

Evaluasi Sistem Distribusi Listrik IPAM Menggunakan *Fuzzy Decision Making* Berbasis Kualitas dan Rugi Daya

Syam Abiansyah Pradana Sakti¹, Joko², Tri Rijanto³, Endryansyah⁴
Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Univeristas Negeri Surabaya, Kota Surabaya, Indonesia^{1,2,3,4}

*Email Korespodensi: syam.22045@mhs.unesa.ac.id

Sejarah Artikel:

Diterima 17-05-2026
Disetujui 23-05-2026
Diterbitkan 25-05-2026

ABSTRACT

This study analyzes the electric power quality and operational conditions of induction motors at a Water Treatment Plant (IPAM) using the Fuzzy Decision Making (FDM) method. The analyzed parameters include voltage, voltage harmonics, current unbalance, power factor, and stator copper losses in Distribution Motors 1, 4, and 5. The analysis results show that the average voltage harmonics is 1.37%, which remains within the IEEE 519-1992 limit of 3%. The average current unbalance for all motors is 2.75%, within the IEC 60038 limit of 5%. Voltage levels experience an average overvoltage of 4.72%, staying within the ANSI C84.1 – 2020 limit of 5%. The average power factor is 0.833, which is below the SPLN D3.004-1:2010 standard minimum of 0.85. Stator copper losses for all motors average 1.928%, well within the IEC 60034-30-1 limit of 5.6%. The Mamdani fuzzy inference system, utilizing 48 IF-THEN rules, produces a single condition index for each motor. The results indicate that Distribution Motor 1 has an average index of 82.9, Motor 4 an average of 86.2, and Distribution Motor 5 an average of 82.6, all of which fall within the 'Normal' category.

Keywords: *Electrical distribution system, power quality, stator power loss, Fuzzy Decision Making*

ABSTRAK

Penelitian ini menganalisis kualitas daya listrik dan kondisi operasional motor induksi pada Instalasi Pengolahan Air Minum menggunakan metode Fuzzy Decision Making (FDM). Parameter yang dianalisis meliputi tegangan, harmonisa tegangan, ketidakseimbangan arus, faktor daya, dan rugi-rugi tembaga stator pada Motor Distribusi 1, 4, dan 5. Hasil analisis menunjukkan harmonisa tegangan memiliki rata-rata 1,37% masih dalam batas IEEE 519-1992 sebesar 3%, ketidakseimbangan arus seluruh motor memiliki rata-rata 2,75% masih dalam batas IEC 60038 sebesar 5%, Tegangan mengalami overvoltage rata-rata 4,72% masih dalam batas ANSI C84.1 – 2020 sebesar 5%, Faktor daya memiliki rata-rata 0,833 dibawah standar SPLN D3.004-1:2010 dengan minimum diatas 0.85. Rugi-rugi tembaga stator seluruh motor rata-rata 1,928% masih dalam batas IEC 60034-30-1 sebesar 5,6%. Sistem inferensi fuzzy Mamdani dengan 48 aturan IF-THEN menghasilkan indeks kondisi tunggal untuk setiap motor. Motor Distribusi 1 rata-rata sebesar 82,9 dan 4 rata-rata sebesar 86,2 Motor Distribusi 5 rata-rata sebesar 82,6 semua dalam kategori normal.

Kata kunci: Sistem distribusi listrik, kualitas daya, rugi daya stator, Fuzzy Decision Making.

Bagaimana Cara Sitasi Artikel ini:

Sakti, S. A. P., Joko, J., Rijanto, T. ., & Endryansyah, E. (2026). Evaluasi Sistem Distribusi Listrik IPAM Menggunakan Fuzzy Decision Making Berbasis Kualitas dan Rugi Daya. Jejak Digital: Jurnal Ilmiah Multidisiplin, 2(3), 4666-4687. <https://doi.org/10.63822/3vhz8h42>

PENDAHULUAN

Energi listrik merupakan landasan vital bagi operasional industri modern yang menggerakkan mesin produksi hingga sistem otomasi kompleks, sehingga menjadikan sektor industri sebagai faktor kunci dalam permintaan energi dan pertumbuhan ekonomi (Raza Abbasi et al., 2021). Pasokan energi yang berkelanjutan menjadi prasyarat fundamental bagi keberhasilan seluruh kegiatan operasional. Performa dan keandalan sistem distribusi listrik menjadi kunci utama untuk memastikan efisiensi operasional di pusat-pusat industri vital (Musthopa et al., 2023). Sistem distribusi listrik berperan strategis sebagai penghubung utama antara pembangkit energi dan pengguna akhir, di mana keandalannya menjamin proses produksi berjalan efektif serta menekan risiko gangguan seperti terhentinya produksi, kerusakan peralatan, dan peningkatan biaya operasional (Ogundola & Boyejo, 2024). Dengan demikian, keandalan distribusi merupakan infrastruktur vital sekaligus strategi penting untuk menjaga stabilitas ekonomi dan kesinambungan layanan publik (Seppälä & Järventausta, 2024).

Pada konteks Instalasi Pengolahan Air Minum (IPAM) di Indonesia, energi listrik menjadi komponen vital yang sangat menentukan keberhasilan pengelolaan sumber daya air secara berkelanjutan. Beban listrik di IPAM sebagian besar bersifat induktif dan didominasi oleh motor-motor berdaya besar yang menggerakkan proses pemompaan, aerasi, dan filtrasi (Skoczko, 2025). Kondisi ini menyebabkan kualitas daya dan tingkat rugi daya motor yang tinggi berpotensi mengganggu proses pengolahan air bahkan menyebabkan kerusakan peralatan (Bonilla & Le, 2024). Kualitas daya (Power Quality/PQ) dipahami sebagai seperangkat karakteristik yang wajib dipenuhi sistem kelistrikan untuk memastikan kecukupan pasokan bagi konsumen akhir, baik dari sisi tegangan maupun arus (Remigio-Carmona et al., 2022). Gangguan kualitas daya yang tidak dikendalikan dapat mengurangi kinerja peralatan, mempercepat kerusakan, serta menurunkan keandalan sistem tenaga secara keseluruhan (Chawda et al., 2020).

Dalam operasional motor induksi, rugi-rugi tembaga stator (stator copper losses) merupakan komponen kerugian utama akibat belitan konduktor yang mendisipasikan panas melalui efek Joule, di mana nilainya dihitung berdasarkan jumlah fasa, resistansi DC stator, dan kuadrat arus stator (Khalghani et al., 2022). Standar IEEE 112 Metode B mengharuskan pengukuran resistansi fasa stator dilakukan saat kondisi kestabilan termal tercapai agar rugi daya nyata dapat ditentukan secara akurat (Bucho et al., 2022). Perubahan temperatur operasional akan mengubah resistivitas material konduktor secara signifikan, yang berdampak langsung pada fluktuasi total rugi daya dan penurunan efisiensi mesin (Wengerkiewicz et al., 2022).

Evaluasi terhadap parameter kompleks seperti kualitas daya dan rugi-rugi daya motor seringkali menghadapi ketidakpastian dan data yang bersifat samar, sehingga metode konvensional kurang mampu memberikan penilaian komprehensif (Saleem et al., 2023). Untuk mengatasi keterbatasan ini diperlukan pendekatan yang lebih fleksibel seperti logika fuzzy, yang dirancang untuk menangani ambiguitas dan meniru cara pakar mengambil keputusan (Wu & Xu, 2020). Pendekatan metode fuzzy memungkinkan penilaian kondisi teknis peralatan listrik dengan tingkat probabilitas tinggi berdasarkan hasil parameter pengujian dan pengukuran (Bardyk & Bolotnyi, 2023). Logika fuzzy terbukti banyak digunakan dalam sistem tenaga listrik, terutama untuk mendeteksi dan mengklasifikasikan isu-isu terkait kualitas daya (Beniwal et al., 2021). Pendekatan ini juga berhasil digunakan untuk mengevaluasi indeks keandalan pada sistem distribusi (Paci et al., 2021).

Penelitian Blazakis menunjukkan teori fuzzy efektif mengevaluasi rugi-rugi daya dengan cara mendeteksi pencurian listrik yang merupakan porsi terbesar rugi-rugi non-teknis pada jaringan distribusi (Blazakis et al., 2020). Penelitian Jiekang menggunakan metode klasifikasi berbasis teori fuzzy untuk

mengevaluasi risiko terkait rugi-rugi daya dengan membangun fungsi keanggotaan (membership function) untuk mengklasifikasikan tingkat keparahan dari rugi daya tersebut (Jiekang et al., 2020). Dalam konteks pengambilan keputusan kelistrikan, metode fuzzy telah berkembang sebagai kerangka kerja pendukung keputusan (decision support framework) untuk menangani masalah kompleks dalam perencanaan energi (Afrane et al., 2021). Pérez-Briceño mengaplikasikan Fuzzy Decision Making (FDM) untuk menilai dan mengoptimalkan performa sistem distribusi energi terbarukan dengan menghasilkan rekomendasi keputusan yang adaptif (Pérez-Briceño et al., 2025).

Penelitian sebelumnya tentang kualitas daya dilakukan oleh Fadli (2024) yang menganalisis kualitas daya listrik pada transformator distribusi 2.000 kVA di Universitas Muhammadiyah Semarang mencakup parameter tegangan, frekuensi, faktor daya, harmonisa, dan ketidakseimbangan arus (Fadli et al., n.d.). Untuk rugi daya, penelitian Kisworo (2025) menganalisis rugi-rugi daya pada penyulang Sukamulya milik PT PLN (Persero) UP3 Purwakarta menggunakan simulasi aliran daya dengan perangkat lunak ETAP (Kisworo et al., n.d.). Berbeda dengan penelitian-penelitian tersebut yang cenderung menganalisis kualitas daya atau rugi-rugi daya secara terpisah, penelitian ini menawarkan kerangka evaluasi yang terintegrasi dengan menerapkan metode Fuzzy Decision Making (FDM) untuk mensintesis dua parameter krusial tersebut menjadi satu indeks kondisi tunggal pada sistem distribusi listrik IPAM.

Berdasarkan permasalahan yang telah diuraikan, penelitian ini bertujuan menganalisis penerapan metode Fuzzy Decision Making dalam mengevaluasi kondisi sistem distribusi listrik IPAM berdasarkan parameter rugi daya motor dan kualitas daya secara terintegrasi.

METODE PENELITIAN

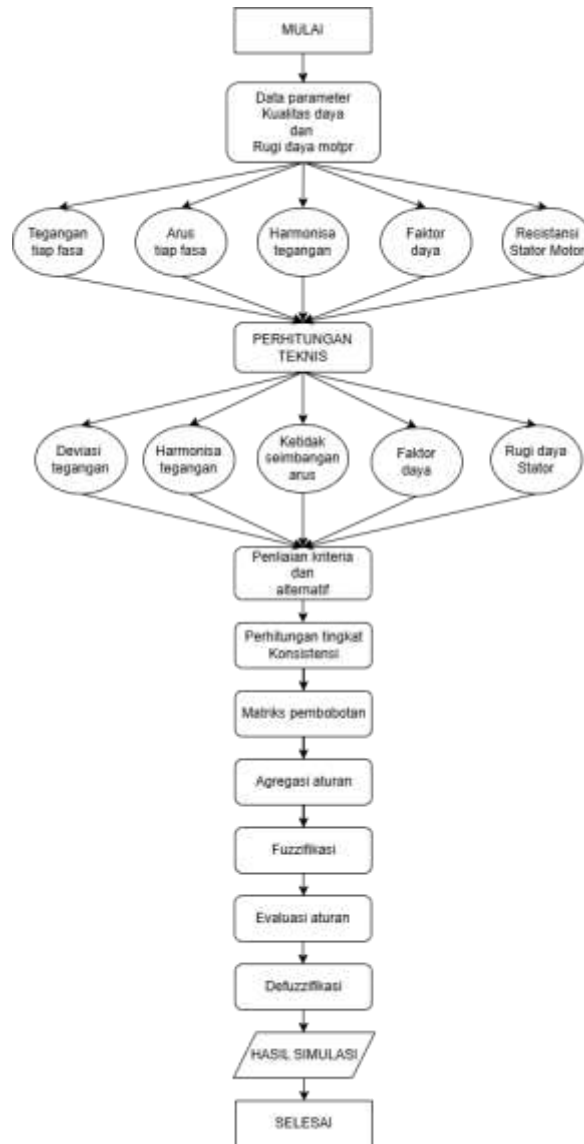
Penelitian kuantitatif ini menggunakan metode simulasi berbasis MATLAB dengan orientasi pada analisis numerik dan pemodelan sistem untuk mengevaluasi kondisi sistem distribusi listrik pada Instalasi Pengolahan Air Minum (IPAM) secara objektif. Melalui pendekatan *Fuzzy Decision Making* (FDM) sebagai metode analisis data utama, penelitian ini mensintesis berbagai data parameter kelistrikan terukur, yang meliputi rugi-rugi daya stator pada motor serta indikator kualitas daya seperti tegangan, arus, distorsi harmonisa, dan faktor daya. Seluruh variabel masukan numerik tersebut kemudian diproses melalui sistem inferensi fuzzy untuk menghasilkan keputusan evaluatif akhir yang mengklasifikasikan kondisi sistem ke dalam kategori baik, cukup, atau buruk, sekaligus memberikan justifikasi pemenuhan performa sistem terhadap standar kelistrikan yang berlaku.

Penelitian ini dimulai dengan pengumpulan data parameter kualitas daya dan rugi daya motor sebagai masukan utama. Data yang dikumpulkan terdiri dari lima parameter pengukuran lapangan, yaitu tegangan tiap fasa, arus tiap fasa, harmonisa tegangan, faktor daya, dan resistansi stator motor.

Seluruh data tersebut kemudian diproses melalui tahap perhitungan teknis untuk menghasilkan parameter turunan yang lebih terstruktur. Dari proses perhitungan ini diperoleh lima parameter hasil, yaitu deviasi tegangan (yang mencakup kondisi overvoltage maupun undervoltage), harmonisa tegangan, ketidakseimbangan arus, faktor daya, dan rugi daya stator motor induksi. Kelima parameter inilah yang menjadi variabel input bagi sistem evaluasi selanjutnya.

Tahap berikutnya adalah penerapan metode Fuzzy Decision Making berbasis pembobotan AHP. Proses ini diawali dengan penilaian kriteria dan alternatif menggunakan skala perbandingan berpasangan Saaty, kemudian dilanjutkan dengan perhitungan tingkat konsistensi untuk memastikan validitas penilaian. Dari hasil tersebut dibentuk matriks pembobotan yang menjadi dasar aturan dalam sistem fuzzy. Setelah

bobot ditetapkan, proses berlanjut ke agregasi aturan (penyusunan aturan IF-THEN), fuzzifikasi (konversi nilai crisp ke derajat keanggotaan fuzzy), evaluasi aturan berdasarkan 48 aturan IF-THEN yang telah disusun, dan terakhir defuzzifikasi untuk mengonversi hasil inferensi fuzzy kembali menjadi nilai crisp berupa indeks kondisi tunggal. Proses tersebut menghasilkan satu nilai indeks kondisi untuk masing-masing motor (Motor Distribusi 1, 4, dan 5) sebagai hasil simulasi, yang kemudian menjadi dasar penilaian kondisi operasional sistem distribusi listrik IPAM secara menyeluruh hingga penelitian dinyatakan selesai.

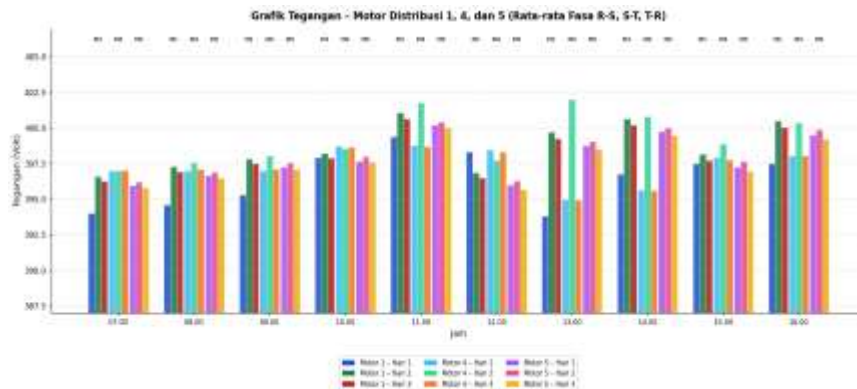


Gambar 1 Rancangan Penelitian
Sumber: Dokumentasi Pribadi.2026

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Data Monitoring Tegangan

Gambar 2 menunjukkan rata-rata tegangan per fasa yang diambil dari pemantauan tegangan panel distribusi motor. Data diambil selama 3 hari pada jam 07.00-16.00 data diambil setiap 1 jam sekali. Motor Distribusi 1 dan 5 memiliki daya 160 kW dan Motor distribusi 4 memiliki daya 132 kW. Sebagai acuan standar ANSI C84.1 - 2020 batas kenaikan tegangan yang diizinkan pada jaringan distribusi adalah +5% dari tegangan nominal, batas penurunan tegangan yang diizinkan pada jaringan distribusi adalah -10% dari tegangan nominal.



Gambar 2 Monitoring Tegangan Motor Distribusi 1,4,5

Sumber: Dokumentasi Pribadi.2026

2. Data Monitoring Arus

Gambar 3 menunjukkan rata-rata arus per fasa yang diambil dari pemantauan arus panel distribusi motor. Data diambil selama 3 hari pada jam 07.00-16.00 data diambil setiap 1 jam sekali. Motor Distribusi 1 dan 5 memiliki daya 160 kW dan Motor distribusi 4 memiliki daya 132 kW. Sebagai acuan standar IEC 60038 menetapkan bahwa batas toleransi untuk ketidakseimbangan arus yang diizinkan tidak boleh melebihi 5%

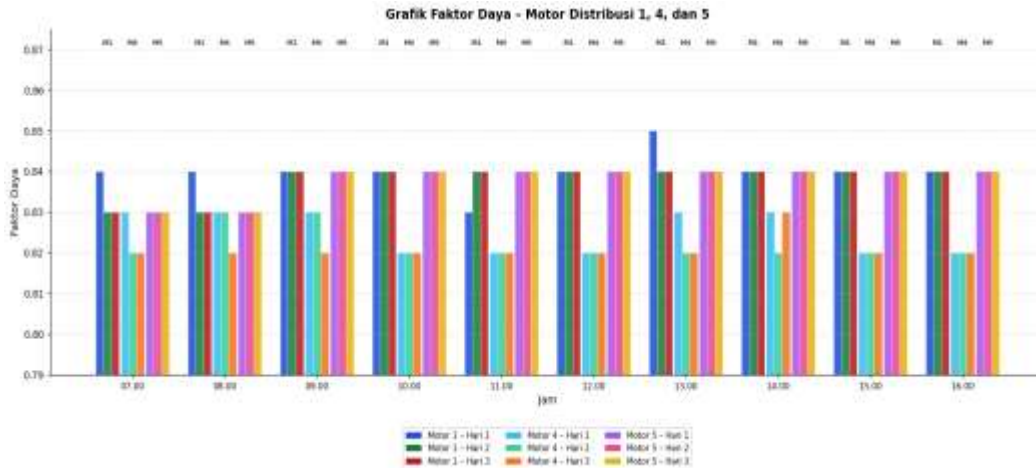


Gambar 3 Monitoring Arus Motor Distribusi 1,4,5

Sumber: Dokumentasi Pribadi.2026

3. Data Monitoring Faktor Daya

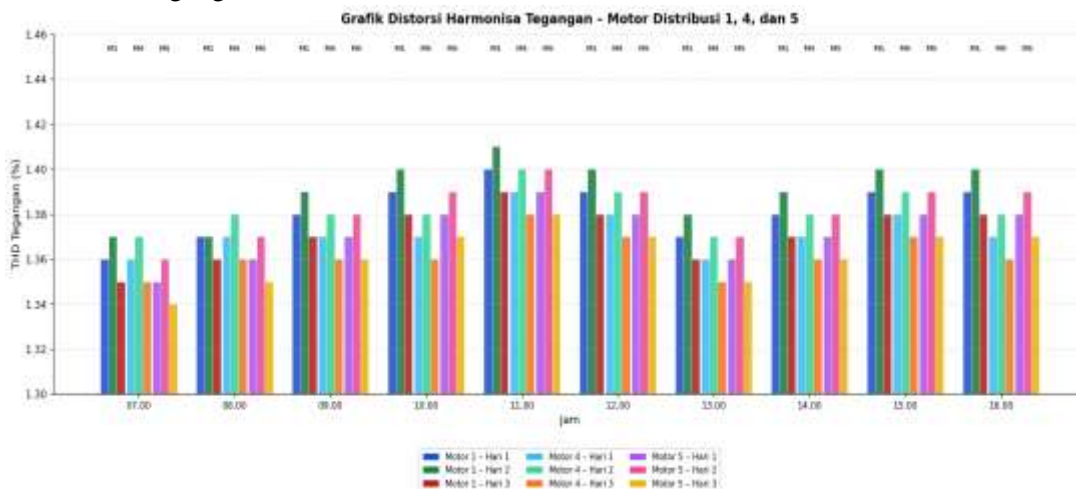
Gambar 4 menunjukkan rata-rata faktor daya per fasa yang diambil dari pemantauan faktor daya panel distribusi motor. Data diambil selama 3 hari pada jam 07.00-16.00 data diambil setiap 1 jam sekali. Motor Distribusi 1 dan 5 memiliki daya 160 kW dan Motor distribusi 4 memiliki daya 132 kW. Sebagai acuan rasio antara daya aktif (Watt) terhadap daya semu (VA) yang mengukur efisiensi penggunaan listrik. Sesuai standar SPLN D3.004-1:2010, faktor daya harus dijaga minimal 0.85



Gambar 4 Monitoring Faktor daya Motor Distribusi 1,4,5
Sumber: Dokumentasi Pribadi.2026

4. Data Monitoring Distorsi Harmonisa Tegangan

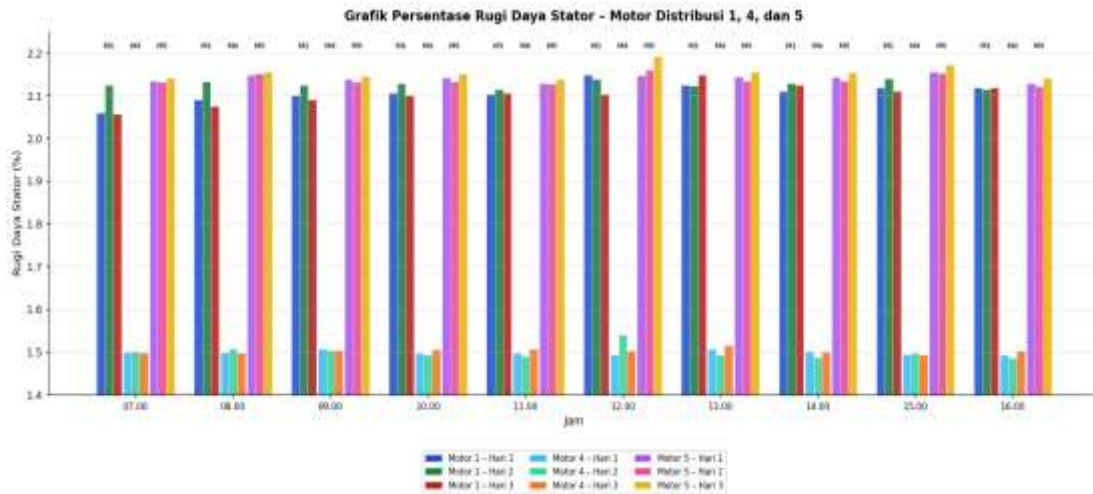
Gambar 5 menunjukkan rata-rata harmonisa tegangan individu per fasa yang diambil dari pemantauan harmonisa tegangan panel distribusi motor. Data diambil selama 3 hari pada jam 07.00-16.00 data diambil setiap 1 jam sekali. Motor Distribusi 1 dan 5 memiliki daya 160 kW dan Motor distribusi 4 memiliki daya 132 kW. Sebagai acuan Untuk menjaga kualitas daya, besaran distorsi harmonisa harus dibatasi 3% Batasan distorsi harmonisa tegangan individu berdasarkan standar IEEE 519-1992



Gambar 5 Monitoring Distorsi Harmonisa tegangan Motor Distribusi 1,4,5
Sumber: Dokumentasi Pribadi.2026

5. Data Monitoring Rugi daya stator

Gambar 6 menunjukkan rata-rata rugi daya stator yang diambil dari perhitungan rugi daya stator dibagi dengan daya aktif motor. Data perhitungan selama 3 hari pada jam 07.00-16.00 data diambil setiap 1 jam sekali. Motor Distribusi 1 dan 5 memiliki daya 160 kW dan Motor distribusi 4 memiliki daya 132 kW. Standar IEC 60034-30-1 bisa digunakan untuk motor 3 fasa 0.37kW – 500 kW dengan rugi maksimal 5.6%



Gambar 6 Monitoring Rugi daya Stator Motor Distribusi 1,4,5
Sumber: Dokumentasi Pribadi.2026

Perhitungan Data

1. Perhitungan Data Tegangan

Berikut merupakan contoh perhitungan data tegangan pada Motor Distribusi 1, Motor Distribusi 4, dan Motor Distribusi 5. Proses perhitungan tegangan diawali dengan menentukan nilai tegangan rata-rata dari ketiga fasa kemudian dilanjutkan dengan menganalisis kondisi tegangan untuk mengetahui adanya tegangan lebih (*overvoltage*) atau tegangan kurang (*undervoltage*)

$$V_{rata-rata} = \frac{V_R + V_S + V_T}{3}$$

$$V_{rata-rata} = \frac{394.8 + 392.5 + 394.7}{3}$$

$$V_{rata-rata} = 394 \text{ V}$$

Setelah diperoleh nilai tegangan rata-rata, selanjutnya dilakukan analisis tegangan lebih (*overvoltage*)

$$\text{Tegangan Lebih} = \frac{V_{rata-rata} - V_{nominal}}{V_{nominal}} \times 100\%$$

$$\text{Tegangan Lebih} = \frac{394 - 380}{380} \times 100\%$$

$$\text{Tegangan Lebih} = 3,68\%$$

2. Perhitungan Data Ketidakseimbangan arus

Berikut merupakan contoh perhitungan data arus pada Motor Distribusi 1, Motor Distribusi 4, dan Motor Distribusi 5. Proses perhitungan ketidakseimbangan arus diawali dengan menentukan nilai arus rata-

rata dari ketiga fasa. Selanjutnya dilakukan analisis ketidakseimbangan arus untuk mengetahui besarnya tingkat ketidakseimbangan arus pada sistem tiga fasa.

$$I_{rata-rata} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3}$$
$$I_{rata-rata} = \frac{266.1 + 262.8 + 253.9}{3}$$
$$I_{rata-rata} = \frac{782.8}{3}$$
$$I_{rata-rata} = 260.9 \text{ A}$$

Setelah diperoleh nilai arus rata-rata, selanjutnya dilakukan analisis ketidakseimbangan arus

$$\text{Ketidakseimbangan arus} = \frac{\text{Deviasi } I_{rata-rata}}{I_{rata-rata}} \times 100\%$$

Deviasi arus tiap fasa

$$\Delta I_R = |266.1 - 260.9| = 5.2$$
$$\Delta I_S = |262.8 - 260.9| = 1.9$$
$$\Delta I_T = |253.9 - 260.9| = 7$$

$$\text{Ketidakseimbangan arus} = \frac{\text{Deviasi Maksimum}}{I_{rata-rata}} \times 100\%$$

$$\text{Ketidakseimbangan arus} = \frac{7}{260.9} \times 100\%$$

$$\text{Ketidakseimbangan arus} = 2.68\%$$

3. Perhitungan Data Rugi Daya Stator

Berikut merupakan contoh perhitungan rugi daya stator pada Motor Distribusi 1, Motor Distribusi 4, dan Motor Distribusi 5. Proses perhitungan diawali dengan perhitungan besaran rugi daya untuk mengetahui nilai rugi daya yang terjadi pada stator motor.

$$P_{cu,s} = 3I_s^2 R_T$$
$$P_{cu,s} = 3 \times 260.9^2 \times 0.01521$$
$$P_{cu,s} = 204,206.43 \times 0.01521$$
$$P_{cu,s} = 3,105.9798 \text{ W}$$
$$P_{cu,s} = 3,1 \text{ kW}$$

Setelah diperoleh nilai rugi daya stator, selanjutnya mencari nilai daya aktif dan mencari nilai persentase rugi daya stator

$$P = \sqrt{3} V I \cos \phi$$
$$P = \sqrt{3} \times 394 \times 260,9 \times 0.844$$
$$P = 150.265,97 \text{ Watt}$$
$$P = 150.27 \text{ kW}$$

Setelah diperoleh nilai daya aktif, selanjutnya dilakukan perhitungan persentase rugi daya stator.

$$\%P_{loss} = \frac{P_{loss}}{P_{in}} \times 100\%$$

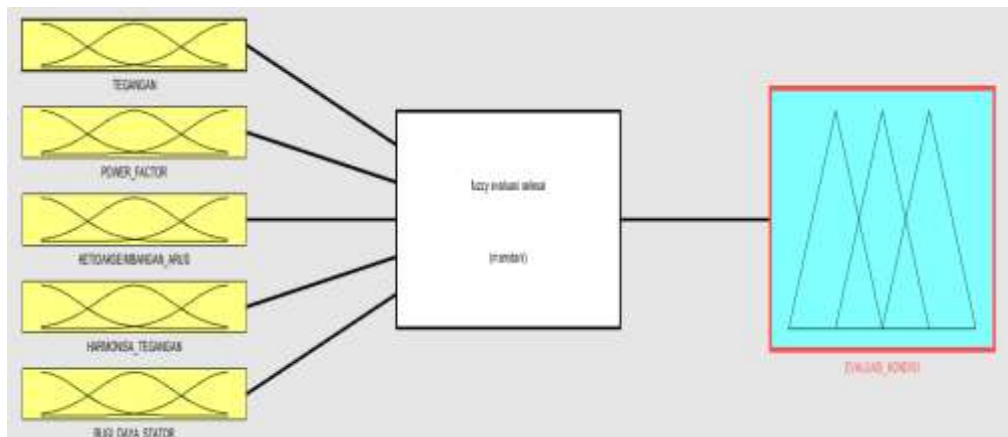
$$\%P_{loss} = \frac{3.1 \text{ kW}}{150.7 \text{ kW}} \times 100\%$$

$$\%P_{loss} = 0.0205707 \times 100\%$$

$$\%P_{loss} = 2.06 \%$$

Penerapan Fuzzy Decision Making

Penerapan *Fuzzy Decision Making* pada penelitian ini dilakukan dengan mengintegrasikan lima parameter masukan utama, yaitu tegangan, ketidakseimbangan arus, faktor daya, harmonisa tegangan, dan rugi daya stator motor. Proses ini bertujuan untuk menghasilkan sebuah keputusan atau status kondisi sistem yang akurat berdasarkan standar ketenagalistrikan yang berlaku.



Gambar 7 Rancangan Fuzzy Decision Making

Sumber: Dokumentasi Pribadi. 2026

1. Fuzzifikasi dengan Keanggotaan Trapesium

Tahap fuzzifikasi bertujuan untuk mengonversi nilai tegas (*crisp*) dari variabel masukan menjadi variabel linguistik menggunakan fungsi keanggotaan trapesium. Pemilihan kurva trapesium didasarkan pada karakteristik parameter sistem tenaga listrik yang memiliki rentang nilai nominal atau zona aman yang stabil, sehingga derajat keanggotaan bernilai penuh dapat direpresentasikan secara akurat pada interval standar yang diizinkan. Secara matematis, kurva ini memberikan fleksibilitas lebih baik.

a. Variabel Tegangan

Variabel Tegangan memiliki semesta [0 450] Volt yang dibagi menjadi tiga himpunan fuzzy trapesium yang saling beririsan sebesar 1 Volt demi kontinuitas sistem. Himpunan Di bawah_Std (parameter [-1, 0, 341, 342]) merepresentasikan kondisi jatuh tegangan (voltage drop), himpunan Standar (parameter [341, 342, 399, 400]) menunjukkan kondisi kerja normal, dan himpunan Diatas_Standar (parameter [399, 400, 450, 451]) mengidentifikasi kondisi tegangan lebih (over voltage).

b. Variabel Faktor Daya

Variabel Faktor Daya bekerja pada semesta [0 1] menggunakan dua himpunan fuzzy trapesium dengan irisan kritis (overlap) pada rentang 0,84 hingga 0,85. Himpunan Di bawah_Std dengan parameter [-0,1, 0, 0,84, 0,85] merepresentasikan kondisi kerugian daya signifikan yang melanggar batasan SPLN, sedangkan himpunan Standar dengan parameter [0,84, 0,85, 1, 1,1] menunjukkan kondisi efisiensi daya yang optimal

c. Variabel Ketidakseimbangan arus

Variabel ini dipetakan pada domain [0 10]% menggunakan dua himpunan fuzzy trapesium dengan area transisi pada rentang 5% hingga 6% untuk menghasilkan derajat keanggotaan yang halus. Himpunan Standar (parameter [-1, 0, 5, 6]) merepresentasikan kondisi beban seimbang yang aman bagi motor, sementara himpunan Diatas_Standar (parameter [5, 6, 10, 11]) mengidentifikasi ketidakseimbangan di luar batas toleransi yang memerlukan tindakan korektif.

d. Variabel Distorsi Harmonisa Tegangan

Variabel ini dipetakan pada domain [0 10]% dengan interval transisi pada rentang 3% hingga 4% untuk memisahkan batas aman dan kondisi yang berpotensi merusak alat. Himpunan Standar (parameter [-1, 0, 3, 4]) merepresentasikan kualitas gelombang tegangan yang memenuhi standar IEEE 519-1992, sedangkan himpunan Di atas_Standar (parameter [3, 4, 10, 11]) digunakan untuk mengidentifikasi adanya polusi harmonisa yang melebihi toleransi.

e. Variabel Rugi Daya Stator

Variabel ini menggunakan dua himpunan fuzzy untuk memantau kinerja motor listrik. Himpunan Standar dengan parameter [-1, 0, 5, 6, 5, 7] merepresentasikan tingkat efisiensi motor yang masih berada dalam batas toleransi kelas IE1, sedangkan himpunan Diatas_Standar dengan parameter [5, 6, 5, 7, 10, 11] berfungsi untuk mengidentifikasi adanya lonjakan rugi daya yang berpotensi memicu panas berlebih (overheating) pada belitan stator.

2. Inferensi Berbasis Pembobotan AHP

Pembobotan kriteria pada penelitian ini dilakukan berdasarkan expert judgment atau penilaian kepakaran yang didasarkan pada pengalaman dan pengetahuan di bidang sistem kelistrikan di Instalasi pengolahan air minum. Penilaian ini mempertimbangkan dampak masing-masing parameter terhadap kondisi sistem, stabilitas operasi, dan efisiensi peralatan listrik berdasarkan kondisi aktual serta standar teknis yang berlaku. Berdasarkan prioritas kepentingan yang ditetapkan

a. Skala Penilaian Kriteria

Pembobotan kriteria dilakukan menggunakan metode Analytical Hierarchy Process (AHP) dengan skala Saaty 1–9. Skala ini digunakan untuk membandingkan tingkat kepentingan antar kriteria secara berpasangan.

Tabel 1 Skala Pembobotan

Intensitas Kepentingan	Keterangan
1	Kedua elemen sama pentingnya (<i>Equal Importance</i>).
3	Elemen yang satu sedikit lebih penting dibanding elemen lainnya (<i>Moderate Importance</i>).
5	Elemen yang satu lebih penting dibanding elemen yang lainnya (<i>Strong Importance</i>).
7	Satu elemen jelas lebih mutlak penting daripada elemen lainnya (<i>Very Strong Importance</i>).
9	Satu elemen mutlak penting dibanding elemen lainnya (<i>Extreme Importance</i>).
2, 4, 6, 8	Nilai-nilai antara dua nilai pertimbangan yang berdekatan (Nilai ragu-ragu).

b. Matriks Perbandingan Berpasangan

Matriks perbandingan berpasangan (*pairwise comparison matrix*) A disusun berdasarkan tingkat kepentingan relatif antar kriteria. Nilai diagonal utama bernilai 1 (sama penting dengan dirinya sendiri), sedangkan nilai di bawah diagonal merupakan kebalikan (reciprocal) dari nilai di atas diagonal.

Tabel 2 Matriks Perbandingan

Kriteria	Arus	Tegangan	PF	Harmonisa	Rugi daya stator
Arus	1	2	3	5	7
Tegangan	1/2	1	2	4	5
Faktor daya	1/3	1/2	1	3	4
Harmonisa	1/5	1/4	1/3	1	2
Rugi daya Stator	1/7	1/5	1/4	1/2	1

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 5 & 7 \\ 1/2 & 1 & 2 & 3 & 5 \\ 1/3 & 1/2 & 1 & 3 & 4 \\ 1/5 & 1/4 & 1/3 & 1 & 2 \\ 1/7 & 1/5 & 1/4 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}$$

c. Nilai Konsistensi Ransom

Random Index (RI) 4676 adalah nilai acak yang digunakan sebagai pembanding untuk menghitung Consistency Ratio. Nilai RI bergantung pada ukuran matriks n yang digunakan. Untuk penelitian ini menggunakan n = 5.

Tabel 3 Konsistensi Ransom

Ukuran Matriks (n)	Nilai RI
1 dan 2	0.00
3	0.58
4	0.90
5	1.12
6	1.24
7	1.32
8	1.41
9	1.45
10	1.49

d. Penjumlahan Kolom Matriks Perbandingan

Langkah pertama normalisasi adalah menjumlahkan setiap kolom pada matriks perbandingan berpasangan A. Jumlah kolom digunakan sebagai pembagi pada tahap normalisasi

Tabel 4 Matriks Perbandingan Jumlah kolom

Kriteria	Arus	Tegangan	PF	Harmonisa	Rugi daya stator
----------	------	----------	----	-----------	------------------

Arus	1,000	2,000	3,000	5,000	7,000
Tegangan	0,500	1,000	2,000	4,000	5,000
Faktor daya	0,333	0,500	1,000	3,000	4,000
Harmonisa	0,200	0,250	0,333	1,000	2,000
Rugi daya Stator	0,143	0,200	0,250	0,500	1,000
Jumlah kolom	2,1762	3,9500	6,583	13,500	19,000

$$A = \begin{bmatrix} 1,000 & 2,000 & 3,000 & 5,000 & 7,000 \\ 0,500 & 1,000 & 2,000 & 3,000 & 5,000 \\ 0,333 & 0,500 & 1,000 & 3,000 & 4,000 \\ 0,200 & 0,250 & 0,333 & 1,000 & 2,000 \\ 0,143 & 0,200 & 0,250 & 0,500 & 1,000 \end{bmatrix}$$

e. Normalisasi Matriks

Setiap elemen matriks dibagi dengan jumlah kolom masing-masing untuk menghasilkan matriks ternormalisasi. Setelah normalisasi, jumlah setiap kolom bernilai 1,0000 yang menunjukkan proses normalisasi berjalan benar.

Tabel 5 Matriks Ternormalisasi

Kriteria	Arus	Tegangan	PF	Harmonisa	Rugi daya stator
Arus	0,4595	0,5063	0,4557	0,3704	0,3684
Tegangan	0,2298	0,2532	0,3038	0,2963	0,2632
Faktor daya	0,1532	0,1266	0,1519	0,2222	0,2105
Harmonisa	0,0919	0,0633	0,0506	0,0741	0,1053
Rugi daya Stator	0,0656	0,0506	0,0380	0,0370	0,0526
Jumlah kolom	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000

f. Perhitungan Vektor Prioritas

Vektor prioritas diperoleh dengan merata-ratakan setiap baris pada matriks ternormalisasi. Nilai prioritas merepresentasikan bobot relatif masing-masing kriteria terhadap keseluruhan sistem.

Tabel 6 Perhitungan Prioritas

Kriteria	Arus	Tegangan	PF	Harmonisa	Rugi daya stator	Σ baris	Prioritas
Arus	0,4595	0,5063	0,4557	0,3704	0,3684	2,1245	0,4249
Tegangan	0,2298	0,2532	0,3038	0,2963	0,2632	1,3462	0,2692
Faktor daya	0,1532	0,1266	0,1519	0,2222	0,2105	0,8644	0,1729
Harmonisa	0,0919	0,0633	0,0506	0,0741	0,1053	0,4050	0,0810
Rugi daya Stator	0,0656	0,0506	0,0380	0,0370	0,0526	0,2600	0,0520

g. Perhitungan Tingkat Konsistensi

Setelah mendapatkan vektor prioritas, dilakukan uji konsistensi untuk memastikan penilaian perbandingan berpasangan bersifat konsisten.

Tabel 7 Hasil Konsistensi

Kriteria	Rugi daya stator					Σ baris
	Arus	Tegangan	PF	Harmonisa		
Arus	0,4595	0,5063	0,4557	0,3704	0,3684	2,1245
Tegangan	0,2298	0,2532	0,3038	0,2963	0,2632	1,3462
Faktor daya	0,1532	0,1266	0,1519	0,2222	0,2105	0,8644
Harmonisa	0,0919	0,0633	0,0506	0,0741	0,1053	0,4050
Rugi daya Stator	0,0656	0,0506	0,0380	0,0370	0,0526	0,2600

Maka untuk mencari λ_{maks} yakni jumlah tiap baris dibagi dengan masing masing prioritas dan hasilnya akan dijumlahkan, Hasil penjumlahan dibagi dengan banyak kriteria (n=5)

$$\lambda = \frac{\Sigma \text{ baris}}{\text{Prioritas}}$$

$$C1(\text{Arus}) = \frac{2,1245}{0,4249} = 5,2977$$

$$C2(\text{Tegangan}) = \frac{1,3462}{0,2692} = 5,1371$$

$$C3(\text{Faktor daya}) = \frac{0,8644}{0,1729} = 5,0772$$

$$C4(\text{Harmonisa}) = \frac{0,4050}{0,0810} = 5,0000$$

$$C5(\text{Rugi daya stator}) = \frac{0,2600}{0,4249} = 5,0000$$

$$\text{Total} = 25,4352$$

Maka dari hasil diatas didapat untuk mencari λ_{maks} yakni:

$$\lambda_{max} = \frac{\text{Total}}{n}$$

$$\lambda_{max} = \frac{25,4352}{5} = 5,0870$$

Lalu rumus untuk mencari consistency ratio (CI)

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

$$CI = \frac{5,0870 - 5}{5 - 1}$$

$$CI = \frac{0,0870}{4} = 0,0218$$

Untuk nilai n=5, nilai random index(RI) = 1.24

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

$$CR = \frac{0,0218}{1,24} = 0,0175$$

Oleh karena $CR \leq 0,1$ maka rasio konsistensi dari perhitungan tersebut bisa diterima.

g. Bobot Hasil kriteria

Setelah seluruh tahapan perhitungan normalisasi dan rata-rata baris selesai dilakukan, maka diperoleh nilai akhir yang merepresentasikan tingkat kepentingan setiap kriteria. Hasil akhir pembobotan beserta peringkat prioritas untuk masing-masing kriteria dalam sistem distribusi

Tabel 8 Bobot hasil Kriteria

Kriteria	Bobot	Persentase	Peringkat
Arus	0,4250	42,5%	1
Tegangan	0,2690	26,9%	2
Faktor daya	0,1729	17,3%	3
Harmonisa	0,0810	8,1%	4
Rugi daya stator	0,0520	5,2%	5
Total	1,0000	100%	-

Transformasi nilai bobot AHP ke dalam parameter input logika Fuzzy didapatkan total 48 Kombinasi Untuk *input Rules Inferensi IF-Then*.

Tabel 9 Interpretasi nilai bobot

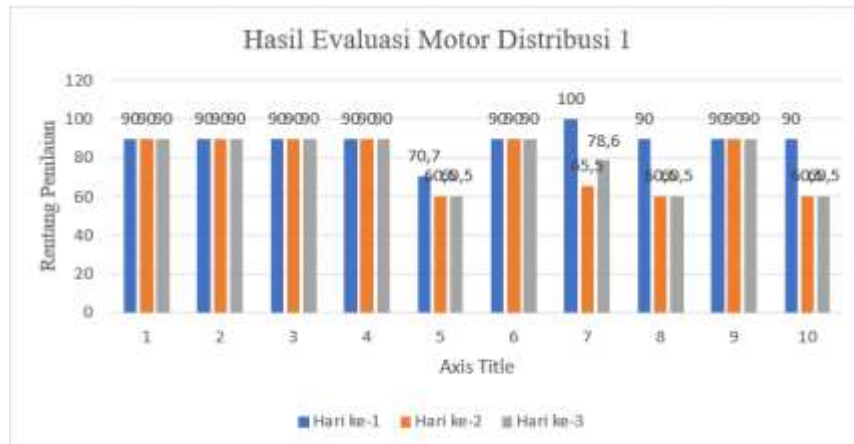
Skor	Interprestasi kondisi	Output	Rentang nilai
0	Semua parameter normal	Sangat Baik	100
1	Hanya Harmonisa ATAU Rugi Daya menyimpang	Baik	81 – 99
2	Harmonisa DAN Rugi Daya menyimpang (bobot kecil)	Baik	81 – 100
3	Tegangan ATAU Faktor Daya menyimpang (satu parameter berbobot sedang)	Sedang	41 – 80
4	Tegangan DAN Harmonisa, atau FP DAN Harmonisa menyimpang	Sedang	41 – 80
5	Tegangan DAN Faktor Daya menyimpang (dua parameter berbobot sedang)	Sedang	41 – 80
6	Arus menyimpang + parameter ringan	Buruk	1 – 40
7	Arus + Tegangan atau FP menyimpang	Buruk	1 – 40
8	Arus + Tegangan + Harmonisa/Rugi Daya menyimpang	Buruk	1 – 40
9	Semua parameter menyimpang (kondisi terburuk)	Buruk	1 – 40

3. Proses Evaluasi / Deffuzifikasi

a. Evaluasi Motor Distribusi 1

Tabel 10 Input Evaluasi Motor Distribusi 1

Motor Distribusi 1					
Jam	Input Evaluasi				
	Tegangan	Ketidakseimbangan arus	Faktor daya	Harmonisa	Rugi daya stator
Hari ke-1					
07.00	394 V	2.68%	0.84	1,36 %	2,075%
08.00	394.6 V	2.00%	0.84	1,37 %	2,090%
09.00	395.3 V	2.04%	0.84	1,38 %	2,101%
10.00	397.9 V	2.09%	0.84	1,39 %	2,106%
11.00	399.4 V	2.36%	0.83	1,40%	2,104%
12.00	398.3 V	2.02%	0.84	1,39%	2,148%
13.00	393.8 V	2.30%	0.85	1,37 %	2,124%
14.00	396.8 V	2.56%	0.84	1,38 %	2,110%
15.00	397.5 V	2.48%	0.84	1,39 %	2,119%
16.00	397.5 V	2.32%	0.84	1,39 %	2,129%
Rata-rata	396,51 V	2.26 %	0.84	1,38%	2,103%
Hari ke-2					
07.00	396.6 V	2.39 %	0.83	1.37%	2,124%
08.00	397.3 V	2.52 %	0.83	1.37%	2,133%
09.00	397.8 V	2.62 %	0.84	1.39%	2,124%
10.00	398.2 V	2.74 %	0.84	1.40%	2,129%
11.00	401.1 V	2.57 %	0.84	1.41%	2,115%
12.00	396.9 V	2.80 %	0.84	1.40%	2,139%
13.00	399.7 V	2.63 %	0.84	1.38%	2,123%
14.00	400.6 V	3.05 %	0.84	1.39%	2,129%
15.00	398.1 V	2.88 %	0.84	1.40%	2,140%
16.00	400.5 V	2.90 %	0.84	1.40%	2,114%
Rata-rata	398,6 V	2.71%	0.838	1,39%	2,217%
Hari ke-3					
07.00	396.27 V	2.40%	0.83	1.35%	2,057%
08.00	396.93 V	2.53%	0.83	1.36%	2,075%
09.00	397.47 V	2.59%	0.84	1.37%	2,090%
10.00	397.87 V	2.72%	0.84	1.38%	2,101%
11.00	400.63 V	2.56%	0.84	1.39%	2,106%
12.00	396.50 V	2.81%	0.84	1.38%	2,104%
13.00	399.23 V	2.62%	0.84	1.36%	2,148%
14.00	400.20 V	3.04%	0.84	1.37%	2,124%
15.00	397.70 V	2.87%	0.84	1.38%	2,110%
16.00	400.03 V	2.91%	0.84	1.38%	2,119%
Rata-rata	398,2 V	2.71 %	0.83	1,37%	2,103%



Gambar 8 Hasil Evaluasi motor distribusi 1

Sumber: Dokumentasi Pribadi. 2026

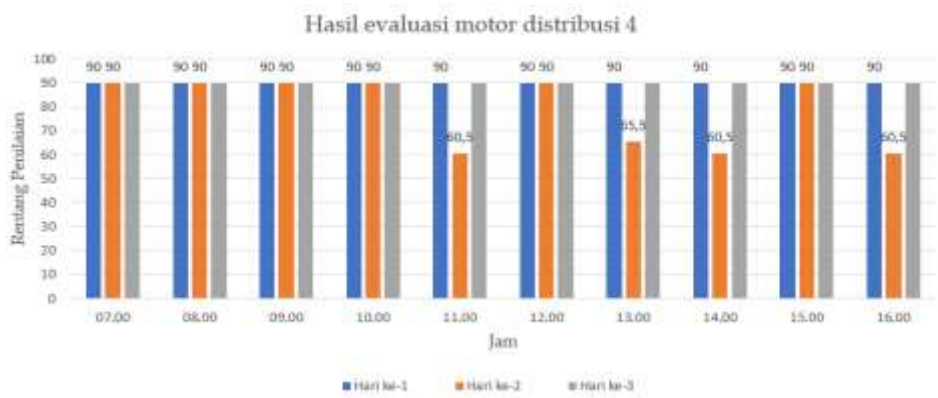
Berdasarkan analisis metode fuzzy decision making pada motor distribusi 1, kondisi operasional selama tiga hari pengamatan menunjukkan dinamika yang bervariasi namun tetap terpola. Pada hari pertama, motor secara umum berada dalam kategori baik atau normal dengan nilai evaluasi dominan di angka 90 dan rata-rata harian 88,7, meskipun sempat turun ke angka 70,7 (kategori sedang/perlu monitoring) pada pukul 11.00 akibat lonjakan tegangan, serta adanya catatan inefisiensi pada parameter faktor daya yang di bawah standar. Pola penurunan performa ini semakin terlihat pada hari kedua dan ketiga, di mana jam-jam tertentu (07.00–10.00, 12.00, dan 15.00) masih bertahan di kategori normal (nilai sekitar 90) dengan kendala hanya pada faktor daya, tetapi mengalami penurunan ke kategori sedang/perlu monitoring pada pukul 11.00, 13.00, 14.00, dan 16.00 akibat kombinasi masalah faktor daya dan tegangan yang melebihi batas. Akibat fluktuasi tersebut, nilai rata-rata harian pada hari kedua merosot ke angka 78,7 dan hari ketiga sedikit membaik di angka 80,3, yang menempatkan kondisi keseluruhan motor pada kedua hari terakhir tersebut dalam kategori sedang atau memerlukan monitoring.

b. Evaluasi Motor Distribusi 4

Tabel 11 Input Evaluasi Motor Distribusi 4

Motor Distribusi 4					
Jam	Input Evaluasi				
	Tegangan	Ketidakeimbangan arus	Faktor daya	Harmonisa	Rugi daya stator
Hari ke-1					
07.00	397.00 V	2.88 %	0.82	1.36%	1,500%
08.00	397.00 V	2.79 %	0.82	1.37%	1,499%
09.00	397.00 V	2.80 %	0.82	1.37%	1,507%
10.00	398.70 V	3.25 %	0.82	1.37%	1,497%
11.00	398.77 V	3.09 %	0.82	1.39%	1,498%
12.00	398.43 V	2.60 %	0.82	1.38%	1,494%
13.00	394.97 V	2.86 %	0.82	1.36%	1,507%
14.00	395.63 V	3.11 %	0.83	1.37%	1,502%
15.00	397.90 V	3.15 %	0.82	1.38%	1,495%
16.00	398.03 V	3.17 %	0.82	1.37%	1,494%
Rata-rata	397.34 V	2.97%	0.82	1,37%	1,499%

Motor Distribusi 4					
Jam	Input Evaluasi				
	Tegangan	Ketidakseimbangan arus	Faktor daya	Harmonisa	Rugi daya stator
Hari ke-2					
07.00	396.6 V	2.88 %	0.82	1.37%	1,502%
08.00	397.3 V	2.79 %	0.82	1.38%	1,507%
09.00	397.8 V	2.80 %	0.82	1.38%	1,504%
10.00	398.2 V	3.07 %	0.82	1.38%	1,494%
11.00	401.1 V	2.38 %	0.82	1.40%	1,490%
12.00	396.9 V	3.00 %	0.82	1.39%	1,541%
13.00	399.7 V	3.07 %	0.82	1.37%	1,493%
14.00	400.6 V	3.16 %	0.82	1.38%	1,487%
15.00	398.1 V	2.81 %	0.82	1.39%	1,497%
16.00	400.5 V	2.83 %	0.82	1.38%	1,486%
Rata-rata	399.26 V	2.88 %	0.82	1,38%	1,500 %
Hari ke-3					
07.00	397.03 V	2.82 %	0.82	1.35%	1,499%
08.00	397.10 V	2.91 %	0.82	1.36%	1,497%
09.00	397.10 V	2.90 %	0.82	1.36%	1,505%
10.00	398.63 V	3.31 %	0.82	1.36%	1,506%
11.00	398.67 V	3.32 %	0.82	1.38%	1,507%
12.00	398.30 V	2.67 %	0.82	1.37%	1,503%
13.00	394.93 V	2.85 %	0.82	1.35%	1,516%
14.00	395.60 V	3.13 %	0.83	1.36%	1,500%
15.00	397.73 V	3.22 %	0.82	1.37%	1,494%
16.00	398.03 V	3.24%	0.82	1.36%	1,503%
Rata-rata	397.71 V	3.04%	0.82	1,36%	1,503 %



Gambar 9 Hasil Evaluasi motor distribusi 4

Sumber: Dokumentasi Pribadi.2026

Hasil pengolahan data menggunakan metode *fuzzy decision making* pada motor distribusi 4 menunjukkan fluktuasi performa yang dinamis selama tiga hari pengamatan. Pada hari pertama dan ketiga,

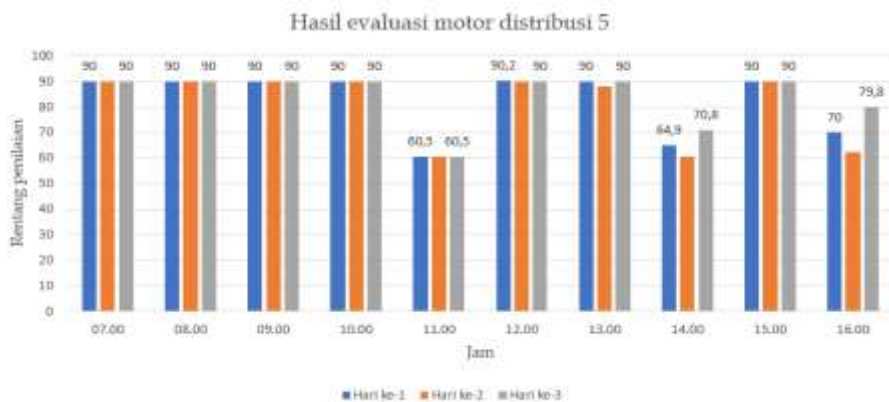
motor berada dalam kondisi optimal, stabil di kategori baik atau normal dengan nilai evaluasi konsisten di angka 90 sepanjang waktu pengamatan. Meskipun parameter faktor daya sempat berada di bawah standar pada hari pertama dan tetap memerlukan pemantauan bersama parameter tegangan pada hari ketiga untuk mencegah gangguan lanjutan, hal tersebut tidak memengaruhi kinerja sistem secara signifikan. Sebaliknya, hari kedua diwarnai fluktuasi nilai di mana kondisi normal (nilai 90) hanya bertahan pada pukul 07.00–10.00, 12.00, dan 15.00, sementara pada pukul 11.00, 13.00, 14.00, dan 16.00 performanya merosot ke rentang 60,5–65,5 akibat parameter faktor daya dan tegangan yang melebihi batas. Penurunan pada jam-jam tertentu ini menyebabkan nilai rata-rata harian hari kedua turun menjadi 78,7, sehingga masuk dalam kategori sedang atau perlu monitoring, sebelum akhirnya gangguan sementara tersebut berhasil teratasi dan sistem kembali beroperasi dengan baik pada hari ketiga.

c. Evaluasi Motor Distribusi 5

Tabel 12 Input Evaluasi Motor Distribusi 5

Motor Distribusi 5					
Jam	Input Evaluasi				
	Tegangan	Ketidakeimbangan arus	Faktor daya	Harmonisa	Rugi daya stator
Hari ke-1					
07.00	395.97 V	2.45%	0.83	1,35%	2,134%
08.00	396.67 V	2.57%	0.83	1,36%	2,149%
09.00	397.27 V	2.68%	0.84	1,37%	2,139%
10.00	397.63 V	2.79%	0.84	1,38%	2,141%
11.00	400.20 V	2.61%	0.84	1,39%	2,129%
12.00	396.00 V	2.81%	0.84	1,38%	2,147%
13.00	398.73 V	2.66%	0.84	1,36%	2,144%
14.00	399.73 V	3.10%	0.84	1,37%	2,143%
15.00	397.27 V	3.00%	0.84	1,38%	2,155%
16.00	399.50 V	2.97%	0.84	1,38%	2,129%
Rata-rata	397.90 V	2.76%	0.83	1,37%	2,141 %
Hari ke-2					
07.00	396.20 V	2.46%	0.83	1,36%	2,131%
08.00	396.90 V	2.57%	0.83	1,37%	2,151%
09.00	397.53 V	2.68%	0.84	1,38%	2,131%
10.00	397.97 V	2.82%	0.84	1,39%	2,133%
11.00	400.40 V	2.64%	0.84	1,40%	2,127%
12.00	396.30 V	2.83%	0.84	1,39%	2,159%
13.00	399.03 V	2.68%	0.84	1,37%	2,135%
14.00	400.00 V	3.09%	0.84	1,38%	2,135%
15.00	397.63 V	2.90%	0.84	1,39%	2,152%
16.00	399.87 V	2.89%	0.84	1,39%	2,121%
Rata-rata	398.18 V	2.76%	0.84	1,38%	2,137 %
Hari ke-3					

Motor Distribusi 5					
Jam	Input Evaluasi				
	Tegangan	Ketidakseimbangan arus	Faktor daya	Harmonisa	Rugi daya stator
07.00	395.80	2.43%	0.83	1,34%	2,142%
08.00	396.50	2.53%	0.83	1,35%	2,156%
09.00	397.10	2.65%	0.84	1,36%	2,146%
10.00	397.57	2.76%	0.84	1,37%	2,151%
11.00	400.00	2.56%	0.84	1,38%	2,139%
12.00	395.67	2.79%	0.84	1,37%	2,192%
13.00	398.47	2.65%	0.84	1,35%	2,155%
14.00	399.47	3.09%	0.84	1,36%	2,154%
15.00	396.97	2.85%	0.84	1,37%	2,173%
16.00	399.20	2.88%	0.84	1,37%	2,141%
Rata-rata	397.68V	2.72%	0.84	1,36%	2,154 %



Gambar 10 Hasil Evaluasi motor distribusi 5

Sumber: Dokumentasi Pribadi. 2026

Berdasarkan hasil pengolahan data menggunakan metode fuzzy decision making, kondisi motor distribusi 5 selama tiga hari pengamatan secara umum berada dalam kategori baik atau normal dengan nilai rata-rata harian yang stabil, yaitu masing-masing sebesar 82,56 pada hari pertama, 81,17 pada hari kedua, dan mengalami perbaikan menjadi 84,11 pada hari ketiga. Pada ketiga hari tersebut, motor konsisten menunjukkan kinerja optimal dengan nilai sekitar 90 pada sebagian besar waktu pengamatan. Namun, fluktuasi penurunan nilai ke kategori sedang atau perlu monitoring selalu terjadi di jam-jam tertentu akibat parameter faktor daya dan tegangan yang tidak stabil atau melebihi batas standar. Pola penurunan ini konsisten terjadi setiap pukul 11.00 dengan nilai merosot ke angka 60,5, serta pada sore hari pukul 14.00 dan 16.00 dengan rentang nilai bervariasi (64,9–70,8 pada pukul 14.00 dan 62,5–79,8 pada pukul 16.00), ditambah penurunan tipis menjadi 88,2 pada pukul 13.00 di hari kedua yang uniknya masih masuk kategori baik. Meskipun sistem secara keseluruhan dinilai cukup stabil, monitoring intensif pada waktu-waktu kritis tersebut tetap diperlukan karena kendala parameter yang belum sepenuhnya stabil.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan mengenai evaluasi sistem distribusi listrik berbasis parameter kualitas daya dan rugi daya motor menggunakan metode *Fuzzy Decision Making* dapat disimpulkan bahwa :

1. Kualitas daya listrik berada dalam kondisi yang baik. Parameter tegangan motor distribusi 1, motor distribusi 4 dan motor distribusi 5 menunjukkan kondisi tegangan lebih (*overvoltage*) berkisar antara 3,68% hingga 5,55%, di bawah batas toleransi +5% SPLN 1:1995 pada sebagian waktu operasional saat jam 11.00-13.00 tegangan melewati batas 5%-5,55%. Harmonisa tegangan pada seluruh motor berkisar antara 1,34% hingga 1,44% jauh di bawah batas standar IEEE 519-1992 Ketidakseimbangan arus pada ketiga motor berada pada rentang 2,00% hingga 3,32%, masih di bawah batas toleransi IEC 60038 sebesar 5%. Faktor daya pada semua motor rata-rata berkisar antara 0,823 hingga 0,847, yang sebagian besar berada di bawah standar minimum SPLN D3.004-1:2010 sehingga perlu mendapat perhatian khusus untuk perbaikan efisiensi sistem.
2. Nilai rugi-rugi tembaga stator (*stator copper losses*) berada dalam kategori yang sangat baik standar IEC 60034-30-1. Motor Distribusi 1 (160 kW) menghasilkan rugi daya stator rata-rata sebesar 3,28 kW dengan persentase rugi daya rata-rata 2,14%, Motor Distribusi 4 (132 kW) sebesar 1,59 kW dengan persentase rata-rata 1,50%, dan Motor Distribusi 5 (160 kW) sebesar 3,33 kW dengan persentase rata-rata 2,14%. Seluruh nilai persentase rugi daya stator ini masih jauh di bawah batas maksimum kelas IE1 sebesar 5,6%, yang menunjukkan bahwa ketiga motor beroperasi secara efisien dan kondisi belitan stator dalam keadaan baik.
3. Penerapan metode *Fuzzy Decision Making* (FDM) terbukti efektif dalam mengevaluasi kondisi sistem distribusi listrik IPAM. Sistem inferensi fuzzy Mamdani yang dikembangkan dengan 48 aturan IF-THEN berhasil mengintegrasikan lima parameter input menjadi satu indeks kondisi tunggal. Untuk motor distribusi 1 mendapatkan penilaian harian hari ke-1 diangka 88,7, hari ke-2 78,7 dan hari ke 3 80,3 dapat diambil simpulan bahwa motor distribusi 1 perlu adanya monitoring rutin di jam jam tertentu. Untuk motor distribusi 2 mendapatkan penilaian harian hari ke-1 diangka 90, hari ke-2 78.7 dan hari ke 3 90 dapat diambil simpulan bahwa motor distribusi 4 perlu adanya monitoring rutin di jam jam tertentu dikarenakan belum stabilnya nilai dari parameter yang diambil.pada motor distribusi 5 mendapatkan penilaian harian hari ke-1 diangka 82.56, hari ke-2 81.17 dan hari ke 3 84.11 dapat diambil Kesimpulan bahwa motor distribusi 5 beroperasi dengan kategori baik atau normal.

DAFTAR PUSTAKA

- Afrane, S., Ampah, J. D., Abdul Yusuf, A., Mensah, E. A., Oti, J. B., Asante, D., & Dankwa, D. A. (2021). Prioritizing Renewable Energy Sources for Electrification in Ghana: A Decision Support Framework Using Fuzzy Theory. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3941689>
- Bardyk, E. I., & Bolotnyi, N. P. (2023). Development of fuzzy classifier for technical condition ranking of power transformer. *Electrical Engineering & Electromechanics*, (5), 3–13. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2023.5.01>
- Beniwal, R. K., Saini, M. K., Nayyar, A., Qureshi, B., & Aggarwal, A. (2021). A Critical Analysis of Methodologies for Detection and Classification of Power Quality Events in Smart Grid. *IEEE Access*, 9, 83507–83534. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3087016>

- Blazakis, K. V., Kapetanakis, T. N., & Stavrakakis, G. S. (2020). Effective Electricity Theft Detection in Power Distribution Grids Using an Adaptive Neuro Fuzzy Inference System. *Energies*, *13*(12), 3110. <https://doi.org/10.3390/en13123110>
- Bonilla, A. R., & Le, H. T. (2024). Analysis and Mitigation of Harmonics for a Wastewater Treatment Plant Electrical System. *WSEAS TRANSACTIONS ON CIRCUITS AND SYSTEMS*, *23*, 1–13. <https://doi.org/10.37394/23201.2024.23.1>
- Bucho, L. F. D., Fernandes, J. F. P., Costa Branco, P. J., Biasion, M., Vaschetto, S., & Cavagnino, A. (2022). Losses Analysis of Induction Motors under Ambient and Cryogenic Conditions. *2022 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 01–07. <https://doi.org/10.1109/ECCE50734.2022.9947595>
- Chawda, G. S., Shaik, A. G., Shaik, M., Padmanaban, S., Holm-Nielsen, J. B., Mahela, O. P., & Kaliannan, P. (2020). Comprehensive Review on Detection and Classification of Power Quality Disturbances in Utility Grid With Renewable Energy Penetration. *IEEE Access*, *8*, 146807–146830. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3014732>
- Fadli, R. N., Solichan, A., & Muntasiroh, L. (n.d.). *Analisis Kualitas Daya Listrik Pada Transformator Distribusi 2.000 KVA Trafoindo Prima Perkasa Universitas Muhammadiyah Semarang*.
- Jiekang, W., Zhijiang, W., Xiaoming, M., Fan, W., Huiling, T., & Lingming, C. (2020). Risk early warning method for distribution system with sources-networks-loads-vehicles based on fuzzy C-mean clustering. *Electric Power Systems Research*, *180*, 106059. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.106059>
- Khalghani, S., Aarniovuori, L., & Pyrhönen, J. (2022). Evaluation of 5 kW Converter-Fed Induction Motor Losses by Analytical Calculation. *2022 29th International Workshop on Electric Drives: Advances in Power Electronics for Electric Drives (IWED)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/IWED54598.2022.9722576>
- Kisworo, D., Utomo, A. P., Saputra, Y. A., & Stefanie, A. (n.d.). *ANALISIS RUGI-RUGI DAYA PADA PENYULANG SUKAMULYA DI PT PLN (PERSERO) UP3 PURWAKARTA DENGAN MENGGUNAKAN SOFTWARE ETAP*. *7*(1).
- Musthopa, Harsanto, B., & Yunani, A. (2023). Electric power distribution maintenance model for industrial customers: Total productive maintenance (TPM), reliability-centered maintenance (RCM), and four-discipline execution (4DX) approach. *Energy Reports*, *10*, 3186–3196. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.09.129>
- Ogundola, I. P., & Boyejo, A. D. (2024). Power Distribution Network and Production Chain Analysis in an Industrial Company. *International Journal of Energy and Environmental Research*, *12*(2), 83–89. <https://doi.org/10.37745/ijeer.13/vol12n28389>
- Paci, A., Bualoti, R., & Çelo, M. (2021). Evaluation of Distribution System Reliability Indices Using Fuzzy Reasoning Approach. *European Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, *5*(3), 1–8. <https://doi.org/10.24018/ejece.2021.5.3.264>
- Pérez-Briceño, C., Ponce, P., Mei, Q., & Fayek, A. R. (2025). A Type-2 Fuzzy Logic Expert System for AI Selection in Solar Photovoltaic Applications Based on Data and Literature-Driven Decision Framework. *Processes*, *13*(5), 1524. <https://doi.org/10.3390/pr13051524>
- Raza Abbasi, K., Hussain, K., Abbas, J., Fatai Adedoyin, F., Ahmed Shaikh, P., Yousaf, H., Muhammad, F., (2021). Analyzing the role of industrial sector's electricity consumption, prices, and GDP: A

- modified empirical evidence from Pakistan. *AIMS Energy*, 9(1), 29–49. <https://doi.org/10.3934/energy.2021003>
- Remigio-Carmona, P., González-de-la-Rosa, J.-J., Florencias-Oliveros, O., Sierra-Fernández, J.-M., Fernández-Morales, J., Espinosa-Gavira, M.-J., Agüera-Pérez, A., & Palomares-Salas, J.-C. (2022). Current Status and Future Trends of Power Quality Analysis. *Energies*, 15(7), 2328. <https://doi.org/10.3390/en15072328>
- Saleem, A., Ilkhombek Khosiljonovich, K., Mashkhurakhon Mutalibjon Qizi, K., Sokhib, K., MirzohidShakhobiddin Ugli, S., & Sokhibjon Obidovich, S. (2023). Estimation of powerquality in distribution system using fuzzy logic theory. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 32(3), 1236. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v32.i3.pp1236-1245>
- Seppälä, J., & Järventausta, P. (2024). Analyzing Supply Reliability Incentive in Pricing Regulation of Electricity Distribution Operators. *Energies*, 17(6), 1451. <https://doi.org/10.3390/en17061451>
- Skoczko, I. (2025). Energy Efficiency Analysis of Water Treatment Plants: Current Status and Future Trends. *Energies*, 18(5), 1086. <https://doi.org/10.3390/en18051086>
- Wengerkievicz, C. A. C., Batistela, N. J., Sadowski, N., Huguet, T., & Lefèvre, Y. (2022). Experimental Loss Segregation in a Solid Rotor Induction Motor. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, 21(4), 584–597. <https://doi.org/10.1590/2179-10742022v21i4268098>
- Wu, H., & Xu, Z. (2020). Fuzzy Logic in Decision Support: Methods, Applications and Future Trends. *INTERNATIONAL JOURNAL OF COMPUTERS COMMUNICATIONS & CONTROL*, 16(1). <https://doi.org/10.15837/ijccc.2021.1.4044>