai otak sistem elektronik [10].

1. Arduino Uno

Arduino Uno memiliki kapasitas memori relatif besar dibandingkan beberapa jenis Arduino lain, sehingga cocok untuk proyek yang melibatkan banyak modul. Dalam aplikasi PLTMH, Arduino Uno dapat mengolah data dari sensor arus dan tegangan, mengontrol perangkat seperti katup atau pompa, serta melakukan otomatisasi operasi berdasarkan data yang diterima. Fitur komunikasi data melalui modul Wi-Fi atau GSM memungkinkan pemantauan jarak jauh. Penerapan algoritma fuzzy logic juga dapat digunakan untuk analisis data guna pengambilan keputusan yang lebih tepat [10].

2. ESP32 Devkit

ESP32 adalah mikrokontroler dengan Wi-Fi dan Bluetooth bawaan, prosesor dual-core,

serta dukungan berbagai protokol komunikasi seperti MQTT, HTTP, dan WebSocket. Keunggulannya meliputi pemrosesan data cepat, multitasking, konsumsi daya rendah, serta banyak General Purpose Input Output (GPIO) yang mendukung berbagai fungsi (PWM, ADC, DAC, SPI, I2C, UART). Fleksibilitas ini membuat ESP32 ideal untuk proyek IoT seperti smart home, pemantauan lingkungan, dan sistem energi terintegrasi [11].

3. Sensor Arus dan Tegangan (INA219)

Sensor INA219 digunakan untuk mengukur arus dan tegangan listrik dengan akurasi tinggi. Prinsip kerjanya memanfaatkan efek Hall, di mana arus yang mengalir melalui konduktor menghasilkan medan magnet yang diubah menjadi sinyal tegangan proporsional. Pengukuran dapat dilakukan untuk arus AC maupun DC. Untuk meningkatkan akurasi, penguat diferensial seperti AD620 dapat digunakan, serta teknik pemrosesan sinyal seperti Kalman filter untuk meminimalkan noise dan fluktuasi pembacaan. Sensor ini penting dalam pemantauan konsumsi energi dan sistem kontrol otomatis pada PLTMH [12].

2.7. Threshold dan Fuzzy

Logika fuzzy dan metode *threshold* merupakan dua pendekatan yang sering digunakan dalam sistem kontrol dan pengambilan keputusan, khususnya pada aplikasi yang memerlukan penanganan data tidak pasti maupun pengenalan pola.

1. Fuzzy Mamdani

Logika Fuzzy Mamdani diperkenalkan oleh Ebrahim Mamdani pada tahun 1975 sebagai metode untuk menangani ketidakpastian dan kompleksitas dalam pengambilan keputusan berbasis aturan. Prosesnya meliputi fuzzifikasi (mengubah nilai input menjadi variabel fuzzy sesuai fungsi keanggotaan), inferensi fuzzy (penerapan aturan logika fuzzy yang menghubungkan variabel input dan output), serta defuzzifikasi (mengubah kembali hasil fuzzy menjadi nilai pasti).

Metode ini memungkinkan sistem mempertimbangkan berbagai faktor secara bersamaan dan menghasilkan keputusan yang realistis. Keunggulannya adalah kemampuannya untuk mengolah data yang samar atau tidak pasti sehingga banyak

diaplikasikan pada kontrol sistem, prediksi, dan optimasi [13].

2. Fixed Threshold

Metode *threshold* menggunakan nilai ambang batas tertentu untuk menentukan kapan suatu aksi atau keputusan harus diambil. Dalam konteks keamanan jaringan, *threshold* dapat digunakan untuk mendeteksi perilaku abnormal, seperti serangan flooding. Dua nilai ambang, yaitu *Min_Threshold* dan *Max_Threshold*, digunakan untuk mengevaluasi prioritas node. Node yang mengirim permintaan rute (Route Request / RREQ) melebihi *threshold* dianggap berpotensi berbahaya dan dapat diabaikan dalam proses pengiriman paket.

Pendekatan ini membantu menjaga kinerja sistem dengan meminimalkan overhead akibat pemrosesan data yang tidak perlu. Dengan demikian, metode *threshold* berperan penting dalam meningkatkan efisiensi dan keamanan, baik di jaringan ad hoc maupun sistem deteksi lainnya [14].

2.8. Internet Of Things

Internet of Things (IoT) merupakan konsep teknologi yang memungkinkan perangkat fisik saling terhubung melalui jaringan internet untuk bertukar data dan berkomunikasi secara otomatis tanpa intervensi langsung dari manusia. IoT mencakup beragam perangkat seperti sensor, aktuator, dan sistem komputasi tertanam yang digunakan dalam berbagai bidang, termasuk kesehatan, transportasi, pertanian, industri, dan sistem keselamatan.

Teknologi IoT memanfaatkan sensor pintar, protokol komunikasi nirkabel, serta analisis data berbasis *cloud* untuk meningkatkan efisiensi, keamanan, dan kenyamanan pengguna. Dalam implementasinya pada sistem *Advanced Driver Assistance System* (ADAS), IoT berperan mengintegrasikan data dari sensor kendaraan dengan server pusat untuk mendeteksi kecelakaan secara real-time. Informasi tersebut kemudian dapat dikirimkan secara otomatis kepada layanan darurat, sehingga mempercepat waktu respons medis dan berpotensi menurunkan tingkat fatalitas [15].

Selain pada sektor transportasi, IoT juga telah diterapkan pada bidang pemeliharaan hewan. Fahrudin dkk. Mengembangkan prototipe automatic *cat feeder* berbasis IoT

yang memanfaatkan NodeMCU ESP8266, sensor loadcell, dan aplikasi smartphone untuk mengatur jadwal makan serta memonitor jumlah pakan secara *real-time*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem mampu menakar pakan dengan rata-rata selisih hanya 1,2 gram dibandingkan timbangan digital, sehingga terbukti akurat dan layak diterapkan dalam otomasi pemeliharaan hewan peliharaan [16].

3. METODE PENELITIAN

3.1. Rancangan Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen untuk menguji efektivitas sistem deteksi dini gangguan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) berbasis Internet of Things (IoT) dengan pendekatan Fuzzy Logic dan Threshold. Metode eksperimen dipilih untuk mengamati pengaruh variabel bebas terhadap variabel terikat melalui prosedur yang terkontrol.

Variabel bebas dalam penelitian ini adalah parameter operasional PLTMH seperti arus dan tegangan, sedangkan variabel terikat adalah tingkat risiko gangguan yang dideteksi oleh sistem.

3.2. Tahapan Penelitian

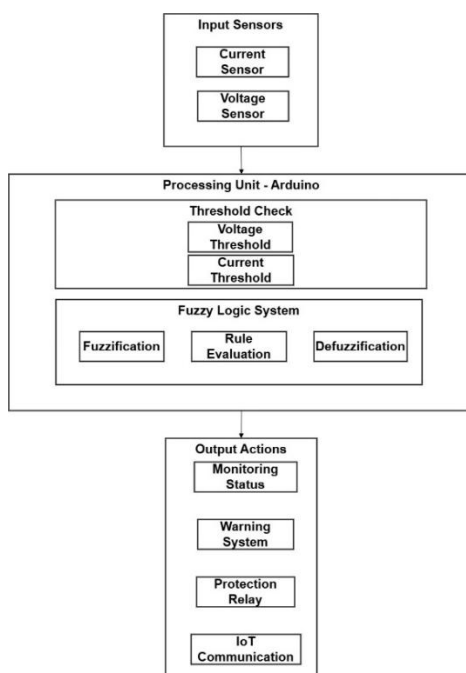
Tahapan penelitian ini meliputi:

1. Observasi Awal mengidentifikasi karakteristik operasional PLTMH dan kondisi lingkungan lokasi penelitian. Data awal parameter arus dan tegangan dikumpulkan untuk menentukan nilai *threshold* dan aturan fuzzy.
2. Perancangan Eksperimen menyusun skenario pengujian pada kondisi operasional normal dan anomali untuk menguji kemampuan sistem deteksi dini.
3. Pelaksanaan Eksperimen menguji respons sistem terhadap skenario pengujian. Data sensor dikumpulkan secara real-time dan diproses langsung di Arduino menggunakan algoritma *Fuzzy Logic* dan pengecekan *Threshold*.
4. Analisis Data mengevaluasi akurasi deteksi gangguan, waktu respons, dan tingkat false alarm.

3.3. Arsitektur Sistem

Arsitektur sistem deteksi dini gangguan PLTMH ditunjukkan pada Gambar 1. Sistem ini terdiri dari tiga komponen utama:

1. Input Sensors meliputi sensor arus (*Current Sensor*) dan sensor tegangan (*Voltage Sensor*) untuk memantau parameter listrik PLTMH.
2. Processing Unit berbasis Arduino, menjalankan dua sistem pemrosesan utama: Fuzzy Logic System (fuzzifikasi, evaluasi aturan, defuzzifikasi) dan Threshold Check (pemantauan nilai kritis).
3. Output Actions meliputi *Monitoring Status*, *Warning System*, *Protection Relay*, dan *IoT Communication* untuk pengiriman data ke sistem monitoring jarak jauh.

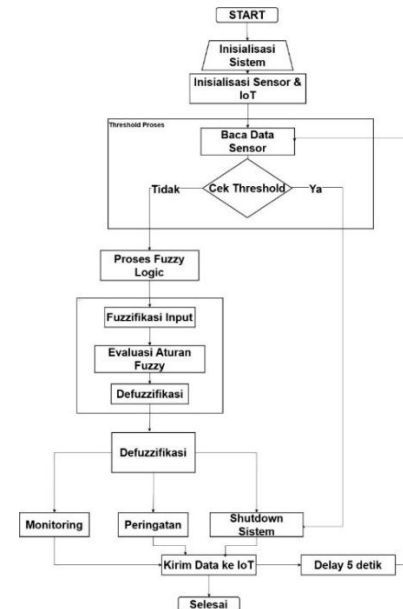


Gambar 1. Blok Diagram Sistem

Gambar 1. menunjukkan blok diagram sistem deteksi dini gangguan PLTMH berbasis IoT dengan metode Fuzzy Logic dan Threshold. Sistem ini terdiri dari tiga bagian utama. Bagian Input Sensors mencakup sensor arus (*Current Sensor*) dan sensor tegangan (*Voltage Sensor*) yang mengukur parameter listrik secara real-time. Data dari kedua sensor dikirimkan ke Processing Unit berbasis Arduino yang menjalankan dua proses paralel, yaitu Fuzzy Logic System (meliputi proses fuzzifikasi, evaluasi aturan, dan defuzzifikasi) dan Threshold Check (pemantauan nilai ambang batas). Hasil pengolahan data kemudian diteruskan ke Output Actions yang terdiri dari Monitoring Status untuk menampilkan kondisi sistem, Warning System untuk memberikan peringatan dini, Protection Relay untuk proteksi

otomatis, serta IoT Communication untuk mengirim data ke server monitoring jarak jauh.

3.4. Perangkat Keras



Gambar 2. Flowchart Sistem

Flowchart prinsip kerja sistem ditunjukkan pada Gambar 2. Proses dimulai dari inisialisasi sistem dan sensor IoT, kemudian dilanjutkan dengan pembacaan data arus dan tegangan dari sensor. Data tersebut terlebih dahulu diperiksa terhadap nilai Threshold untuk mendeteksi potensi gangguan. Apabila melewati nilai batas, sistem akan mengidentifikasi status risiko tinggi. Jika tidak, data diproses menggunakan metode *Fuzzy Logic* yang terdiri dari tahap fuzzifikasi, evaluasi aturan, dan defuzzifikasi. Berdasarkan hasil evaluasi risiko, sistem dapat melakukan monitoring, memberikan peringatan, atau menghentikan operasi (shutdown). Seluruh data hasil analisis dikirimkan ke platform IoT untuk pemantauan jarak jauh sebelum siklus proses dimulai kembali.

3.5. Perangkat Lunak (Software)

3.5.1. Implementasi Fuzzy dan Threshold

5.1. Implementasi Threshold

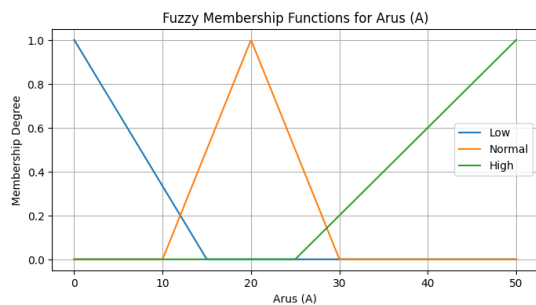
- a. Untuk setiap parameter sensor, nilai threshold ditentukan berdasarkan:
- b. Arus: $\pm 50\%$ dari nilai nominal
- c. Tegangan: $\pm 35\%$ dari nilai nominal

5.2. Implementasi Fuzzy Logic

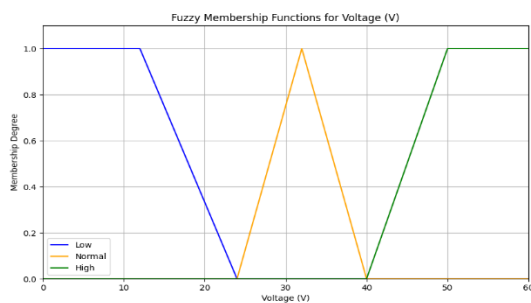
Sistem Fuzzy Logic dalam implementasi deteksi dini gangguan PLTMH dirancang dengan dua variabel input utama yang saling

terintegrasi, yaitu arus (A) dalam ampere untuk memantau beban listrik, dan tegangan (V) dalam volt untuk mengukur output listrik yang dihasilkan. Kedua variabel input ini diproses untuk menentukan tingkat risiko dan status operasional PLTMH.

Gambar 3. Menunjukkan membership function untuk variabel arus, sedangkan Gambar 4. Menunjukkan membership function untuk variabel tegangan.



Gambar 3. Membership Fuzzyfikasi Arus



Gambar 4. Membership Fuzzyfikasi Tegangan

a. Aturan Fuzzy

Aturan Fuzzy Logic dalam sistem deteksi dini gangguan PLTMH dirancang dengan lima aturan dasar yang mengombinasikan dua parameter utama (tegangan dan arus) untuk menghasilkan output berupa tingkat risiko. Tabel 3.1 menyajikan daftar aturan tersebut.

Tabel 1. Aturan Fuzzy Logic

Aturan Fuzzy Logic			
	Tegangan	Arus	Output
0	Normal	Normal	Sedang
1	Tinggi	Tinggi	Tinggi
2	Normal	Rendah	Rendah
3	Rendah	Tinggi	Tinggi
4	Tinggi	Normal	Sedang

Pada Tabel 1. Terlihat bahwa setiap aturan memiliki kondisi spesifik. Aturan pertama (0) menyatakan bahwa tegangan normal dengan arus normal menghasilkan risiko sedang. Aturan kedua (1) menunjukkan bahwa tegangan tinggi dengan arus tinggi menghasilkan risiko tinggi. Aturan ketiga (2) mengindikasikan bahwa tegangan normal dengan arus rendah menghasilkan risiko rendah. Aturan keempat (3) menetapkan bahwa tegangan rendah dengan arus tinggi menghasilkan risiko tinggi. Aturan kelima (4) menentukan bahwa tegangan tinggi dengan arus normal menghasilkan risiko sedang.

Kelima aturan ini telah divalidasi pada 10 skenario pengujian dan terbukti memberikan analisis risiko yang komprehensif dan akurat. Penambahan aturan untuk kombinasi minor dianggap tidak memberikan peningkatan signifikan terhadap akurasi, namun justru dapat meningkatkan beban komputasi pada Arduino Uno. Oleh karena itu, lima aturan ini dipilih sebagai jumlah optimal untuk menjamin akurasi deteksi tinggi tanpa mengorbankan efisiensi pemrosesan secara real-time.

3.6. Teknik Pengumpulan Data

3.6.1. Implementasi Fuzzy Logic dan Threshold

Implementasi Fuzzy Logic dan Threshold diawali dengan pengumpulan data dari lima sensor utama yang bekerja secara real-time dengan interval pembacaan setiap 5 detik. Interval ini dipilih berdasarkan analisis sensitivitas yang mempertimbangkan keseimbangan antara responsivitas sistem dan efisiensi komunikasi data IoT.

Hasil uji sensitivitas menunjukkan bahwa interval 2 detik, walaupun memberikan respons cepat, menghasilkan volume data yang sangat besar yang dapat membebani server Firebase dan meningkatkan konsumsi daya. Sebaliknya, interval 10 detik dinilai terlalu lama untuk merespons kondisi darurat seperti lonjakan tegangan. Oleh karena itu, interval 5 detik dipilih sebagai kompromi optimal—cukup cepat untuk mendeteksi perubahan signifikan dan mengaktifkan proteksi tepat waktu, serta cukup efisien untuk menghemat penggunaan data dan daya.

Sensor yang digunakan meliputi sensor arus untuk mengukur besaran arus listrik dalam

Ampere, dan sensor tegangan untuk memantau output listrik dalam Volt.

3.6.2. Implementasi Sistem Proteksi

Sistem proteksi pada PLTMH dirancang sebagai mekanisme keamanan berlapis yang merespons secara otomatis berdasarkan analisis metode Threshold dan Fuzzy Logic. Komponen utama sistem ini meliputi:

1. Relay kontrol 12V: berfungsi sebagai saklar otomatis untuk memutus atau menghubungkan rangkaian listrik.
2. Sistem peringatan audio-visual: memberikan notifikasi lokal kepada operator.
3. Mekanisme shutdown otomatis: menghentikan operasi PLTMH saat terdeteksi risiko tinggi.

Algoritma proteksi memiliki tiga level respons:

- a. Risiko rendah: sistem tetap beroperasi normal dengan monitoring kontinu.
- b. Risiko sedang: sistem mengirimkan peringatan melalui notifikasi IoT, namun operasi tetap berjalan dengan pengawasan intensif.
- c. Risiko tinggi: sistem memutus koneksi generator dari beban melalui relay, masuk ke safe state, dan mengirimkan alert darurat ke semua perangkat monitoring.

Fitur tambahan berupa manual override memungkinkan operator mengambil alih kontrol pada kondisi darurat, serta logging komprehensif untuk analisis pasca-kejadian. Dengan implementasi ini, PLTMH dapat beroperasi secara aman, efisien, dan andal.

3.7. Teknik Analisis Data

Analisis data pada sistem deteksi dini gangguan PLTMH dilakukan melalui tiga tahap utama:

1. Monitoring Real-Time

Pembacaan data sensor dilakukan setiap 5 detik. Data yang diterima langsung dievaluasi terhadap nilai Threshold untuk setiap parameter, kemudian diproses menggunakan metode Fuzzy Logic guna menentukan tingkat risiko secara adaptif.

2. Deteksi dan Klasifikasi Risiko

Proses deteksi gangguan dilakukan secara berlapis, dimulai dari pengecekan Threshold sebagai filter awal. Selanjutnya, data dianalisis dengan Fuzzy Logic untuk memperoleh tingkat risiko yang lebih akurat.

Hasil analisis dikategorikan ke dalam tiga tingkat risiko:

- a. Rendah: sistem tetap beroperasi normal dengan monitoring berkelanjutan.
 - b. Sedang: sistem mengaktifkan peringatan (warning system) untuk operator.
 - c. Tinggi: sistem melakukan shutdown otomatis untuk mencegah kerusakan lebih lanjut.
3. Tindakan dan Penyimpanan Data

Selain menjalankan tindakan proteksi sesuai tingkat risiko, semua data yang dikumpulkan disimpan pada basis data untuk keperluan analisis jangka panjang, evaluasi performa sistem, dan peningkatan algoritma deteksi di masa mendatang.

Sistem ini dirancang untuk bekerja secara kontinu dan otomatis, sehingga mampu merespons perubahan kondisi operasional PLTMH secara real-time sekaligus menyediakan rekaman data historis yang bermanfaat untuk maintenance dan pengembangan sistem.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Pengujian Performa Sensor

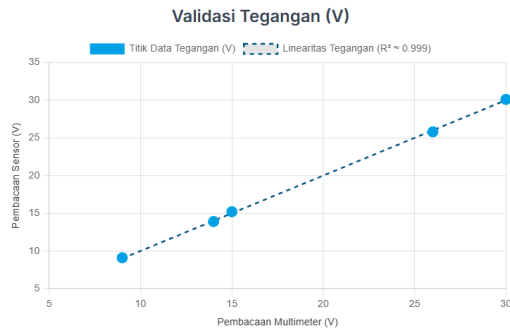
Pengujian performa sensor INA219 bertujuan untuk memvalidasi akurasi pembacaan tegangan dan arus dalam rentang operasional PLTMH. Metode pengujian menggunakan komparasi dengan alat ukur standar berupa multimeter digital presisi tinggi, sehingga dapat diperoleh tingkat akurasi dan linearitas pembacaan sensor.

Tabel 2. Hasil Pengujian Akurasi Sensor

No	Tegangan Alat Ukur (V)	Tegangan Sensor (V)	Selisih (V)	Arus Alat Ukur (A)	Arus Sensor (A)	Selisih (A)	Keterangan
1	9	9.1	0.1	0.8	0.81	0.01	Baik
2	14	13.9	-0.1	1	0.98	-0.02	Baik
3	15	15.2	0.2	1.2	1.21	0.01	Baik
4	26	25.8	-0.2	1.5	1.47	-0.03	Baik
5	30	30.1	0.1	2	2.01	0.01	Baik

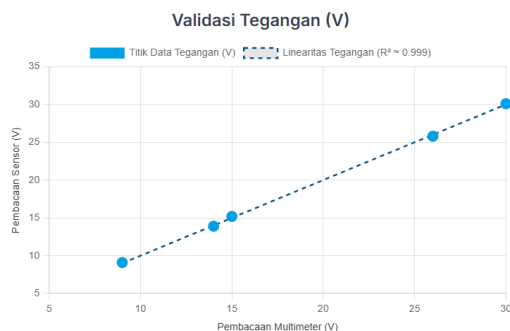
Dari Tabel 2. Hasil pengujian menunjukkan performa yang sangat baik dengan tingkat error maksimal ± 0.2 V untuk tegangan dan ± 0.03 A untuk arus. Akurasi ini berada di bawah toleransi yang ditetapkan, yaitu $\pm 2\%$ untuk tegangan dan $\pm 1\%$ untuk arus, sehingga sensor dinyatakan layak untuk implementasi dalam

sistem deteksi dini PLTMH. Linearitas pembacaan sensor konsisten di seluruh rentang pengukuran, dengan error yang terdistribusi secara merata tanpa bias sistematis.



Gambar 5. Grafik Validasi Tegangan

Gambar 5. Memperlihatkan perbandingan pembacaan sensor INA219 dengan alat ukur referensi untuk tegangan. Grafik menunjukkan linearitas yang sangat baik dengan nilai koefisien determinasi (R^2) mendekati 1.0, mengkonfirmasi akurasi dan konsistensi sensor.



Gambar 6. Grafik Validasi Arus

Gambar 6. Memperlihatkan perbandingan pembacaan sensor INA219 dengan alat ukur referensi untuk arus. Grafik menunjukkan linearitas yang sangat baik dengan nilai R^2 mendekati 1.0, mengkonfirmasi akurasi dan konsistensi sensor.

4.2. Pengujian Sistem Pembangkit

Pengujian sistem pembangkit dilakukan melalui simulasi tiga kondisi debit air: tinggi, normal, dan rendah, menggunakan generator DC 0–90V dan turbin air sederhana. Pengujian ini bertujuan mengevaluasi respons sistem terhadap variasi operasional musiman.

Tabel 3. Hasil Pengujian Kondisi Debit Air Tinggi

N o	Wa ktu	Tegan gan (V)	Ar us (A)	Da ya (W)	Katego (V)	Kate gori (A)	Stat us Rel ay
1	08:00	31.2	2.1	65.5	TINGGI	TINGGI	OFF
2	08:05	29.8	2	59.6	TINGGI	TINGGI	OFF
3	08:10	32.1	2.2	70.6	TINGGI	TINGGI	OFF
4	08:15	30.5	2.1	64.1	TINGGI	TINGGI	OFF
5	08:20	28.9	2	57.8	TINGGI	TINGGI	OFF

Pada Tabel 3. Kondisi debit air tinggi menghasilkan tegangan rata-rata 30,5 V dan arus rata-rata 2,08 A, keduanya melebihi ambang batas aman (26 V dan 2 A). Sistem proteksi memutuskan relay (OFF) pada seluruh pengujian, mencegah kerusakan akibat overvoltage dan overcurrent.

Tabel 4. Hasil Pengujian Kondisi Debit Air Normal

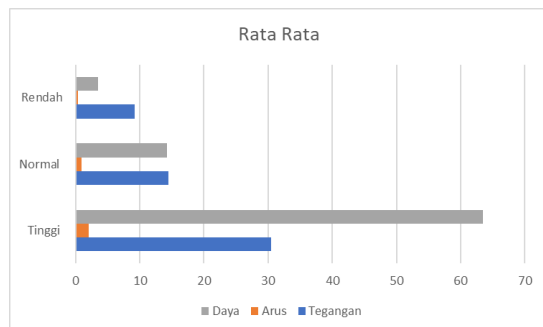
N o	Wa ktu	Tegan gan (V)	Ar us (A)	Da ya (W)	Katego (V)	Kateg ori (A)	Sta tus Rel ay
1	09:00	15.2	1	15.2	NORMAL	NORMAL	ON
2	09:05	14.8	0.9	13.3	NORMAL	NORMAL	ON
3	09:10	15.1	1.1	16.6	NORMAL	NORMAL	ON
4	09:15	14.5	1	14.5	NORMAL	NORMAL	ON
5	09:20	13	0.9	11.7	NORMAL	NORMAL	ON

Berdasarkan Tabel 4. Kondisi debit normal menunjukkan tegangan rata-rata 14,5 V dan arus 0,98 A, berada dalam zona aman. Relay tetap ON pada semua pengujian, menghasilkan daya rata-rata 14 W yang stabil dan efisien.

Tabel 5. Hasil Pengujian Kondisi Debit Air Rendah

N o	Wa ktu	Tegan gan (V)	Ar us (A)	Da ya (W)	Katego (V)	Kateg ori (A)	Sta tus Rel ay
1	10:00	9.5	0.4	3.8	RENDAH	REND AH	OFF
2	10:05	8.8	0.3	2.6	RENDAH	REND AH	OFF
3	10:10	10.2	0.5	5.1	RENDAH	NOR MAL	OFF
4	10:15	9.1	0.4	3.6	RENDAH	REND AH	OFF
5	10:20	8.5	0.3	2.6	RENDAH	REND AH	OFF

Sementara pada Tabel 5. Debit rendah menghasilkan tegangan rata-rata 9,22 V dan arus 0,38 A, di bawah batas efisiensi operasional. Relay otomatis OFF untuk mencegah operasi tidak ekonomis dan menghindari risiko kerusakan jangka panjang.



Gambar 7. Grafik Komparasi Performa Sistem Pada Berbagai Kondisi.

Gambar 7. Memperllihatkan perbandingan rata-rata tegangan, arus, dan daya pada ketiga kondisi, di mana zona hijau menandakan operasi optimal (normal), zona merah kondisi berbahaya (tinggi), dan zona kuning kondisi tidak efisien (rendah).

4.3. Pengujian Skenario

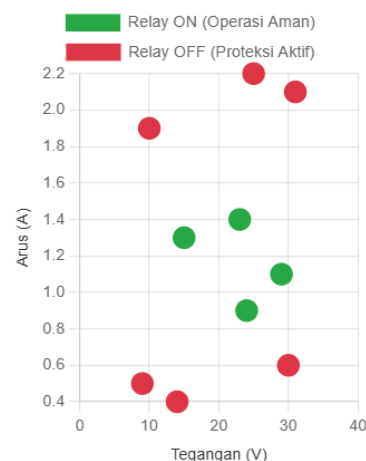
Pengujian dilakukan pada 10 skenario untuk memvalidasi akurasi dan konsistensi sistem Fuzzy Logic dalam mengkategorikan kondisi operasional. Hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil Pengujian Sistem Fuzzy Logic (10 Skenario)

N o	Tegangan (V)	Arus (A)	Kategori Tegangan	Kategori Arus	Aturan fuzzy	Status Relay
1	15	1	NORMAL	NORMAL	Aturan 0	ON
2	31	2.1	TINGGI	TINGGI	Aturan 1	OFF
3	14	0.4	NORMAL	RENDAH	Aturan 2	OFF
4	9	1.8	RENDAH	TINGGI	Aturan 3	OFF
5	29	1.1	TINGGI	NORMAL	Aturan 4	ON
6	16	0.9	NORMAL	NORMAL	Aturan 0	ON
7	33	2.2	TINGGI	TINGGI	Aturan 1	OFF
8	8	0.3	RENDAH	RENDAH	Aturan 2	OFF
9	13	1	NORMAL	NORMAL	Aturan 0	ON

Berdasarkan Tabel 6. Sistem Fuzzy Logic menunjukkan akurasi 100% sesuai lima aturan

yang diimplementasikan. Dari 10 skenario, empat skenario menghasilkan kondisi aman (Relay ON) dengan risiko rendah hingga sedang, sedangkan enam skenario menghasilkan kondisi berbahaya (Relay OFF) dengan risiko tinggi. Hal ini membuktikan bahwa sistem memiliki sensitivitas yang baik dalam mendeteksi kondisi abnormal, namun tetap mempertahankan operasi saat parameter berada dalam batas aman.



Gambar 8. Grafik respon relay proteksi otomatis terhadap skenario gangguan

Visualisasi respon relay terhadap skenario gangguan ditunjukkan pada Gambar 8. Di mana titik hijau menandakan kondisi aman (Relay ON) dan titik merah menandakan kondisi proteksi aktif (Relay OFF). Peta keputusan ini mengonfirmasi keberhasilan implementasi logika fuzzy dalam menentukan status operasional PLTMH secara real-time.

4.4. Perbandingan Efektivitas Metode Threshold dan Fuzzy logic

Metode Threshold bekerja secara biner: nilai dianggap “Normal” jika berada di dalam rentang yang ditentukan dan “Abnormal” jika di luar rentang tersebut. Pendekatan ini cenderung kaku dan kurang mampu menangani kondisi transisi atau ambiguitas. Sebagai contoh, pada Tabel 7, tegangan 24 V dan 13 V sama-sama dikategorikan Normal oleh sistem Threshold, padahal 24 V sudah berada di ambang batas atas yang berpotensi menjadi risiko.

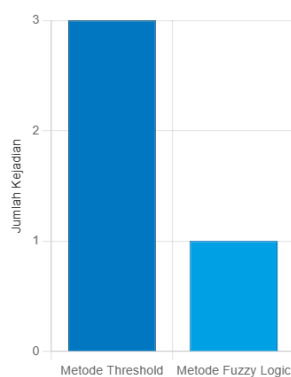
Keunggulan Fuzzy Logic terlihat pada pendekatannya yang mempertimbangkan derajat keanggotaan (membership degree). Sebuah nilai dapat memiliki keanggotaan pada lebih dari satu kategori (misalnya, Rendah,

Normal, Tinggi) dengan bobot yang berbeda. Dengan demikian, nilai 24 V dapat dipersepsikan “cenderung tinggi” meskipun masih dalam batas aman menurut Threshold, sehingga sistem memberikan peringatan dini.

Tabel 7. Hasil Perbandingan Fuzzy dan Threshold

Skenario	Tegangan (V)	Arus (A)	Respon Threshold	Respon fuzzy Logic	Keunggulan fuzzy
Mendekati Batas Atas	24	1.4	NORMAL (Relay ON)	Risiko Sedang (Relay ON + Peringatan)	Peringatan dini meski masih aman
Mendekati Batas Bawah	12.1	0.6	NORMAL (Relay ON)	Risiko Sedang (Relay ON + Peringatan)	Deteksi kondisi tidak efisien
Sedikit di Luar Batas	25	1.6	ABNORMAL (Relay OFF)	Risiko Tinggi (Relay OFF)	Justifikasi risiko lebih jelas
Kombinasi Abnormal	9	1.8	ABNORMAL (Relay OFF)	Risiko Tinggi (Relay OFF + Aturan 3)	Identifikasi penyebab spesifik

Berdasarkan Tabel 7. Fuzzy Logic memberikan deteksi yang lebih sensitif dan kontekstual, mampu mengidentifikasi potensi risiko bahkan saat parameter masih berada di zona aman menurut Threshold. Hal ini terbukti bermanfaat untuk memberikan peringatan dini kepada operator.



Gambar 9. Jumlah false alarm pada metode threshold vs fuzzy logic

Perbandingan jumlah false alarm ditunjukkan pada Gambar 9. Metode Threshold konvensional menghasilkan tiga false alarm dari 20 percobaan (15%), sedangkan Fuzzy Logic hanya menghasilkan satu false alarm (5%). Penurunan false alarm dihitung dengan rumus:

$$\text{Penurunan}(\%) = \frac{(3 - 1)}{3} \times 100\% = 66.7\%$$

Dengan demikian, penerapan *Fuzzy Logic* berhasil menurunkan jumlah false alarm sebesar 66,7%, yang berimplikasi langsung pada peningkatan keandalan sistem dan kepercayaan operator.

4.5. Pembahasan

Hasil implementasi dan pengujian sistem deteksi dini gangguan PLTMH berbasis IoT dengan metode Threshold dan Fuzzy Logic menunjukkan performa yang sangat memuaskan. Tingkat akurasi sensor INA219 dengan error maksimal ± 0.2 V untuk tegangan dan ± 0.03 A untuk arus berada jauh di bawah toleransi yang ditetapkan ($\pm 2\%$ untuk tegangan dan $\pm 1\%$ untuk arus), sehingga sensor dapat diandalkan untuk pemantauan parameter elektrik secara presisi. Linearitas pembacaan yang konsisten dengan nilai R^2 mendekati 1,0 memperkuat validitas data yang menjadi dasar analisis sistem proteksi.

Pada pengujian tiga kondisi debit air, sistem merespons sesuai karakteristik operasional PLTMH. Kondisi debit tinggi menghasilkan overvoltage dan overcurrent, yang secara otomatis memicu proteksi relay OFF untuk mencegah kerusakan. Debit normal menunjukkan stabilitas dan efisiensi operasi, yang sejalan dengan temuan Saragih et al. (2025) bahwa PLTMH pada kondisi debit optimal mampu beroperasi secara efisien dan andal dalam penyediaan energi di daerah terpencil. Sementara itu, debit rendah teridentifikasi sebagai tidak ekonomis sehingga sistem mematikan relay untuk menghindari pemborosan energi dan menjaga keandalan peralatan [1].

Penerapan *Fuzzy Logic* dengan lima aturan pengujian terbukti memiliki akurasi 100% dalam pengkategorian kondisi operasional. Sensitivitas sistem yang tinggi memungkinkan deteksi kondisi abnormal tanpa mengorbankan operasi pada kondisi aman. Integrasi Threshold

sebagai filter awal dan Fuzzy Logic sebagai evaluator risiko memberikan lapisan proteksi ganda yang efektif; Threshold bekerja cepat pada kondisi ekstrem, sedangkan Fuzzy Logic memberikan analisis mendalam pada kondisi transisi.

Perbandingan kedua metode menunjukkan bahwa Fuzzy Logic mampu mengurangi jumlah false alarm hingga 66,7% dibandingkan metode Threshold murni, menurunkan tingkat kesalahan dari 15% menjadi 5%. Kemampuan ini penting untuk menjaga kepercayaan operator dan menghindari penghentian sistem secara prematur.

Sistem komunikasi IoT yang diimplementasikan dengan ESP32 DevKit dan Firebase terbukti andal dalam mengirim data setiap 5 detik, menampilkan informasi secara real-time melalui dashboard aplikasi Android. Integrasi monitoring, analisis risiko, dan kontrol proteksi otomatis menghasilkan sistem yang tidak hanya reaktif terhadap gangguan fatal, tetapi juga proaktif dalam mencegah potensi masalah, sehingga dapat meningkatkan keandalan operasional dan memperpanjang umur komponen PLTMH.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan implementasi dan pengujian sistem deteksi dini gangguan PLTMH berbasis IoT dengan metode Threshold dan Fuzzy Logic, dapat disimpulkan:

5.1. Hasil Utama

Sensor INA219 menunjukkan akurasi tinggi dengan error maksimal ± 0.2 V dan ± 0.03 A, serta linearitas yang konsisten ($R^2 \approx 1.0$). Sistem proteksi berhasil mendeteksi kondisi debit tinggi, normal, dan rendah sesuai parameter batas operasional PLTMH, serta mampu merespons secara otomatis melalui relay ON/OFF.

5.2. Efektivitas Algoritma

Integrasi metode *Threshold* dan *Fuzzy Logic* terbukti efektif. *Threshold* berfungsi sebagai deteksi cepat untuk kondisi ekstrem, sementara *Fuzzy Logic* memberikan analisis adaptif pada kondisi transisi. Pengujian menunjukkan akurasi 100% dalam 10 skenario, dengan penurunan false alarm sebesar 66,7% dibanding *Threshold* murni.

5.3. Kelebihan Sistem

- Monitoring *real-time* setiap 5 detik melalui ESP32 dan Firebase.
- Dashboard Android yang informatif menampilkan grafik parameter dan notifikasi status sistem.
- Proteksi berlapis yang cepat, adaptif, dan proaktif meningkatkan keandalan operasi PLTMH.

5.4. Kekurangan

Sistem masih diuji dalam kondisi simulasi menggunakan generator DC dan turbin sederhana, sehingga hasilnya belum sepenuhnya mencerminkan kondisi riil PLTMH di lapangan.

5.5. Pengembangan Selanjutnya

- Uji coba lapangan pada PLTMH nyata untuk validasi sistem.
- Integrasi modul prediksi berbasis machine learning untuk meningkatkan kemampuan deteksi dini.
- Optimasi proteksi agar dapat disesuaikan dengan variasi debit air musiman yang lebih kompleks.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak terkait yang telah memberi dukungan terhadap penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] W. -, "Pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Air Berbasis Mikrohidro Untuk Meningkatkan Efisiensi Dan Produktivitas Energi Listrik," *J. Inform. dan Tek. Elektro Terap.*, vol. 13, no. 3, Jul. 2025, doi: 10.23960/jitet.v13i3.6810.
- [2] D. Supriyatna, "Analysis of Power Efficiency Produced by AC and DC Generators: A Literature Review," *Motiv. J. Mech. Electr. Ind. Eng.*, vol. 5, no. 2, pp. 261–268, 2023, doi: 10.46574/motivection.v5i2.211.
- [3] J. T. Elektro and U. N. Semarang, "Analisis Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) Berdasarkan Debit Air dan Kebutuhan Energi Listrik," vol. 3, no. 2, pp. 31–39, 2022.
- [4] A. Akhwan, B. Gunari, S. Sunardi, and W. A. Wirawan, "Rancang Bangun Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (Pltmh) Politeknik Perkeretaapian Indonesia Madiun," *Eksergi*, vol. 17, no. 1, p. 15, 2021, doi: 10.32497/eksergi.v17i1.2168.
- [5] T. V. Yastica, M. A. Pulungan, and M.

- Rendra, "Sistem Monitoring Berbasis IoT pada Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro Tangsijaya," *War. LPM*, vol. 27, no. 2, pp. 196–205, 2024, doi: 10.23917/warta.v27i2.4235.
- [6] R. Syahputra, R. M. Fasha, A. N. N. Chamim, and K. Purwanto, "Prototipe Sistem Monitoring pada Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro," *Semesta Tek.*, vol. 25, no. 1, pp. 40–46, 2022, doi: 10.18196/st.v25i1.13180.
- [7] U. Hasyim Asy'ari Basuki, U. Hasyim Asy'ari, and M. M. Rosadi, "Analisis Pengaruh Jumlah Sudu Turbin Pelton Terhadap Daya Generator Pada Prototype Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro Ilhamu Dzinurain Muhandis Retno Eka Pramitasari," *J. Ilm. Nusantara. (JINU)*, vol. 1, no. 5, pp. 136–141, 2024.
- [8] C. F. Yenkun, M. D. Fendji, A. Fopah-Lele, and D. Tsuanyo, "Charge-Controller Optimization on Lead-Acid Battery in Solar PV Systems: Temperature Effects and Efficiency Improvement," *E3S Web Conf.*, vol. 354, 2022, doi: 10.1051/e3sconf/202235401003.
- [9] M. Rizqi Tri and A. Sutikno, "Analisis Kinerja Charging Model Yx 1224-2 Pada 2 Tipe Baterai Aki," *J. Ilmu Tek.*, vol. 1, no. 1, pp. 1–8, 2023.
- [10] M. Dermawan and S. Meliala, "Design Traffic Light of HCSR04 Sensor Fuzzy Logic Method Based on Arduino Mega 2560," *Int. J. Eng. Sci. InformationTechnology*, vol. 2, no. 4, pp. 133–143, 2022.
- [11] N. Cameron, "ESP32 Microcontroller," in *ESP32 Formats and Communication: Application of Communication Protocols with ESP32 Microcontroller*, Berkeley, CA: Apress, 2023, pp. 1–54. doi: 10.1007/978-1-4842-9376-8_1.
- [12] J. O. Pardede and K. Brahmana, "Improving Reading Accuracy of ACS712 Current Sensor with ATmega328 10-Bit ADC: Enhancing Resolution to 5Ma/BIT via AD620 Differential Amplifier and Kalman Filters," *J. Technomaterial Phys.*, vol. 5, no. 2, pp. 104–110, 2023, doi: 10.32734/jotpv5i2.11355.
- [13] M. Dary Daffa Haque, "Penerapan Logika Fuzzy Mamdani Untuk Optimasi Persediaan Stok Makanan Hewan," *Media Online*, vol. 4, no. 1, pp. 427–437, 2023, doi: 10.30865/klik.v4i1.1160.
- [14] H. T. T. Truong, H. D. Le, H. T. Nguyen, and N. T. Luong, "Routing Protocol against Flooding Attack Using Median Value and Fixed Threshold," *J. Commun.*, vol. 19, no. 6, pp. 298–307, 2024, doi: 10.12720/jcm.19.6.298-307.
- [15] Z. H., H. A., and M. M., "Internet of Things (IoT): Definitions, Challenges and Recent Research Directions," *Int. J. Comput. Appl.*, vol. 128, no. 1, pp. 37–47, 2015, doi: 10.5120/ijca2015906430.
- [16] M. F. Fahrudin, D. E. Yuliana, and R. F. Rizal, "IoT-Based Automatic Cat Feeder Prototype," *JTECS J. Sist. Telekomun. Elektron. Sist. Kontrol Power Sist. dan Komput.*, vol. 4, no. 1, p. 45, 2024, doi: 10.32503/jtecs.v4i1.4934.