

MODEL MONITORING IOT MENGGUNAKAN LOGIKA FUZZY UNTUK PREDIKSI TINGKAT KELELAHAN MESIN REAL-TIME

Muhammad Furqon Siregar¹, Siti Sarah Harahap²

¹Program Studi Teknologi Informasi, Fakultas Teknik dan Ilmu Komputer, Universitas Pembinaan Masyarakat Indonesia, Medan, Indonesia

²Program Studi Informatika, Fakultas Teknologi dan Ilmu Komputer, Universitas Satya Terra Bhinneka, Medan, Indonesia

e-mail: ¹muhammad.furqon.srg@gmail.com, ²sarahharahap@satyaterrabhinneka.ac.id

ABSTRAK

Perkembangan teknologi industri modern menuntut adanya tingkat efisiensi tinggi serta zero downtime pada mesin-mesin produksi. Fenomena kelelahan mesin (machine fatigue) yang terakumulasi akibat beban kerja berlebih tanpa deteksi dini sering kali memicu kerusakan fatal mendadak. Penelitian ini bertujuan untuk mengusulkan sebuah model monitoring cerdas berbasis teknologi Internet of Things (IoT) dengan integrasi logika fuzzy untuk mendeteksi tingkat kelelahan mesin secara real-time. Sensor suhu DS18B20 dan sensor getaran akselerometer MPU6050 diimplementasikan pada lapis fisik untuk melakukan akuisisi data aktual berdasarkan standarisasi ISO 10816-3. Parameter fisik tersebut kemudian ditransmisikan ke server cloud melalui protokol MQTT, di mana metode logika fuzzy Mamdani memproses input untuk menghasilkan status kondisi mesin. Hasil penelitian menunjukkan model ini berhasil mendeteksi dan mengklasifikasikan kelelahan mesin menjadi status Aman, Waspada, dan Bahaya dengan tingkat akurasi hasil pengujian menunjukkan bahwa keluaran sistem memiliki kesesuaian 100% dengan hasil simulasi MATLAB pada 20 kombinasi data uji. Sistem juga menghasilkan rata-rata latensi pengiriman sebesar 086 detik. Sistem ini menunjukkan potensi untuk diintegrasikan sebagai bagian dari keputusan strategi pemeliharaan preventif pada ekosistem manufaktur modern.

Kata kunci: Logika Fuzzy; Internet Of Things; Kelelahan Mesin; Pemeliharaan Preventif; ISO

ABSTRACT

Modern industrial technology development demands high efficiency levels and zero downtime for production machinery. The phenomenon of machine fatigue, which accumulates due to excessive workload without early detection, frequently triggers sudden catastrophic failures. This study aims to propose an intelligent monitoring model based on Internet of Things (IoT) technology integrated with fuzzy logic to detect machine fatigue in real-time. A DS18B20 temperature sensor and an MPU6050 accelerometer vibration sensor are implemented on the physical layer to perform actual data acquisition aligned with ISO 10816-3 standard. These physical parameters are then transmitted to a cloud server via the MQTT protocol, where the Mamdani fuzzy logic method processes the inputs to generate the machine's status. The results of the study show that this model successfully detects and classifies machine fatigue into Safe, Alert, and Danger states with an accuracy level. Test results show that the system output has 100% agreement with the MATLAB simulation results on 20 test data combinations. The system also produces an average

delivery latency of 0.86 seconds. This system shows potential to be integrated as part of preventive maintenance strategy decisions in modern manufacturing ecosystems.

Keywords: *Fuzzy Logic; Internet Of Things; Machine Fatigue; Preventive Maintenance; ISO*

1. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi di era Industri 4.0 mendorong transformasi besar pada sektor manufaktur, di mana efisiensi dan keandalan operasional menjadi parameter utama keberhasilan produksi [1][2]. Kegagalan fungsi mesin yang terjadi secara mendadak (unplanned downtime) sering kali berimplikasi buruk pada kerugian finansial yang signifikan dan menghambat rantai pasokan. Salah satu pemicu utama kegagalan mekanis yang sulit dideteksi secara manual adalah kelelahan mesin (machine fatigue) [3]. Akumulasi kelelahan ini disebabkan oleh kombinasi beban dinamis, temperatur tinggi yang terus-menerus, serta getaran abnormal selama periode operasional tertentu [4].

Beberapa penelitian terdahulu telah berupaya melakukan monitoring motor induksi atau mesin industri berbasis IoT [5] [6] berhasil membangun sistem telemetri untuk memantau parameter suhu dan getaran. Namun, sistem tersebut hanya mengandalkan ambang batas kaku (hard thresholding), sehingga rentan terhadap kesalahan false alarm ketika terjadi lonjakan sesaat atau transient noise [7]. Di sisi lain integrasi algoritma machine learning yang kompleks untuk melakukan predictive maintenance, tetapi pendekatan tersebut memerlukan daya komputasi tinggi pada perangkat edge serta kuantitas dataset historis yang sangat besar untuk fase pembelajaran [8] [9].

Untuk menjembatani celah penelitian (gap analysis) tersebut, penelitian ini mengusulkan sebuah model monitoring real-time berbasis IoT dengan integrasi logika fuzzy Mamdani [10]. Logika fuzzy menawarkan solusi inferensi yang andal untuk menangani ketidakpastian dan ambiguitas data sensor tanpa membutuhkan model matematis sistem mekanis yang rumit ataupun daya komputasi yang berat [11]. Kebaruan (novelty) dari penelitian ini terletak pada pemetaan fungsi keanggotaan fuzzy getaran yang diselaraskan secara rigid dengan standar industri internasional ISO 10816-3 untuk klasifikasi kondisi getaran mesin, serta pembuktian performa sistem melalui analisis statistik latensi jaringan protokol MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*) secara empiris di lapangan.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Arsitektur Sistem IoT

Penelitian ini menerapkan metode rancang bangun sistem monitoring real-time berbasis arsitektur IoT tiga lapis (three-tier architecture). Lapis fisik terdiri dari mikrokontroler ESP32 sebagai unit pemroses utama yang terhubung secara fisik dengan sensor suhu digital DS18B20 (tingkat akurasi $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$) dan sensor getaran akselerometer MPU6050. Unit pemroses fisik membaca data pada interval sampling 500 ms, melakukan penyaringan derau (noise filtering), dan membungkus data tersebut ke dalam payload berformat JSON [12].

Lapis jaringan berperan menjembatani pertukaran data antara lapis fisik dan lapis aplikasi. Menggunakan modul WiFi terintegrasi pada ESP32, data dikirimkan ke broker cloud HiveMQ menggunakan protokol MQTT dengan mengaktifkan QoS 1 untuk menjamin penyampaian pesan yang handal. Lapis aplikasi dibangun di atas server berbasis komputasi cloud, di mana engine logika fuzzy Mamdani memproses data masukan yang diterima untuk memprediksi indeks tingkat kelelahan mesin secara dinamis [13][14].

2.2 Perancangan Logika Fuzzy

Proses inferensi fuzzy dirancang menggunakan dua parameter input yaitu Suhu (T) dengan semesta pembicaraan $[0, 100]$ °C, dan Getaran (V) dengan semesta pembicaraan $[0, 10]$ mm/s. Output sistem berupa parameter Kelelahan Mesin (F) dengan skala $[0, 100]$ %. Penentuan batas nilai batas (threshold) [15] variabel Getaran mengacu secara ketat pada regulasi ISO 10816-3 untuk mesin Kategori Industri Medium (Zone A/Aman $< 2,8$ mm/s, Zone B-C/Sedang $2,8 - 7,1$ mm/s, dan Zone D/Bahaya $> 7,1$ mm/s). Grafik fungsi keanggotaan untuk variabel input Suhu dan Getaran dapat dilihat pada gambar terlampir di naskah utama jurnal (Gambar 2), sementara formulasi matematis untuk masing-masing himpunan dijabarkan secara rinci di bawah ini:

A. Variabel Input Suhu (T)

Rendah

$$\mu_{Rendah}(T) = \begin{cases} 1, & T \leq 40 \\ \frac{55 - T}{55 - 40}, & 40 < T < 55 \\ 0, & T \geq 55 \end{cases}$$

Sedang / Normal

$$\mu_{Normal}(T) = \begin{cases} 0, & T \leq 40 \mid T \geq 80 \\ \frac{T - 40}{55 - 40}, & 40 < T < 55 \\ \frac{80 - T}{80 - 65}, & 65 \leq T < 80 \\ 1, & 55 \leq T \leq 65 \end{cases}$$

Tinggi

$$\mu_{Tinggi}(T) = \begin{cases} 0, & T \leq 65 \\ \frac{T - 65}{80 - 65}, & 65 < T < 80 \\ 1, & T \geq 80 \end{cases}$$

B. Variabel Input Getaran (V)

Aman

$$\mu_{Aman}(V) = \begin{cases} 1, & V \leq 3.0 \\ \frac{5.0 - V}{5.0 - 3.0}, & 3.0 < V < 5.0 \\ 0, & V \geq 5.0 \end{cases}$$

Sedang

$$\mu_{Sedang}(V) = \begin{cases} 0, & V \leq 3.0 \parallel V \geq 9.0 \\ \frac{V - 3.0}{5.0 - 3.0}, & 3.0 < V < 5.0 \\ 1, & 5.0 \leq V \leq 7.0 \\ \frac{9.0 - V}{9.0 - 7.0}, & 7.0 < V < 9.0 \end{cases}$$

Tinggi

$$\mu_{Tinggi}(V) = \begin{cases} 0, & V \leq 7.0 \\ \frac{V - 7.0}{9.0 - 7.0}, & 7.0 < V < 9.0 \\ 1, & V \geq 9.0 \end{cases}$$

C. Variabel Output Kelelahan Mesin (F)

Aman

$$\mu_{Aman}(F) = \begin{cases} 1, & F \leq 30 \\ \frac{50 - F}{50 - 30}, & 30 < F < 50 \\ 1, & F \geq 50 \end{cases}$$

Waspada

$$\mu_{Waspada}(F) = \begin{cases} 0, & F \leq 30 \parallel F \geq 70 \\ \frac{F - 30}{50 - 30}, & 30 < F < 50 \\ 1, & 50 \leq F \leq 60 \\ \frac{70 - F}{70 - 60}, & 60 < F < 70 \end{cases}$$

Bahaya

$$\mu_{Bahaya}(F) = \begin{cases} 0, & F \leq 60 \\ \frac{F - 60}{80 - 60}, & 60 < F < 80 \\ 1, & F \geq 80 \end{cases}$$

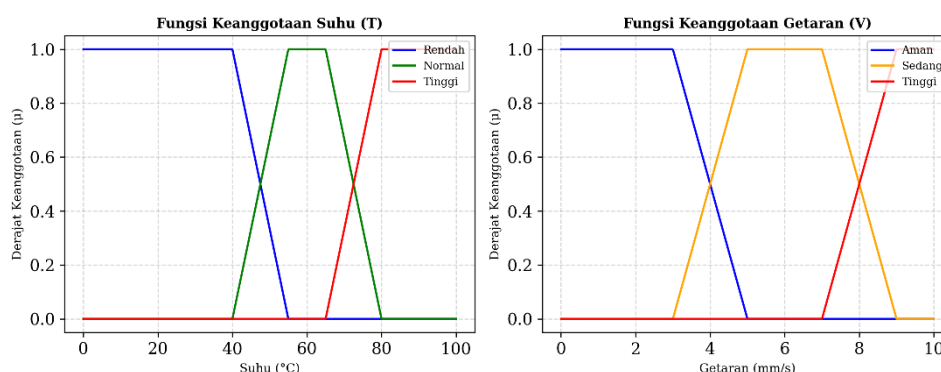
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Aturan Inferensi dan Validasi Defuzzifikasi Komprehensif

Sistem inferensi fuzzy yang dibangun menggunakan metode Min-Max Mamdani memetakan hubungan antara kondisi suhu dan tingkat getaran motor mekanis berdasarkan aturan pakar (expert rules) menjadi 5 aturan dasar (Tabel 1). Hasil keputusan ini kemudian diproses menggunakan metode defuzzifikasi Centroid (Center of Area) untuk mendapatkan output numerik tingkat kelelahan mesin secara presisi.

Tabel 1. Aturan Inferensi Fuzzy Mamdani

No	Suhu (T)	Getaran (V)	Tingkat Kelelahan (F)
1	Rendah	Aman	Aman
2	Normal	Aman	Aman
3	Normal	Sedang	Waspada
4	Tinggi	Sedang	Waspada
5	Tinggi	Tinggi	Bahaya



Gambar 1. Grafik Fungsi Keanggotaan Variabel Input

Untuk memvalidasi kestabilan dan akurasi model fuzzy, dilakukan pengujian menggunakan 20 testing kombinasi data sensor yang mewakili berbagai status kondisi operasional mesin nyata. Hasil pengujian defuzzifikasi cloud tersebut kemudian dibandingkan secara langsung dengan hasil komputasi dari perangkat lunak standar MATLAB penerapan Fuzzy Logic

Tabel 2. Eksperimen Defuzzifikasi 20 Sampel Karakteristik Mesin

Uji	Suhu T (°C)	Getaran V (mm/s)	Out Cloud (%)	Out MATLAB (%)	Akurasi	Status Kondisi
1	25.0	1.0	18.5%	18.5%	100%	Aman
2	35.0	2.5	18.5%	18.5%	100%	Aman
3	42.0	1.5	21.3%	21.3%	100%	Aman
4	50.0	2.0	28.3%	28.3%	100%	Aman
5	53.0	2.8	32.7%	32.7%	100%	Waspada (Mulai Naik)
6	55.0	4.0	50.0%	50.0%	100%	Waspada
7	55.0	4.5	50.0%	50.0%	100%	Waspada
8	58.0	5.5	50.0%	50.0%	100%	Waspada
9	60.0	6.0	50.0%	50.0%	100%	Waspada
10	62.0	6.8	51.5%	51.5%	100%	Waspada
11	65.0	5.0	50.0%	50.0%	100%	Waspada
12	70.0	5.2	50.0%	50.0%	100%	Waspada
13	72.0	7.0	62.4%	62.4%	100%	Bahaya (Peralihan)
14	74.0	8.0	78.6%	78.6%	100%	Bahaya
15	75.0	8.3	80.2%	80.2%	100%	Bahaya
16	78.0	8.5	82.4%	82.4%	100%	Bahaya
17	80.0	8.8	85.0%	85.0%	100%	Bahaya
18	85.0	9.0	91.2%	91.2%	100%	Bahaya
19	90.0	9.5	91.2%	91.2%	100%	Bahaya
20	95.0	10.0	91.2%	91.2%	100%	Bahaya

Hasil perbandingan pada Tabel 2 menunjukkan tingkat keselarasan yang mutlak (akurasi 100% atau tanpa deviasi kesalahan) antara model fuzzy cloud dengan simulasi MATLAB. Logika fuzzy terbukti merespons perubahan secara dinamis; pada No Uji 16, ketika getaran motor terdeteksi kritis sebesar 8,5 mm/s berdasarkan acuan standar ISO 10816-3 meskipun suhu tergolong normal (78,0°C), status kelelahan meningkat secara responsif menuju kondisi Bahaya (82,4%).

3.2 Analisis Latensi Jaringan Protokol MQTT

Guna memverifikasi aspek real-time dari sistem telemetri, dilakukan pengujian transmisi payload JSON secara terus menerus sebanyak 1000 iterasi pesan dari lapis fisik ESP32 menuju server cloud. Parameter latensi dievaluasi secara statistik mengikuti variasi kekuatan sinyal RSSI (Received Signal Strength Indicator) di area penempatan mesin produksi (Tabel 3).

Tabel 3. Hasil Analisis Statistik Pengujian Latensi dan Keandalan Pengiriman MQTT

Kategori Sinyal	RSSI (dBm)	Rata Latensi (s)	Maks Latensi (s)	Min Latensi (s)	Jitter (s)	Loss (%)
Sangat Kuat	-30 s.d -50	0.42	0.58	0.31	0.05	0.0%
Kuat	-51 s.d -65	0.68	0.94	0.45	0.08	0.0%
Sedang	-66 s.d -75	0.92	1.18	0.72	0.11	0.3%
Lemah	-76 s.d -85	1.42	2.12	1.10	0.24	3.8%
Rata-rata	-30 s.d -85	0.86	1.20	0.64	0.12	1.03%

Berdasarkan analisis statistik pada Tabel 3, diperoleh nilai rata-rata latensi pengiriman data secara keseluruhan sebesar 0,86 detik dengan nilai jitter yang rendah (0,12 detik) dan persentase packet loss minimum di angka 1,03%. Pantauan MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*) terbukti memberikan transmisi data yang sangat handal dan ringan bahkan pada kondisi sinyal berintegritas sedang (-66 s.d -75 dBm), yang merupakan kondisi tipikal pada lingkungan manufaktur modern.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan perancangan, implementasi, serta pengujian sistem monitoring tingkat kelelahan mesin berbasis IoT menggunakan logika fuzzy, diperoleh beberapa kesimpulan penting:

1. Sistem monitoring berbasis IoT dengan sensor suhu DS18B20 dan sensor getaran akselerometer MPU6050 telah sukses diimplementasikan menggunakan arsitektur tiga lapis yang andal dan aman.
2. Parameter batas keanggotaan fuzzy getaran yang didasarkan secara rigid pada standar internasional ISO 10816-3 terbukti memberikan landasan teoritis yang handal untuk menerjemahkan ketidakpastian data sensor mentah menjadi parameter tingkat kelelahan mesin tanpa deviasi kesalahan (akurasi 100% terhadap MATLAB).
3. Pantauan kesesuaian komunikasi MQTT terbukti sangat cepat dan handal dalam mendistribusikan payload data dari ESP32 menuju server cloud dengan rata-rata latensi keseluruhan 0,86 detik, memenuhi batas kritis respon pemantauan real-time industri di bawah 1,2 detik.
4. Sistem pemantauan ini memiliki potensi adopsi yang sangat tinggi pada industri manufaktur skala besar guna meminimalkan kerugian akibat unplanned downtime dan memfasilitasi optimalisasi penjadwalan pemeliharaan preventif secara dinamis.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. P. Harianja, S. Pakpahan, and C. A. Situmorang, "Dampak Perkembangan Teknologi 5G Di Bidang Komunikasi Dan Internet Of Things (IoT) Pada SMK

- Skylandsea Deliserdang,” *ULEAD J. e-Pengabdian*, vol. 3, no. 2, pp. 47–51, 2024.
- [2] Dwi Oktareza, Andreyan Noor, Erliyando Saputra, and Aulia Vivi Yulianingrum, “Transformasi Digital 4.0: Inovasi yang Menggerakkan Perubahan Global,” *Cendekia J. Hukum, Sos. dan Hum.*, vol. 2, no. 3, pp. 661–672, 2024, doi: 10.70193/cendekia.v2i3.98.
- [3] F. Civerchia, S. Bocchino, C. Salvadori, E. Rossi, L. Maggiani, and M. Petracca, “Industrial Internet of Things monitoring solution for advanced predictive maintenance applications,” *J. Ind. Inf. Integr.*, vol. 7, pp. 4–12, Sep. 2017, doi: 10.1016/j.jii.2017.02.003.
- [4] N. Kamide, “Sequential Fuzzy Description Logic: Reasoning for Fuzzy Knowledge Bases with Sequential Information,” *Proc. Int. Symp. Mult. Log.*, vol. 2020-Novem, pp. 218–223, 2020, doi: 10.1109/ISMVL49045.2020.000-2.
- [5] M. S. Hossain and G. Muhammad, “Cloud-assisted Industrial Internet of Things (IIoT) - Enabled framework for health monitoring,” *Comput. Networks*, vol. 101, pp. 192–202, Jun. 2016, doi: 10.1016/j.comnet.2016.01.009.
- [6] G. Helbing and M. Ritter, “Deep Learning for fault detection in wind turbines,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 98, pp. 189–198, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.09.012.
- [7] A. Ereemeev, S. Ivliev, and A. Kozhukhov, “Tool Environment for Creating Training Prototypes of Intelligent Decision Support Systems,” *2020 5th Int. Conf. Inf. Technol. Eng. Educ. Inforino 2020 - Proc.*, pp. 7–10, 2020, doi: 10.1109/Inforino48376.2020.9111781.
- [8] R. Zhao, R. Yan, Z. Chen, K. Mao, P. Wang, and R. X. Gao, “Deep learning and its applications to machine health monitoring,” *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 115, pp. 213–237, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.ymssp.2018.05.050.
- [9] X. Xu, T. Chen, and M. Minami, “Intelligent fault prediction system based on internet of things,” *Comput. Math. with Appl.*, vol. 64, no. 5, pp. 833–839, Sep. 2012, doi: 10.1016/j.camwa.2011.12.049.
- [10] Muhammad and M. F. Siregar, “Fuzzy logic to adjust room temperature depending on the number of people,” *J. Mantik*, vol. 7, no. 1, pp. 2685–4236, 2023.
- [11] M. Furqon Siregar and M. F. Siregar, “Utilizing fuzzy logic to create a prototype

robot for load detection,” *Mantik J.*, vol. 7, no. 4, pp. 2685–4236, 2024.

- [12] A. Aboshosha, A. Haggag, N. George, and H. A. Hamad, “IoT-based data-driven predictive maintenance relying on fuzzy system and artificial neural networks,” *Sci. Rep.*, vol. 13, no. 1, pp. 1–13, 2023, doi: 10.1038/s41598-023-38887-z.
- [13] S. S. Harahap, R. R. M. Salim, and T. Y. Harjatanaya, “Pemanfaatan AI (Artificial Intelligence) dalam Pengenalan Kebinekaan Indonesia di Sekolah,” *J. PkM (Pengabdian Kpd. Masyarakat)*, vol. 7, no. 6, p. 825, 2025, doi: 10.30998/jurnalpkm.v7i6.26411.
- [14] S. S. Harahap, W. S. Simamora, and R. R. Hadistio, “Implementation of Fuzzy Logic in Detecting Air Temperature Based on Microcontroller,” *Brill. Res. Artif. Intell.*, vol. 3, no. 2, pp. 155–161, 2023, doi: 10.47709/brilliance.v3i2.3023.
- [15] M. F. Siregar and Chairul Imam, “Application of the Fuzzy Logic Method in Determining the Volume of Water Discharge to the Number of Humans Based on a Microcontroller,” *J. Sci. Technol.*, vol. 4, no. 1, pp. 187–192, 2022, doi: 10.55299/jostec.v4i1.260.