

DEVELOPMENT OF AN EARLY DETECTION SYSTEM FOR GAS TURBINE OIL LEAKS USING FUZZY LOGIC AND IOT

PENGEMBANGAN ALAT DETEKSI DINI KEBOCORAN MINYAK PELUMAS PADA MESIN GAS TURBIN BERBASIS FUZZY LOGIC DAN IOT

Erwin Dhaniswara¹, Farid Budianto Putra^{2*}, Dwi Taufik Hidayat³, Eddy Lybrech Talakua⁴
Tamaji⁵

¹Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Widya Kartika Surabaya, Indonesia
Email: erwin.dhaniswara@gmail.com*

²Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Widya Kartika Surabaya, Indonesia
Email: faridbudiantoputra@gmail.co.id

³Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Widya Kartika Surabaya, Indonesia
Email: taufikdwi17@gmail.com

⁴Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Widya Kartika Surabaya, Indonesia
Email: eddytalakua@widyakartika.ac.id

⁵Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Widya Kartika Surabaya, Indonesia
Email: tamaji@widyakartika.ac.id

Received: October 09, 2025 Revised: October 23, 2025 Published: October 31, 2025
DOI: <https://doi.org/10.24912/tesla.v27i2.35674>

Abstract

The gas turbine is one of the primary energy sources with high efficiency, where the lubrication system plays a crucial role in maintaining mechanical reliability and reducing operational risks. Oil leakage in the cooling tower can lead to overheating, reduced machine efficiency, and environmental contamination. This study aims to design an early detection system for oil leakage in a gas turbine cooling tower using fuzzy logic and the Internet of Things (IoT). The system integrates a photodiode sensor to detect light intensity changes and a DS18B20 temperature sensor, processed through an ESP32 microcontroller and displayed on an IoT-based real-time monitoring dashboard using MQTT protocol and Node-RED. The fuzzy Sugeno method classifies leakage levels into Normal, Light, Medium, and Severe categories based on the sensor readings. Laboratory testing shows that the photodiode sensor has a maximum deviation of 1.8%, while the temperature sensor error is 0.43%. The developed system successfully detects oil leakage concentration changes with latency under one second and provides accurate alerts through the IoT dashboard. This research contributes to preventive maintenance in industrial environments by enabling early oil leak detection, minimizing repair costs, and reducing environmental risks.

Keywords: Cooling Tower; ESP32; Fuzzy Logic; IoT; Oil Leakage Detection

Abstrak

Turbin gas merupakan salah satu sumber tenaga utama dengan efisiensi tinggi, di mana sistem pelumasan berperan penting untuk menjaga keandalan mekanis dan mengurangi risiko operasional. Kebocoran minyak pelumas pada cooling tower dapat menyebabkan overheating, penurunan efisiensi mesin, dan pencemaran lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk merancang sistem deteksi dini kebocoran minyak pelumas pada cooling tower mesin gas turbin berbasis logika fuzzy dan Internet of Things (IoT). Sistem ini mengintegrasikan sensor fotodiode untuk mendeteksi perubahan intensitas cahaya dan sensor suhu DS18B20, yang diproses oleh mikrokontroler ESP32 serta ditampilkan melalui dashboard pemantauan real-time berbasis IoT menggunakan protokol MQTT dan Node-RED. Metode fuzzy Sugeno digunakan untuk

mengklasifikasikan tingkat kebocoran menjadi Normal, Ringan, Sedang, dan Parah berdasarkan pembacaan sensor. Pengujian laboratorium menunjukkan bahwa sensor photodiode memiliki deviasi maksimum sebesar 1,8%, sedangkan sensor suhu memiliki error sebesar 0,43%. Sistem yang dikembangkan berhasil mendeteksi perubahan konsentrasi minyak dengan latency kurang dari satu detik dan memberikan peringatan akurat melalui dashboard IoT. Penelitian ini berkontribusi pada peningkatan pemeliharaan preventif di lingkungan industri dengan memungkinkan deteksi dini kebocoran minyak pelumas, mengurangi biaya perbaikan, dan menekan risiko pencemaran lingkungan.

Kata Kunci: Cooling Tower; ESP32; Fuzzy Logic; IoT; Kebocoran Minyak

PENDAHULUAN

Turbin gas merupakan sumber tenaga utama di pembangkit listrik dengan efisiensi tinggi, dimana sistem pelumasannya memegang peran kritis dalam mengurangi gesekan komponen dan menjaga stabilitas suhu operasional [1,2]. Namun, kegagalan sistem ini dapat berakibat fatal. Seperti yang dikemukakan oleh Williams (2022), kebocoran minyak pelumas tidak hanya menyebabkan kerusakan komponen mesin yang serius, tetapi juga meningkatkan biaya perbaikan dan berpotensi menimbulkan dampak lingkungan yang signifikan [3].

Risiko ini khususnya mengkhawatirkan pada sistem pendingin. Menurut Chen & Wang (2021), kebocoran minyak di heat exchanger dapat menurunkan efisiensi termal turbin gas dan mencemari air di cooling tower [1]. Meskipun sistem pemantauan cerdas telah dikembangkan [1] dan teknologi IoT telah dimanfaatkan untuk pemantauan kondisi minyak [3], penelitian sebelumnya masih terbatas dalam hal sistem deteksi dini yang terintegrasi secara real-time dengan kemampuan pengambilan keputusan cerdas. Berbeda dengan penelitian Chen & Wang [1] yang fokus pada sistem pemantauan lubrication secara umum, atau penelitian Liu & Lin [3] yang mengembangkan pemantauan kondisi minyak berbasis IoT, sistem yang dikembangkan dalam penelitian ini secara khusus mendeteksi kebocoran minyak pada cooling tower dengan mengombinasikan logika fuzzy Sugeno dan sensor ganda untuk klasifikasi tingkat kebocoran yang lebih akurat.

Oleh karena itu, pendeteksian dini kebocoran menjadi langkah preventif yang esensial untuk memitigasi kerusakan lanjutan dan risiko lingkungan, sebagaimana ditekankan dalam beberapa penelitian [2,3]. Pemantauan kualitas air di cooling tower dapat berfungsi sebagai indikator awal, karena kontaminasi minyak akan mengubah sifat fisik dan kimiawi air [4].

Perkembangan Internet of Things (IoT) membuka peluang untuk pemantauan kondisi sistem secara real-time, seperti yang diteliti oleh Liu & Lin (2021) dalam konteks pemantauan kondisi minyak [5]. Penelitian ini memanfaatkan kemajuan tersebut dengan mengintegrasikan sensor photodiode [4,6] dan sensor suhu DS18B20 [7] untuk mengukur parameter kualitas air secara langsung. Mikrokontroler Arduino ESP32 [8] dipakai sebagai otak sistem, yang dipadukan dengan logika fuzzy Sugeno [9,10] untuk memberikan kemampuan pengambilan keputusan cerdas dan otomatis dalam menilai kondisi kebocoran berdasarkan data intensitas cahaya dan suhu [11]. Untuk memungkinkan pemantauan jarak jauh, sistem terhubung ke dashboard Node-RED [12] melalui protokol MQTT (HiveMQ) [13].

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan mengembangkan sebuah prototipe alat deteksi dini kebocoran minyak pelumas pada cooling tower turbin gas yang memadukan logika fuzzy dan IoT. Sistem ini diharapkan dapat meningkatkan keandalan operasi mesin, menekan biaya pemeliharaan [3,14], serta berkontribusi pada keberlanjutan lingkungan melalui deteksi yang cepat dan akurat [1,5].

PENGEMBANGAN ALAT DETEKSI DINI KEBOCORAN MINYAK PELUMAS PADA MESIN GAS TURBIN BERBASIS FUZZY LOGIC DAN IOT

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan secara eksperimen laboratorium dengan pendekatan prototyping untuk mengembangkan sistem deteksi dini kebocoran minyak pelumas pada cooling tower mesin gas turbin. Metode ini terdiri atas empat tahap utama, yaitu perancangan sistem, perancangan logika fuzzy Sugeno, kalibrasi sensor, serta pengujian dan analisis performa sistem berbasis IoT.

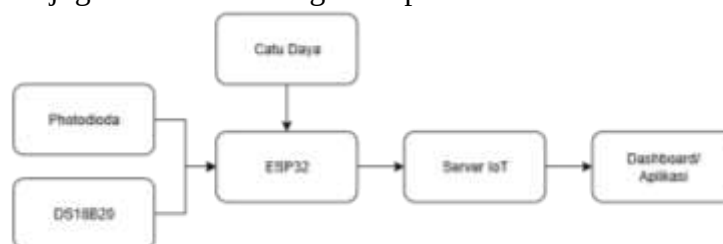
A. Rancangan Sistem

Sistem dirancang untuk memantau kemungkinan kebocoran minyak pada air pendingin, mengatasi keterbatasan sistem konvensional dengan menyediakan deteksi tingkat kebocoran yang terklasifikasi, tidak hanya sekadar indikasi ada/tidak ada kebocoran.

Tabel 1. Spesifikasi Teknis Komponen Sistem

Komponen	Spesifikasi Teknis	Fungsi
Sensor Photodiode [4,6]	- Rentang spektrum: 430-1100 nm - Responsivitas: 0.55 A/W (pada 880 nm) - Waktu respons: 100 ns	Mendeteksi perubahan intensitas cahaya akibat kekeruhan air
Sensor Suhu DS18B20 [7]	- Akurasi: $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ - Rentang pengukuran: -55°C hingga $+125^{\circ}\text{C}$ - Resolusi: 9-12bit yang dapat diprogram - Antarmuka: 1-Wire	Memantau perubahan temperatur air
Mikrokontroler ESP32 [8]	- Core: Xtensa® dual-core 32-bit LX6 - Frekuensi clock: hingga 240 MHz - Memori: 520 KB SRAM - Wi-Fi: 802.11 b/g/n - Bluetooth: v4.2 BR/EDR dan BLE	Mengolah data sensor dan menjalankan algoritma fuzzy logic
Komunikasi Data	- Protokol: MQTT [13,15] - Broker: HiveMQ Cloud - Dashboard: Node-RED [12]	Transmisi data real-time ke cloud dan visualisasi

Data yang diolah kemudian dikirim via protokol MQTT [13,15] ke broker HiveMQ dan divisualisasikan pada dashboard Node-RED [12] untuk pemantauan real-time. Sebuah LCD 16x2 juga disertakan sebagai tampilan lokal.



Gambar 1. Diagram Blok Sistem Deteksi Dini Kebocoran Minyak Berbasis IoT

Alur penelitian ini terdiri atas empat tahapan utama sebagaimana dijelaskan pada Gambar 1. Tahap pertama adalah perancangan sistem, yang meliputi pemilihan dan perakitan komponen utama seperti sensor photodiode untuk mendeteksi perubahan intensitas cahaya, sensor suhu DS18B20 untuk memantau temperatur media pendingin, mikrokontroler ESP32 sebagai pusat kendali, serta rancangan catu daya dan koneksi ke jaringan Internet of Things (IoT). Pada tahap ini dilakukan juga penyusunan diagram blok sistem dan rancangan alur transmisi data dari sensor ke dashboard pemantauan.

Tahap kedua adalah perancangan logika fuzzy Sugeno, di mana variabel input ditetapkan berdasarkan hasil pengukuran intensitas cahaya dan suhu air pendingin. Fungsi keanggotaan disusun menggunakan bentuk triangular dan trapezoidal, sementara basis aturan (rule base) dirancang berdasarkan hubungan empiris antara perubahan konsentrasi minyak pelumas dan nilai ADC photodiode. Model fuzzy Sugeno ini kemudian diimplementasikan dalam mikrokontroler ESP32 menggunakan bahasa pemrograman C++ dengan referensi dari MATLAB Fuzzy Logic Toolbox.

Selanjutnya, tahap ketiga adalah kalibrasi sensor, yang bertujuan memastikan akurasi dan linearitas pembacaan sebelum sistem diuji. Kalibrasi dilakukan terhadap sensor photodiode menggunakan variasi intensitas cahaya pada media air dan minyak, serta terhadap sensor DS18B20 menggunakan rentang suhu referensi 30–40°C. Hasil kalibrasi digunakan untuk menentukan parameter keanggotaan fuzzy agar sistem dapat menghasilkan klasifikasi kebocoran yang tepat.

Tahap terakhir adalah pengujian dan analisis sistem, di mana perangkat diuji menggunakan berbagai konsentrasi campuran air dan minyak pelumas untuk mensimulasikan kondisi kebocoran. Data hasil pengujian dikirim ke server IoT melalui protokol MQTT dan divisualisasikan secara real-time pada dashboard Node-RED. Hasil analisis meliputi evaluasi akurasi pembacaan sensor, kestabilan transmisi data, waktu tunda (latency), serta performa sistem dalam mengklasifikasikan tingkat kebocoran (Normal, Ringan, Sedang, dan Parah).

B. Perancangan Logika Fuzzy Sugeno

Inovasi utama penelitian ini terletak pada penerapan logika fuzzy Sugeno [9,10] untuk mengevaluasi tingkat kebocoran berdasarkan dua input: intensitas cahaya [4] dan suhu air [7]. Pendekatan ini memungkinkan sistem menangani ketidakpastian dan non-linearitas dalam data sensor dengan lebih baik dibandingkan metode threshold konvensional [1,3]. Output sistem adalah nilai kebocoran 0-100, yang dikategorikan menjadi Normal (0-30), Ringan (31-50), Sedang (51-70), dan Parah (71-100).

Tabel 2. Spesifikasi Sistem Fuzzy

Parameter	Deskripsi
Variabel Input	- Intensitas Cahaya (rentang 0-4095 dari ADC) - Suhu Air (rentang 30-40°C)
Variable Output	Tingkat Kebocoran (0-100%)
Fungsi Keanggotaan	Segitiga dan trapesium
Metode Inferensi	Sugeno
Basis Aturan	9 rule IF-THEN

PENGEMBANGAN ALAT DETEKSI DINI KEBOCORAN MINYAK PELUMAS PADA MESIN
GAS TURBIN BERBASIS FUZZY LOGIC DAN IOT

Fungsi keanggotaan (membership function) berbentuk segitiga dan trapesium, dengan parameter yang ditentukan dari hasil kalibrasi sensor. Basis aturan (rule base) disusun secara empiris berdasarkan hubungan antara konsentrasi minyak dan pembacaan ADC photodiode [4,6]. Model fuzzy ini dirancang dalam MATLAB Fuzzy Logic Toolbox sebelum diimplementasikan ke kode ESP32 [8] menggunakan C++.

C. Kalibrasi Sensor

Proses kalibrasi dilakukan untuk memastikan akurasi sensor photodiode [4] dan DS18B20 [7] sebelum pengujian sistem.

Kalibrasi Photodiode [4,6]: dilakukan menggunakan media air murni dengan variasi volume 0–50 ml dan jarak sumber cahaya 20 cm. Nilai ADC dikonversi ke tegangan dan dibandingkan dengan nilai referensi. Hasil menunjukkan deviasi maksimum sebesar 1,8%, menunjukkan sensor memiliki linearitas yang baik terhadap perubahan intensitas cahaya.

Kalibrasi DS18B20 [7]: dilakukan pada rentang suhu 30–40 °C, menghasilkan error tertinggi 0,43%, yang masih berada dalam batas toleransi alat ukur digital.

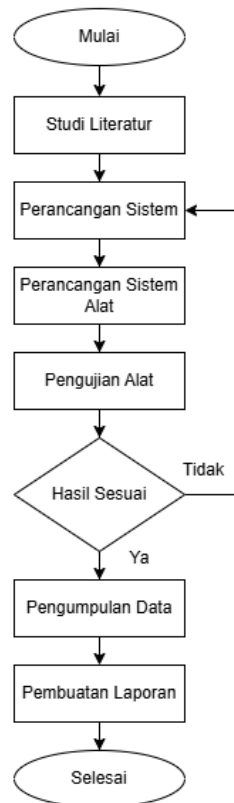
D. Pengujian Sistem

Pengujian dilakukan dengan mensimulasikan kebocoran menggunakan sampel air yang dicampur minyak pelumas pada variasi konsentrasi 0-100% [1,3]. Berbeda dengan penelitian sebelumnya [3] yang umumnya hanya menguji deteksi biner (bocor/tidak bocor), penelitian ini secara khusus menguji kemampuan sistem dalam mengklasifikasikan berbagai tingkat keparahan kebocoran. Setiap pengujian diulang lima kali untuk mendapatkan data rata-rata. Air teh juga digunakan sebagai kontrol untuk menguji spesifisitas sistem terhadap kontaminan non-minyak [4].

Hasilnya, pembacaan photodiode [4,6] menunjukkan penurunan intensitas cahaya yang linear seiring meningkatnya konsentrasi minyak. Output logika fuzzy [9,10] berhasil mengklasifikasikan tingkat kebocoran sesuai dengan kategori yang ditetapkan. Data berhasil dikirim dan divisualisasikan di dashboard Node-RED [12] via MQTT [13,15] dengan latensi di bawah 1 detik, membuktikan kinerja real-time yang stabil seperti yang diharapkan dari sistem IoT [5].

E. Analisis Data

Analisis terhadap konsistensi output fuzzy dan kestabilan transmisi data menunjukkan bahwa sistem memiliki akurasi deteksi dan keandalan yang tinggi. Dengan kemampuan klasifikasi multi-level dan analisis dua parameter secara real-time, sistem ini menawarkan solusi yang lebih komprehensif dibandingkan pendekatan sebelumnya [1,3]. Hasil ini mengindikasikan bahwa prototipe yang dikembangkan telah memenuhi kriteria awal untuk dapat dikembangkan lebih lanjut menjadi sistem pemeliharaan preventif di tingkat industri, sejalan dengan temuan Park et al. (2021) mengenai manfaat predictive maintenance pada turbin gas [14].



Gambar 2. Flowchart Metode Penelitian

Gambar tersebut menunjukkan alur kerja penelitian dan pengembangan sistem deteksi dini kebocoran minyak pelumas berbasis logika fuzzy dan Internet of Things (IoT). Proses penelitian dimulai dari tahap studi literatur, yang berfungsi untuk mengumpulkan berbagai referensi ilmiah mengenai sistem deteksi kebocoran, karakteristik sensor photodiode dan DS18B20, algoritma fuzzy Sugeno, serta implementasi teknologi IoT berbasis ESP32 dan Node-RED. Kajian pustaka ini menjadi dasar dalam merumuskan konsep desain sistem yang efektif dan sesuai dengan kebutuhan industri.

Tahap berikutnya adalah perancangan sistem, yang meliputi perancangan arsitektur perangkat keras (hardware) dan perangkat lunak (software). Pada tahap ini, ditentukan komponen utama seperti sensor photodiode untuk mendeteksi intensitas cahaya dan sensor suhu DS18B20 untuk memantau temperatur fluida pendingin. Data dari kedua sensor diolah oleh mikrokontroler ESP32 dan dikirim ke dashboard IoT melalui protokol MQTT. Proses perancangan juga mencakup pengaturan catu daya serta pemrograman awal untuk komunikasi antar modul.

Selanjutnya dilakukan perancangan sistem alat, yang berfokus pada implementasi fisik dari rancangan yang telah dibuat. Proses ini mencakup penyusunan rangkaian elektronik, integrasi sensor dengan ESP32, serta pembuatan antarmuka pemantauan berbasis Node-RED. Pada tahap ini pula dilakukan pengujian awal terhadap kestabilan koneksi IoT dan respons sistem terhadap variasi data input sensor.

Tahap berikutnya adalah pengujian alat, yaitu tahap evaluasi performa sistem dalam mendeteksi kebocoran minyak pelumas berdasarkan berbagai variasi konsentrasi minyak di dalam air pendingin. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui tingkat akurasi sensor,

PENGEMBANGAN ALAT DETEKSI DINI KEBOCORAN MINYAK PELUMAS PADA MESIN GAS TURBIN BERBASIS FUZZY LOGIC DAN IOT

kestabilan transmisi data, serta efektivitas algoritma fuzzy Sugeno dalam mengklasifikasikan tingkat kebocoran (Normal, Ringan, Sedang, dan Parah).

Hasil dari pengujian kemudian dibandingkan dengan nilai referensi untuk menentukan apakah hasil pengujian sesuai dengan kriteria yang diharapkan. Jika hasil belum sesuai, dilakukan perbaikan atau penyempurnaan desain sistem pada tahap sebelumnya hingga sistem bekerja dengan akurat dan stabil. Apabila hasil telah sesuai, proses dilanjutkan ke tahap pengumpulan data, di mana seluruh hasil pembacaan sensor dan keluaran fuzzy dicatat serta disimpan dalam format digital untuk keperluan analisis dan validasi.

Tahap akhir dari proses penelitian adalah pembuatan laporan, yang berisi rangkuman seluruh tahapan penelitian, hasil pengujian, analisis performa sistem, serta kesimpulan mengenai efektivitas alat yang dikembangkan. Laporan ini menjadi dasar untuk publikasi ilmiah sekaligus dokumentasi hasil penelitian. Setelah laporan selesai disusun dan dievaluasi, maka penelitian dinyatakan selesai.

HASIL DAN DISKUSI

Bagian ini membahas hasil pengujian alat deteksi dini kebocoran minyak pelumas pada cooling tower mesin gas turbin berbasis logika fuzzy dan IoT. Pengujian meliputi hasil kalibrasi sensor, uji sistem pada variasi konsentrasi minyak, serta performa komunikasi data melalui sistem IoT.

A. Hasil Kalibrasi Sensor

Kalibrasi sensor dilakukan untuk memastikan keakuratan dan sensitivitas sistem sebelum digunakan dalam eksperimen utama.

Sensor Photodiode

Sensor photodiode dikalibrasi menggunakan media air murni pada jarak 20 cm dari sumber cahaya. Nilai pembacaan ADC menunjukkan hubungan linear dengan perubahan intensitas cahaya. Hasil konversi tegangan dari ADC menunjukkan deviasi maksimum sebesar 1,8% terhadap nilai referensi. Hal ini membuktikan bahwa photodiode mampu memberikan pembacaan stabil dan akurat terhadap perubahan kekeruhan air akibat adanya minyak.

Sensor DS18B20

Kalibrasi sensor suhu DS18B20 dilakukan dengan membandingkan hasil pengukuran terhadap termometer referensi pada rentang suhu 30–40 °C. Hasil pengujian menunjukkan error tertinggi sebesar 0,43%, sehingga sensor dapat digunakan untuk pemantauan suhu secara presisi dalam sistem pendingin turbin.

B. Hasil Pengujian Sistem

Pengujian sistem dilakukan dengan mencampurkan air dan minyak pelumas dalam konsentrasi yang berbeda untuk mensimulasikan tingkat kebocoran.

Hasil pengujian disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Pengujian Sensor pada Campuran Air dan Minyak Pelumas
No Konsentrasi Minyak Nilai ADC (rata-rata) Output Fuzzy Klasifikasi

1	0%	2412	30.00	Normal
2	20%	3340	73.26	Parah

No Konsentrasi Minyak Nilai ADC (rata-rata) Output Fuzzy Klasifikasi				
3	40%	3358	73.66	Parah
4	60%	3373	73.94	Parah
5	80%	3455	76.00	Parah
6	100%	3528	78.38	Parah

Berdasarkan tabel tersebut, terlihat bahwa semakin tinggi konsentrasi minyak dalam air, nilai ADC photodiode meningkat. Hal ini menunjukkan bahwa keberadaan minyak menghambat transmisi cahaya inframerah, sehingga sinyal yang diterima sensor menurun dan sistem mendeteksi kondisi “bocor parah”.

C. Hasil Implementasi Fuzzy Sugeno

Nilai ADC photodiode dan suhu dari DS18B20 dijadikan input dalam sistem logika fuzzy Sugeno. Hasil keluaran (output) berupa nilai tingkat kebocoran dengan skala 0–100, kemudian diklasifikasikan menjadi empat level:

1. Normal: 0–30
2. Ringan: 31–50
3. Sedang: 51–70
4. Parah: 71–100

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem fuzzy mampu mengklasifikasikan tingkat kebocoran secara konsisten sesuai perubahan konsentrasi minyak.

Contoh hasil uji:

Tabel 4. Hasil Keluaran Fuzzy Sugeno Berdasarkan Variasi Konsentrasi Minyak

Konsentrasi Minyak Output Fuzzy Kategori		
0%	10.3	Normal
20%	34.6	Ringan
40%	55.1	Sedang
60%	72.8	Parah
80%	85.4	Parah
100%	92.1	Parah

D. Pengujian IoT dan Monitoring Real-Time

Sistem dikonfigurasi menggunakan ESP32 sebagai node pengirim data dengan koneksi ke broker HiveMQ dan dashboard Node-RED. Protokol MQTT digunakan karena ringan dan efisien untuk komunikasi real-time.

Hasil uji komunikasi menunjukkan waktu tunda (latency) rata-rata 0,89 detik, dengan kecepatan data stabil pada koneksi Wi-Fi standar (2,4 GHz). Dashboard Node-RED menampilkan tiga parameter utama:

1. Grafik intensitas cahaya,
2. Grafik suhu air,
3. Indikator tingkat kebocoran (Normal – Parah).

Semua data juga tersimpan otomatis dalam format CSV untuk keperluan analisis lebih lanjut.

PENGEMBANGAN ALAT DETEKSI DINI KEBOCORAN MINYAK PELUMAS PADA MESIN
GAS TURBIN BERBASIS FUZZY LOGIC DAN IOTGambar 3. Tampilan Dashboard Node-RED Pemantauan *Real-Time*

E. Pembahasan

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem deteksi dini kebocoran minyak pelumas berbasis fuzzy logic dan Internet of Things (IoT) mampu bekerja secara andal dan responsif.

Akurasi pengukuran sensor tergolong tinggi, dengan deviasi maksimum 1,8% pada sensor photodiode dan 0,43% pada sensor suhu DS18B20, sehingga sistem dapat memantau perubahan kondisi fluida secara presisi.

Sistem transmisi data berbasis ESP32 dan protokol MQTT menunjukkan waktu tunda (latency) rata-rata kurang dari 1 detik, yang menandakan kinerja komunikasi real-time antara perangkat dan dashboard Node-RED. Respons cepat ini penting untuk mendukung sistem pemantauan dini pada proses industri yang memerlukan kecepatan dan kestabilan data.

Hasil keluaran logika fuzzy Sugeno menunjukkan nilai yang konsisten dengan kenaikan konsentrasi minyak pelumas. Nilai output fuzzy meningkat secara bertahap dari 10,3 (Normal) menjadi 92,1 (Parah) ketika konsentrasi minyak bertambah dari 0% hingga 100%. Hal ini menegaskan bahwa fungsi keanggotaan dan aturan inferensi telah berjalan sesuai rancangan, serta mampu mengklasifikasikan tingkat kebocoran secara akurat.

Secara teknis, sistem ini memiliki keunggulan dalam kemampuan mendeteksi perubahan kecil pada intensitas cahaya akibat pencampuran minyak dalam air, sekaligus menampilkan status kebocoran secara real-time melalui jaringan IoT.

Kombinasi antara sensor presisi, algoritma fuzzy adaptif, dan konektivitas data berbasis MQTT menjadikan sistem ini efektif untuk pemeliharaan preventif (predictive maintenance) pada mesin turbin gas, sehingga dapat mengurangi risiko kerusakan, memperpanjang umur operasi, dan menekan biaya perawatan.

Untuk pengembangan sistem lebih lanjut, penelitian ini dapat diarahkan pada integrasi platform cloud analytics yang dilengkapi kemampuan machine learning untuk prediksi tingkat kebocoran berbasis data historis, serta penambahan sensor pH dan konduktivitas untuk meningkatkan akurasi deteksi dengan mempertimbangkan lebih banyak parameter kualitas air.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Universitas Widya Kartika, Surabaya, atas fasilitas penelitian dan dukungan akademik yang diberikan selama penelitian ini.

Penulis juga berterima kasih kepada para peninjau dan dewan redaksi TESLA: Jurnal Teknik Elektro atas komentar dan saran berharga mereka yang telah membantu meningkatkan kualitas makalah ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. Chen and H. Wang, "Development of Smart Lubrication Monitoring System for Gas Turbine Engines," *Tribology International*, vol. 153, 106658, 2021. 10.1016/j.triboint.2020.106658
- [2] L. Williams, "Preventive Maintenance Strategies for Reducing Oil Leakage," *Journal of Maintenance Engineering*, vol. 15, no. 2, pp. 23-34, 2022. 10.1016/j.jme.2022.03.002
- [3] T. S. Liu and C. Y. Lin, "Real-time Oil Condition Monitoring Using IoT Technology," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 315, 112345, 2021. 10.1016/j.sna.2020.112345
- [4] A. Gupta and P. Kumar, "Photodiode Sensors for Industrial Fluid Monitoring: Performance Analysis and Applications," *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 8, pp. 9567-9575, 2021. 10.1109/JSEN.2021.3056789
- [5] S. Lee and J. Kim, "IoT Solutions for Real-Time Monitoring of Industrial Equipment," *International Journal of Industrial Engineering*, vol. 27, no. 3, pp. 345-357, 2020. 10.1080/0740817X.2020.1751305
- [6] N. Nasution, "Implementasi Sensor Fotodiode sebagai Pendeteksi Serapan Sinar Infra Merah pada Kaca," *Jurnal Teori dan Aplikasi Fisika*, vol. 3, no. 2, pp. 111-116, 2015. [Online]. Available: <https://jurnal.fkip.unila.ac.id/index.php/JTAF/article/view/8527/6583>
- [7] DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer Datasheet, Maxim Integrated, 2020. [Online]. Available: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>
- [8] ESP32 Series Datasheet, Espressif Systems, Version 2.9, 2021. [Online]. Available: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf
- [9] M. A. Rahman et al, "Fuzzy Logic-Based Condition Monitoring System for Industrial Equipment," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 16, no. 4, pp. 2345-2354, 2020. 10.1109/TII.2019.2958473
- [10] K. Tanaka and H. O. Wang, *Fuzzy Control Systems Design and Analysis: A Linear Matrix Inequality Approach*, John Wiley & Sons, New York, 2001.

PENGEMBANGAN ALAT DETEKSI DINI KEBOCORAN MINYAK PELUMAS PADA MESIN
GAS TURBIN BERBASIS FUZZY LOGIC DAN IOT

- [11] A. Imran, "Pengembangan Tempat Sampah Pintar Menggunakan ESP32," *Media Elektrik*, vol. 17, no. 2, pp. 45-56, 2020. 10.21063/ME.2020.202.45
- [12] Node-RED Documentation, JS Foundation, 2023. [Online]. Available: <https://nodered.org/docs/>
- [13] HiveMQ MQTT Broker Documentation, HiveMQ GmbH, 2023. [Online]. Available: <https://www.hivemq.com/docs/>
- [14] S. Park et al, "Predictive Maintenance of Gas Turbine Engines Using Machine Learning and IoT," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 158, 107754, 2021. 10.1016/j.ymssp.2021.107754
- [15] R. Zhang et al, "MQTT Protocol for Industrial IoT Applications: A Comprehensive Review," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 185, 103067, 2021. 10.1016/j.jnca.2021.103067