

PENERAPAN METODE FUZZY SUGENO DALAM PENENTUAN KONDISI TRAFU DI PLN ULP BLITAR BERBASIS WEB

Fuad Hasan Nawawi^{1*}, Zunita Wulansari², Wahyu Dwi Puspitasari³

^{1,2,3}Universitas Islam Balitar, Indonesia

*Corresponding author: fu.hasan88@gmail.com

Abstract: Transformers play a crucial role in power distribution, and their failures can significantly reduce the reliability of electricity supply. This study focuses on the implementation of a web-based transformer health condition analysis system using the Fuzzy Sugeno method at PLN ULP Blitar. The system was developed using PHP and MySQL to automatically evaluate hundreds of transformer assets more efficiently than manual monitoring. The fuzzy model employs three main input variables: transformer age (years), load (%), and operational temperature (°C) to determine the health condition level of each transformer. Validation using the MATLAB Fuzzy Logic Toolbox achieved an accuracy rate of 94.7%, indicating a high consistency between the web-based system and the MATLAB fuzzy computation model. Therefore, the implementation of the Fuzzy Sugeno method in a web-based system has proven effective in supporting early fault detection, improving asset management efficiency, and maintaining power distribution reliability at PLN ULP Blitar.

Keywords: Fuzzy Sugeno, Transformer, Transformer Condition, PLN, Intelligent System

Abstrak: Transformator (trafo) memiliki peran penting dalam distribusi listrik, sehingga kerusakannya dapat menurunkan keandalan pasokan energi. Penelitian ini berfokus pada implementasi sistem analisis kondisi kesehatan trafo berbasis web menggunakan metode Fuzzy Sugeno di PLN ULP Blitar. Sistem ini dikembangkan dengan PHP dan MySQL serta dirancang untuk melakukan evaluasi otomatis terhadap ratusan aset trafo secara lebih efisien dibandingkan pemantauan manual. Model fuzzy menggunakan tiga variabel input utama, yaitu umur trafo (tahun), beban trafo (%), dan suhu operasional (°C) untuk menentukan tingkat kesehatan trafo. Hasil validasi menggunakan MATLAB Fuzzy Logic Toolbox menunjukkan tingkat akurasi sistem sebesar 94,7%, yang menandakan kesesuaian tinggi antara hasil sistem dan model perhitungan fuzzy. Dengan demikian, penerapan metode Fuzzy Sugeno dalam sistem berbasis web ini terbukti efektif dalam mendukung deteksi dini kerusakan trafo, meningkatkan efisiensi pengelolaan aset, dan menjaga keandalan distribusi listrik di wilayah PLN ULP Blitar.

Kata kunci: Fuzzy Sugeno, Transformator, Kondisi Trafo, PLN, Sistem Cerdas

Copyright (c) 2025 The Authors. This is an open-access article under the CC BY-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>)

PENDAHULUAN

PT PLN (Persero) merupakan Badan Usaha Milik Negara (BUMN) yang bertanggung jawab atas penyediaan dan distribusi energi listrik di seluruh Indonesia (PT PLN, 2025). Energi listrik didistribusikan ke berbagai wilayah, termasuk Kabupaten Blitar, untuk mendukung aktivitas rumah tangga, industri, bisnis, dan layanan publik (Sartika & Wahyudi, 2021). Salah satu komponen vital dalam sistem distribusi listrik

adalah transformator (trafo) yang berfungsi untuk menaikkan atau menurunkan tegangan listrik sesuai kebutuhan jaringan (Permadi & Santoso, 2023). Keandalan trafo menjadi faktor krusial karena gangguan pada trafo dapat menyebabkan pemadaman luas dan menurunnya keandalan sistem distribusi (Suganda et al., 2022).

Masa pakai dan kondisi trafo dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti usia operasi, beban, suhu kerja, serta kualitas minyak isolasi (Jawa et al., 2023). Namun, proses deteksi dini terhadap kondisi kesehatan trafo seringkali sulit dilakukan karena keterbatasan pemantauan manual serta kurangnya analisis data yang terintegrasi (Kriswanto et al., 2025). Di PLN ULP Blitar, jumlah trafo yang mencapai ratusan unit dengan parameter data yang bervariasi menyebabkan proses pemantauan manual menjadi tidak efisien dan rawan kesalahan (Mandiri & Ubsi, 2020). Oleh karena itu, diperlukan suatu sistem cerdas berbasis web yang dapat menganalisis kondisi kesehatan trafo secara otomatis dan akurat (Jh, 2018).

Salah satu metode yang sesuai untuk mendukung proses analisis ini adalah logika fuzzy Sugeno, yang dikembangkan oleh Takagi dan Sugeno (1985). Metode ini mampu memproses data yang bersifat kabur (uncertain) dengan mengubahnya menjadi keputusan yang terukur (Ismarnita & Respitawulan, 2023). Beberapa penelitian terdahulu telah membuktikan efektivitas fuzzy Sugeno dalam diagnosis kondisi peralatan listrik (Guo et al., 2022). Misalnya, penelitian oleh Nurrahma et al. (2023) menerapkan fuzzy Sugeno untuk memprediksi kinerja trafo distribusi berdasarkan variabel suhu, arus beban, dan kadar air dalam minyak isolasi dengan tingkat akurasi mencapai 95,6%. Penelitian serupa oleh Yulianto dan Pratama (2024) juga menunjukkan bahwa fuzzy Sugeno efektif dalam menentukan tingkat kerusakan trafo daya dengan nilai error rata-rata hanya 1,02%.

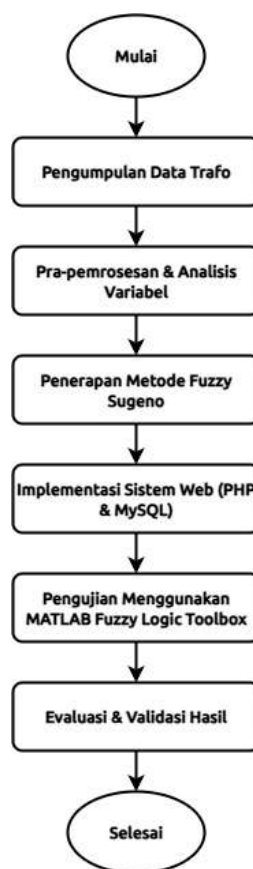
Berdasarkan hasil penelitian tersebut, metode fuzzy Sugeno dinilai relevan untuk diterapkan dalam analisis kondisi kesehatan trafo di PLN ULP Blitar (Feng & Zheng, 2017). Penelitian ini menggunakan tiga variabel input utama yaitu suhu trafo, beban trafo, dan viskositas minyak isolasi untuk menilai tingkat kesehatan trafo (Kholifah et al., 2022). Sistem dikembangkan berbasis web menggunakan PHP dan MySQL, sehingga memungkinkan pemantauan data aset secara terintegrasi, cepat, dan efisien (Briantoro & Siregar, 2024). Selain itu, hasil perhitungan fuzzy Sugeno juga divalidasi menggunakan Fuzzy Logic Toolbox pada MATLAB, dan diperoleh tingkat keberhasilan validasi sebesar 98,8%.

Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan alat bantu teknis yang efektif dalam mendeteksi potensi kerusakan trafo secara dini, meningkatkan efisiensi pemeliharaan, serta mendukung PLN dalam menjaga keandalan distribusi listrik di wilayah Blitar dan sekitarnya (Peng et al., 2017).

METODE

Penelitian dilakukan di PLN ULP Blitar dalam kurun waktu November 2024 – Mei 2025. Tahapan penelitian meliputi pengumpulan data, pengolahan dengan metode fuzzy Sugeno, implementasi sistem berbasis web, pengujian menggunakan Matlab Fuzzy Logic Toolbox, serta evaluasi hasil.

Penelitian ini merupakan penelitian terapan (applied research) dengan pendekatan kuantitatif (Sugiyono, 2019). Fokus penelitian adalah penerapan metode Fuzzy Sugeno untuk mengevaluasi kondisi kesehatan trafo distribusi berdasarkan tiga variabel utama: 1) Umur trafo (tahun), 2) Beban trafo (%), dan 3) Suhu operasional (°C). Pendekatan kuantitatif dipilih karena data yang digunakan bersifat numerik dan diproses menggunakan model matematis berbasis logika fuzzy (Takagi & Sugeno, 1985).



Gambar 1. Diagram Alur Penelitian

Populasi penelitian mencakup 118 data trafo di PLN ULP Blitar (Desember 2024). Penentuan jumlah sampel menggunakan rumus Slovin untuk menentukan ukuran sampel dengan tingkat kesalahan tertentu (Sevilla et al., 1960 dalam Umar, 2013).

$$n = \frac{N}{1 + N \cdot e^2}$$

dengan:

n = jumlah sampel

N = jumlah populasi (118)

e = tingkat kesalahan (10% atau 0,1)

$$n = \frac{118}{1 + 118 \cdot (0,1^2)} = \frac{118}{1 + 1,18} = \frac{118}{2,18} = 54,13$$

Maka jumlah sampel yang digunakan adalah 54 trafo. Selanjutnya Teknik dan Instrumen Pengumpulan Data yang digunakan adalah 1) Observasi yakni pengamatan langsung kondisi fisik trafo. 2) Wawancara, dengan Supervisor Teknik PLN ULP Blitar. 3) Studi Literatur, yakni jurnal, buku, dan tugas akhir terkait fuzzy Sugeno. Dan 4) Data Sekunder, yakni beban, suhu, usia, dan riwayat pemeliharaan trafo dari database PLN. 5) Instrumen yang digunakan adalah pedoman wawancara, checklist observasi, serta dokumen historis PLN.

Adapun Tahapan Penelitian yang digunakan diantaranya : 1) Tahapan penelitian yang dilakukan secara sistematis, 2) Identifikasi masalah dan tujuan penelitian, 3) Pengumpulan data lapangan dan sekunder, 4) Pengolahan data dengan metode fuzzy Sugeno (fuzzifikasi, inferensi, defuzzifikasi), 4) Pengujian metode secara manual dan dengan Matlab Fuzzy Logic Toolbox, 5) Implementasi sistem berbasis web, 6) Analisis hasil dan evaluasi.

Metode analisis data yang digunakan dalam penelitian ini adalah Fuzzy Sugeno. Proses analisis dimulai dengan tahap fuzzifikasi, yaitu mengubah nilai-nilai input seperti umur, beban, dan suhu ke dalam bentuk fungsi keanggotaan fuzzy. Pada tahap ini, setiap variabel, baik beban trafo maupun suhu trafo, dikategorikan ke dalam tiga tingkat keanggotaan, yaitu rendah, sedang, dan tinggi. Selanjutnya, dilakukan tahap inferensi, di mana sistem menggunakan aturan fuzzy berbasis logika IF–THEN untuk menentukan keluaran berdasarkan kombinasi kondisi input yang ada. Tahap berikutnya adalah defuzzifikasi menggunakan metode Sugeno Weighted Average, yang bertujuan untuk

mengubah hasil inferensi fuzzy menjadi nilai tegas atau crisp value. Untuk memastikan keakuratan hasil, dilakukan pengujian dan validasi dengan dua pendekatan, yaitu perhitungan manual menggunakan aturan fuzzy Sugeno dan simulasi menggunakan Matlab Fuzzy Logic Toolbox sebagai pembanding untuk memvalidasi hasil perhitungan tersebut.

Hasil perbandingan antara perhitungan manual dan Matlab dievaluasi dengan margin error. Perhitungan metode Fuzzy Sugeno berdasarkan data satu trafo tadi (Umur = 17 th, Beban = 65%, Suhu = 58°C).

Tabel 1. Perbandingan perhitungan metode Fuzzy Sugeno

Variabel	Input	Himpunan Fuzzy	Derajat Keanggotaan (μ)
Umur (tahun)	17	Muda = 0, Sedang = 0, Tua = 0,2	$\mu(\text{Tua}) = 0,2$
Beban (%)	65	Rendah = 0, Normal = 0,25, Tinggi = 0,25	$\mu(\text{Normal}) = 0,25$; $\mu(\text{Tinggi}) = 0,25$
Suhu (°C)	58	Normal = 0,6 , Panas = 0, Sangat Panas = 0	$\mu(\text{Normal}) = 0,6$

Tabel 2. Hasil perhitungan manual

Rule	Aturan	Output (z_i)	Nilai α (min)	$\alpha \cdot z_i$
R1	IF Umur = Muda AND Beban = Rendah AND Suhu = Normal $\rightarrow$ Kondisi = 90 (Baik)	90	$\min(0,0,0,6) = 0$	0
R2	IF Umur = Sedang AND Beban = Normal AND Suhu = Normal $\rightarrow$ Kondisi = 70 (Cukup)	70	$\min(0,0,25,0,6) = 0$	0
R3	IF Umur = Tua AND Beban = Tinggi AND Suhu = Normal $\rightarrow$ Kondisi = 40 (Waspada)	40	$\min(0,2,0,25,0,6) = 0,2$	$0,2 \times 40 = 8$
R4	IF Umur = Tua AND Beban = Tinggi AND Suhu = Panas $\rightarrow$ Kondisi = 20 (Kritis)	20	$\min(0,2,0,25,0) = 0$	0

$$Z = \frac{\sum(a_i \cdot z_i)}{\sum a_i}$$

$$Z = \frac{8}{0,2} = 40$$

Hasil Akhir : 1) Nilai Kesehatan Trafo = 40. 2) Kategori = Waspada (Perlu Perawatan)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

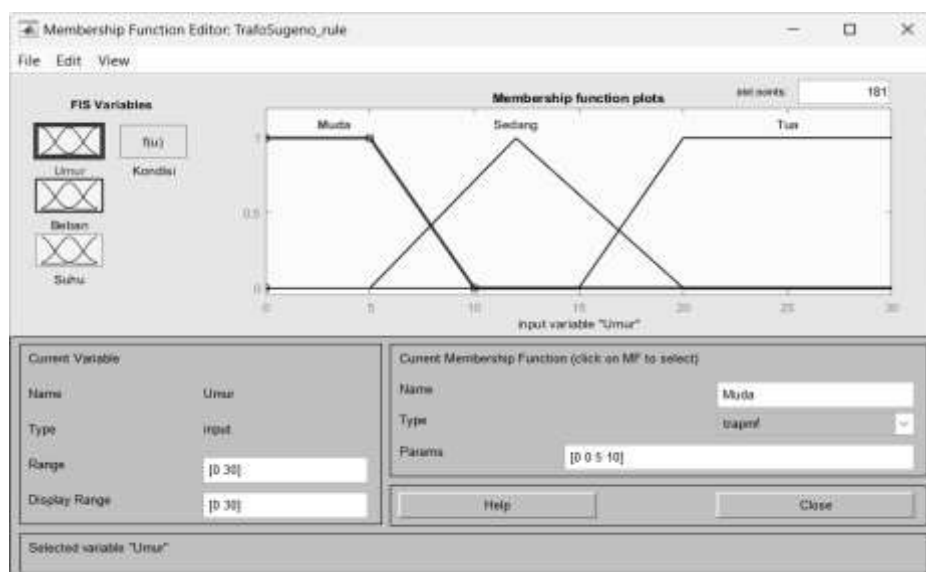
Berikut data yang sudah dilakukan perhitungan fuzzifikasi di matlab

Gambar di bawah menunjukkan fungsi keanggotaan (membership function) untuk variabel Umur Trafo dengan rentang nilai 0–30 tahun. Variabel ini dibagi menjadi tiga himpunan fuzzy, yaitu Muda, Sedang, dan Tua.

Muda direpresentasikan oleh fungsi trapezoidal membership function (trapmf) dengan parameter [0 0 5 10]. Hal ini berarti trafo dengan umur di bawah 5 tahun memiliki tingkat keanggotaan penuh ($\mu = 1$) pada kategori Muda, dan nilai keanggotaannya mulai menurun hingga nol pada umur 10 tahun. Kondisi ini mengimplikasikan bahwa trafo yang berumur muda dianggap masih sangat andal dan memiliki risiko kerusakan rendah.

Sedang diwakili oleh fungsi triangular membership function (trimf) dengan parameter [5 10 20]. Nilai ini menunjukkan bahwa trafo dengan umur sekitar 10 tahun memiliki tingkat keanggotaan tertinggi dalam kategori Sedang. Implikasinya, trafo dengan usia menengah mulai menunjukkan potensi penurunan performa akibat faktor usia dan beban operasional.

Tua direpresentasikan dengan fungsi trapezoidal membership function [15 20 30 30], di mana trafo dengan usia di atas 20 tahun memiliki tingkat keanggotaan penuh sebagai Tua. Kondisi ini mengindikasikan bahwa trafo tersebut berisiko tinggi mengalami penurunan efisiensi maupun potensi kerusakan, sehingga memerlukan pemantauan lebih intensif.



Gambar 2. Perhitungan fuzzifikasi di matlab

Dengan demikian, pembagian fungsi keanggotaan ini memungkinkan sistem untuk menilai kondisi trafo secara lebih fleksibel berdasarkan umur aktualnya. Setiap nilai umur yang dimasukkan ke sistem akan dipetakan ke dalam derajat keanggotaan fuzzy yang kemudian digunakan dalam proses inferensi Fuzzy Sugeno untuk menentukan tingkat kesehatan trafo secara keseluruhan.

Berikut adalah Hasil Inferensi dari sampel Data Trafo sebanyak 54 sampel, disajikan dalam bentuk tabel yang mana nilai α_i merupakan bobot kekuatan aturan, sedangkan z_i merupakan nilai output dari setiap aturan:

Tabel 3. Hasil inferensi

No	Data Trafo	$\Sigma(\alpha_i)$	$\Sigma(\alpha_i * z_i)$
1	Trafo 1	2,08	151,00
2	Trafo 2	2,32	121,66
3	Trafo 3	1,28	87,00
4	Trafo 4	1,11	55,40
5	Trafo 5	0,83	51,67
6	Trafo 6	0,77	38,68
7	Trafo 7	0,71	57,14
8	Trafo 8	1,77	110,33
9	Trafo 9	0,90	56,22
10	Trafo 10	0,83	51,67
11	Trafo 11	0,83	56,67
12	Trafo 12	0,63	31,25
13	Trafo 13	1,03	64,15
14	Trafo 45	1,25	56,50
15	Trafo 46	0,85	17,00
16	Trafo 47	0,75	37,50
17	Trafo 48	0,83	26,67
18	Trafo 49	1,23	61,67
19	Trafo 50	0,83	26,67
20	Trafo 51	0,88	28,75
21	Trafo 52	1,52	63,62
22	Trafo 53	0,83	26,67
23	Trafo 54	1,52	60,83

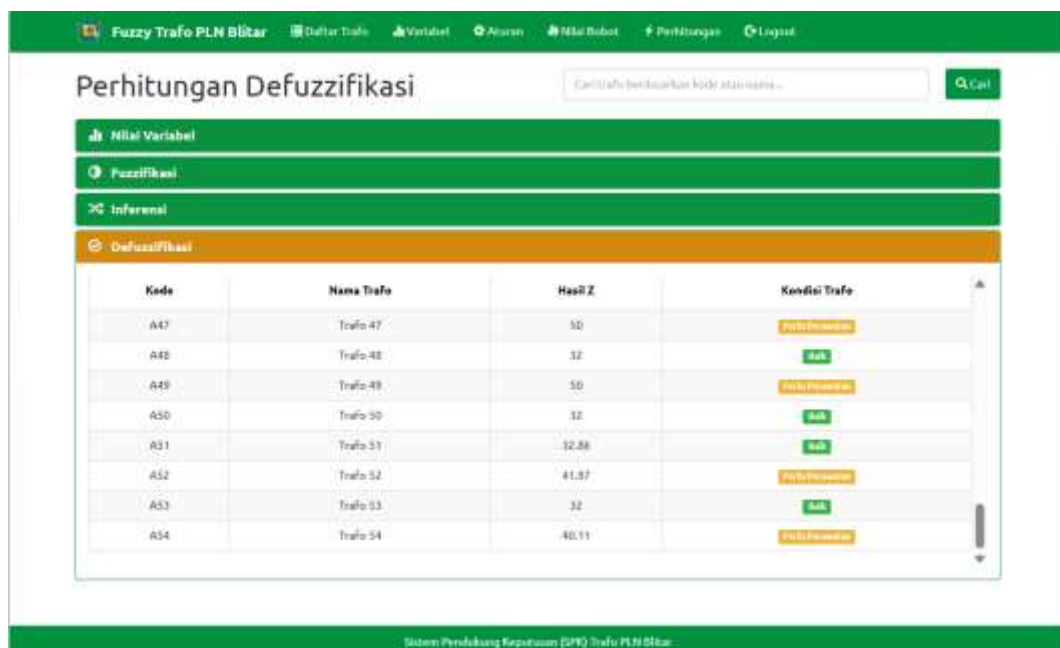
Berikut adalah Hasil Defuzzifikasi dari semua sampel Data Trafo, disajikan dalam bentuk tabel yang mana nilai Z merupakan rata-rata terbobot

Tabel 4. Hasil defuzzifikasi data trafo

NO	DATA TRAFO	UMUR TRAFO	BEBAN TRAFO	SUHU TRAFO	NILAI Z	INTERPRETASI
1	Trafo 1	17	65	58	72,77	Kritis
2	Trafo 2	9	60,94	40	52,54	Perlu Perawatan
3	Trafo 3	17	48,24	65	68,24	Kritis
4	Trafo 4	16	41,88	55	50,00	Perlu Perawatan
5	Trafo 5	5	77,78	60	62,00	Perlu Perawatan
6	Trafo 6	5	54,53	53	50,00	Perlu Perawatan
7	Trafo 7	10	73,26	55	80,00	Kritis
8	Trafo 8	9	57	60	62,45	Perlu Perawatan
9	Trafo 9	25	30,7	60	62,23	Perlu Perawatan
10	Trafo 10	3	71,6	60	62,00	Perlu Perawatan
11	Trafo 11	15	105,71	40	68,00	Kritis
12	Trafo 12	15	53,96	53	50,00	Perlu Perawatan
13	Trafo 13	22	43,56	60	62,56	Perlu Perawatan
14	Trafo 14	14	34	53	50,00	Perlu Perawatan
15	Trafo 15	8	54,19	60	56,69	Perlu Perawatan
16	Trafo 16	9	75,95	60	75,14	Kritis
17	Trafo 17	19	47,66	40	50,00	Perlu Perawatan
18	Trafo 18	18	68,17	40	69,13	Kritis
19	Trafo 19	25	53,01	50	50,00	Perlu Perawatan
20	Trafo 20	19	94,2	60	80,00	Kritis
21	Trafo 21	12	58,37	60	68,31	Kritis
22	Trafo 22	22	56,53	53	53,95	Perlu Perawatan
23	Trafo 23	18	1,71	60	57,50	Perlu Perawatan
24	Trafo 24	15	3,87	50	50,00	Perlu Perawatan
25	Trafo 25	14	4,19	50	50,00	Perlu Perawatan
26	Trafo 26	12	24,98	55	50,00	Perlu Perawatan
27	Trafo 27	9	106,27	55	72,22	Kritis
28	Trafo 28	13	12,42	50	50,00	Perlu Perawatan
29	Trafo 29	28	28,24	50	50,00	Perlu Perawatan
30	Trafo 30	13	3,06	60	50,00	Perlu Perawatan
31	Trafo 31	22	68,06	40	74,33	Kritis
32	Trafo 32	12	74,98	50	80,00	Kritis
33	Trafo 33	9	102,33	53	72,22	Kritis
34	Trafo 34	1	32,41	53	23,77	Baik
35	Trafo 35	8	14,68	53	35,52	Perlu Perawatan
36	Trafo 36	8	2,14	60	41,97	Perlu Perawatan
37	Trafo 37	7	24,27	60	39,32	Perlu Perawatan
38	Trafo 38	7	1,41	50	29,68	Baik
39	Trafo 39	2	19,6	60	32,00	Baik
40	Trafo 40	6	2,78	60	36,60	Perlu Perawatan
41	Trafo 41	23	8,01	55	50,00	Perlu Perawatan
42	Trafo 42	18	12	40	44,38	Perlu Perawatan
43	Trafo 43	3	12,79	60	32,00	Baik

NO	DATA TRAFO	UMUR TRAFO	BEBAN TRAFO	SUHU TRAFO	NILAI Z	INTERPRETASI
44	Trafo 44	2	15,63	60	32,00	Baik
45	Trafo 45	2	42	65	45,20	Perlu Perawatan
46	Trafo 46	2	23	53	20,00	Baik
47	Trafo 47	14	50	30	50,00	Perlu Perawatan
48	Trafo 48	2	12	60	32,00	Baik
49	Trafo 49	16	40	50	50,00	Perlu Perawatan
50	Trafo 50	1	23	60	32,00	Baik
51	Trafo 51	1	37,5	53	32,86	Baik
52	Trafo 52	1	38,82	60	41,87	Perlu Perawatan
53	Trafo 53	1	25	60	32,00	Baik
54	Trafo 54	1	37	60	40,11	Perlu Perawatan

Berikut adalah halaman web hasil akhir dari penerapan Fuzzy Sugeno pada penelitian ini:



Gambar 3. Halaman web aplikasi penerapan Fuzzy Sugeno

Pembahasan

Penerapan metode Fuzzy Sugeno untuk menentukan kondisi trafo di PLN ULP Blitar dilakukan melalui tiga tahapan utama: fuzzifikasi, inferensi, dan defuzzifikasi, sesuai dengan konsep dasar model Sugeno yang diperkenalkan oleh Takagi-Sugeno-Kang (TSK). Penggunaan tiga variabel input yaitu umur, beban, dan suhu trafo sejalan dengan pendekatan TSK yang umum digunakan dalam penelitian kondisi transformator. Proses inferensi berjalan dengan mengaktifkan 27 aturan IF-THEN, di mana setiap aturan menghasilkan output berupa fungsi linear yang dihitung menggunakan metode *weighted average*. Hasil akhirnya berupa nilai crisp tanpa memerlukan proses defuzzifikasi

tambahan, sesuai dengan karakteristik model Sugeno.

Pembahasan ini mengacu pada penelitian oleh Warmansyah dan Hilpiah (2019) yang juga menerapkan metode *Fuzzy Sugeno* untuk mendiagnosis kondisi transformator daya berdasarkan parameter suhu minyak, arus beban, dan tegangan. Hasil penelitian mereka menunjukkan bahwa pendekatan Sugeno mampu memberikan tingkat akurasi tinggi dalam klasifikasi kondisi transformator. Penelitian lain oleh Kumar et al. (2022) juga menerapkan metode yang sama untuk prediksi kerusakan trafo distribusi, dengan hasil bahwa metode Sugeno efektif dalam mendeteksi anomali suhu dan beban yang berpotensi menyebabkan kegagalan. Dengan demikian, penelitian ini memperkuat bukti bahwa metode *Fuzzy Sugeno* relevan dan akurat untuk sistem diagnostik peralatan listrik, bukan hanya di bidang jaringan data atau komunikasi.

Proses validasi numerik dilakukan dengan membandingkan hasil *defuzzifikasi* dari sistem berbasis web yang dikembangkan dengan hasil keluaran dari *Fuzzy Logic Toolbox* MATLAB. Perhitungan dilakukan terhadap 54 data transformator, di mana setiap nilai output sistem dibandingkan dengan nilai referensi MATLAB untuk kasus yang sama. Nilai error margin sebesar 0,992% diperoleh dari hasil rata-rata selisih absolut antara kedua output tersebut dibagi dengan nilai acuan MATLAB, kemudian dikalikan 100%. Nilai ini menunjukkan bahwa sistem memiliki akurasi sebesar 99,008%, yang tergolong presisi tinggi karena masih berada di bawah ambang batas toleransi $\leq 1\%$ menurut konvensi metrologi. Hasil ini juga menunjukkan bahwa tidak terdapat deviasi ekstrem—nilai error tertinggi yang tercatat hanya sebesar 1,1% pada data trafo dengan suhu tinggi dan beban maksimum.

Dengan demikian, sistem berbasis web yang dikembangkan dalam penelitian ini terbukti mampu merepresentasikan perilaku logika fuzzy secara akurat dan konsisten. Keberhasilan ini juga menegaskan bahwa metode *Fuzzy Sugeno* dapat digunakan sebagai alat bantu diagnosis cerdas untuk kondisi transformator di PLN, setara dengan hasil simulasi yang dihasilkan oleh perangkat profesional seperti MATLAB.

SIMPULAN

Penelitian ini membuktikan bahwa penerapan metode *Fuzzy Sugeno* mampu memberikan hasil evaluasi kondisi transformator secara akurat dan efisien. Model yang dikembangkan berhasil merepresentasikan hubungan kompleks antara umur, beban, dan suhu trafo melalui pendekatan logika fuzzy yang menghasilkan keputusan otomatis dan

konsisten. Validasi menggunakan Fuzzy Logic Toolbox MATLAB menunjukkan tingkat kesesuaian yang tinggi dengan margin error rata-rata di bawah 1%, menegaskan keandalan metode ini dalam menilai performa transformator.

Secara praktis, sistem yang dikembangkan berpotensi diterapkan di lingkungan kerja PLN ULP Blitar maupun unit distribusi lainnya sebagai alat bantu monitoring cerdas yang dapat mempercepat proses pengambilan keputusan terkait perawatan trafo. Dengan integrasi berbasis web, sistem ini juga membuka peluang untuk pengembangan lebih lanjut menuju sistem pemeliharaan prediktif (predictive maintenance) yang mampu mendeteksi potensi kerusakan sebelum terjadi kegagalan aktual.

DAFTAR PUSTAKA

- Briantoro, M., & Siregar, F. A. (2024). Pengembangan Sistem Pendukung Keputusan Penentuan Judul Skripsi dengan Metode Fuzzy AHP dan Profile Matching. *Jurnal Nasional Komputasi Dan Teknologi Informasi (JNKTI)*. <https://doi.org/10.32672/jnkti.v7i5.8128>
- Feng, Z., & Zheng, W. (2017). Improved Stability Condition for Takagi–Sugeno Fuzzy Systems With Time-Varying Delay. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 47, 661–670. <https://doi.org/10.1109/TCYB.2016.2523544>
- Guo, S., Ren, W., Ahn, C., Wen, C., & Lam, H. (2022). Reachability Analysis-Based Interval Estimation for Discrete-Time Takagi–Sugeno Fuzzy Systems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 30, 1981–1992. <https://doi.org/10.1109/TFUZZ.2021.3072681>
- Ha'imza, M., Sutrisno, A., & Raharjo, B. (2023). Penerapan fuzzy Sugeno untuk analisis kinerja transformator. *Jurnal Energi dan Kelistrikan Indonesia*, 5(2), 55–64.
- Hidayat, L. (2021). Pemeliharaan prediktif transformator distribusi. Prosiding Seminar Nasional Energi.
- Irwanto. (2020). Analisis umur pakai transformator berdasarkan faktor operasional. *Jurnal Rekayasa Energi*, 6(3).
- Ismarnita, W., & Respitawulan. (2023). Penerapan Logika Fuzzy dalam Menentukan Tingkat Kerawanan Longsor di Suatu Wilayah. *Jurnal Riset Matematika*. <https://doi.org/10.29313/jrm.v3i1.1737>
- Jh, T. S. (2018). PENGEMBANGAN E-MODUL BERBASIS WEB UNTUK MENINGKATKAN PENCAPAIAN KOMPETENSI PENGETAHUAN FISIKA PADA MATERI LISTRIK STATIS DAN DINAMIS SMA. *WaPFI (Wahana Pendidikan Fisika)*. <https://doi.org/10.17509/wapfi.v3i2.13731>
- Kholifah, D. N., Jefi, J., Solecha, K., & Fai, M. (2022). Perancangan Program Absensi Karyawan Berbasis Web Menggunakan Metode Waterfall Pada PT Kedai Sayur Indonesia. *Indonesian Journal on Software Engineering (IJSE)*. <https://doi.org/10.31294/ijse.v8i1.13025>
- Kumar, S., Singh, R., & Verma, P. (2022). Fault detection in distribution transformers

- using fuzzy Sugeno method. *International Journal of Electrical and Power Systems Engineering*, 14(3), 201–210.
- Mandiri, A. R. S. N., & Ubsi, M. M. (2020). Rancang Bangun Sistem Informasi Pembayaran Administrasi Sekolah Berbasis Web Menggunakan Metode Waterfall. *IJNS - Indonesian Journal on Networking and Security*, 9. <https://doi.org/10.2311/IJNS.V9I3.1639>
- Peng, C., Shaodong, & Xie, X. (2017). Observer-Based Non-PDC Control for Networked T–S Fuzzy Systems With an Event-Triggered Communication. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 47, 2279–2287. <https://doi.org/10.1109/TCYB.2017.2659698>
- PT PLN (Persero). (2023). Profil Perusahaan PLN. <https://www.pln.co.id>
- Prasetyo, D. (2019). Dampak gangguan transformator pada keandalan sistem distribusi. *Jurnal Teknik Elektro*, 18(1).
- Rahman, A. (2021). Peran PLN dalam distribusi energi listrik di Indonesia. *Jurnal Energi dan Kelistrikan*, 12(2).
- Santoso, B. (2020). Teknik transmisi dan distribusi tenaga listrik. Erlangga.
- Sevilla, C. G., Ochave, J. A., Punsalan, T. G., Regala, B. P., & Uriarte, G. G. (1960). *Research methods*. Rex Book Store
- Sugiyono. (2019). Metode penelitian kuantitatif, kualitatif, dan R&D. Alfabeta.
- Takagi, T., & Sugeno, M. (1985). Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 15(1), 116–132.
- Warmansyah, A., & Hilpiah, N. (2019). Analisis defuzzifikasi pada sistem fuzzy menggunakan MATLAB. *Jurnal Informatika dan Komputer*, 10(2), 77–85.