

Pengembangan Model Ketahanan Jaringan Distribusi Listrik Menggunakan Pendekatan *Fuzzy Logic*

¹Ilham Thamrin Wasistha, ²Ruslan L, ³Ashar AR
^{1,2,3}Politeknik Negeri Ujung Pandang, Makassar, Indonesia
ilhammthamrinn226@gmail.com

Submit : 03 Agust 26 | **Diterima** : 25 Agust 2026 | **Terbit** : 28 Agust 2026

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan mengembangkan model penilaian ketahanan relatif jaringan distribusi listrik dengan mengintegrasikan System Average Interruption Duration Index (SAIDI) dan System Average Interruption Frequency Index (SAIFI) menggunakan Fuzzy Logic tipe Mamdani. Penelitian dilakukan pada jaringan distribusi tegangan menengah 20 kV PT PLN (Persero) UP3 Palopo berdasarkan data gangguan periode 2023 sampai 2025. Dari 13.626 data gangguan valid, diperoleh 3.846 gangguan berkelanjutan dengan durasi lebih dari lima menit yang dikelompokkan menjadi 53 kombinasi Unit Layanan Pelanggan dan penyulang. Model menggunakan SAIDI dan SAIFI sebagai variabel masukan serta Indeks Ketahanan Jaringan sebagai variabel keluaran. Pemodelan dilakukan melalui proses fuzzifikasi, penyusunan 25 aturan fuzzy, inferensi MIN-MAX, dan defuzzifikasi centroid. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai Indeks Ketahanan Jaringan berada pada rentang 10,561 sampai 89,439. Penyulang Pongtiku dan Rantepao pada ULP Rantepao serta Penyulang Makale pada ULP Makale menjadi prioritas evaluasi awal. Validasi internal menunjukkan bahwa peningkatan SAIDI dan SAIFI cenderung menurunkan nilai Indeks Ketahanan Jaringan. Dengan demikian, model dapat digunakan sebagai informasi awal untuk mengklasifikasikan dan memeringkatkan kondisi relatif penyulang, tetapi hasilnya tetap perlu dilengkapi dengan pemeriksaan teknis dan kondisi lapangan.

Kata Kunci: Jaringan distribusi listrik, ketahanan jaringan, SAIDI, SAIFI, Fuzzy Logic Mamdani.

PENDAHULUAN

Evaluasi jaringan distribusi umumnya dilakukan menggunakan indeks keandalan, terutama System Average Interruption Duration Index (SAIDI) dan System Average Interruption Frequency Index (SAIFI). SAIDI menggambarkan rata-rata durasi pemadaman yang dialami pelanggan, sedangkan SAIFI menggambarkan rata-rata frekuensi pemadaman dalam suatu periode. Kedua indeks tersebut telah digunakan secara luas untuk mengevaluasi kinerja keandalan jaringan distribusi (IEEE, 2012). Meskipun demikian, penyajian SAIDI dan SAIFI secara terpisah belum menghasilkan satu nilai evaluasi yang dapat digunakan untuk menggambarkan dan membandingkan kondisi relatif antarpenyulang secara langsung.

Selain aspek keandalan, evaluasi sistem tenaga juga perlu mempertimbangkan konsep ketahanan atau resilience. Ketahanan sistem tenaga berkaitan dengan kemampuan sistem untuk mengantisipasi, menyerap, beradaptasi, serta memulihkan pelayanan setelah terjadi gangguan berdampak besar (Panteli & Mancarella, 2015). Penilaian ketahanan tidak hanya mempertimbangkan frekuensi dan durasi gangguan, tetapi juga mencakup tingkat penurunan kinerja, kemampuan respons, serta proses pemulihan sistem (Panteli et al., 2017). Oleh karena itu, SAIDI dan SAIFI belum dapat merepresentasikan seluruh dimensi ketahanan jaringan, tetapi dapat digunakan untuk membentuk indikator ketahanan relatif berbasis kinerja keandalan.

Data gangguan jaringan distribusi memiliki karakteristik yang beragam karena setiap penyulang mempunyai kondisi jaringan, wilayah pelayanan, lingkungan operasi, jumlah pelanggan terdampak, frekuensi gangguan, dan durasi pemadaman yang berbeda. Perbedaan tersebut menyebabkan batas kondisi rendah, sedang, dan tinggi tidak selalu dapat ditentukan secara tegas. Pendekatan Fuzzy Logic dapat digunakan untuk merepresentasikan kondisi yang bersifat tidak pasti dan memiliki batas antarkategori yang tidak tegas. Penerapan fuzzy pada sistem distribusi telah digunakan untuk membantu evaluasi keandalan dan mengakomodasi ketidakpastian data teknis maupun lingkungan (Paci et al., 2021; Shokrollahi et al., 2017).

PT PLN (Persero) UP3 Palopo memiliki wilayah pelayanan dengan karakteristik geografis dan kondisi jaringan yang beragam. Berdasarkan hasil pengolahan data gangguan periode 2023–2025, diperoleh 13.626 data valid pada tujuh Unit Layanan Pelanggan. Setelah diterapkan kriteria gangguan berkelanjutan dengan durasi lebih dari lima menit, diperoleh 3.846 kejadian 2 yang digunakan dalam analisis. Data tersebut menunjukkan adanya variasi jumlah gangguan, pelanggan terdampak, durasi pemadaman, serta kontribusi SAIDI dan SAIFI antarpemadaman. Kondisi tersebut menunjukkan perlunya suatu model yang dapat menggabungkan kedua indikator menjadi satu nilai evaluasi untuk membandingkan kondisi relatif antarpemadaman.

Dalam penelitian ini, denominator yang digunakan adalah jumlah pelanggan ULP pada periode kejadian. Oleh karena itu, nilai setiap kombinasi ULP–pemadaman diinterpretasikan sebagai kontribusi pemadaman terhadap SAIDI dan SAIFI ULP, bukan sebagai indeks murni pemadaman. Rata-rata tahunan kontribusi periode 2023–2025 selanjutnya digunakan sebagai Input model Fuzzy Logic tipe Mamdani. Model yang dikembangkan menggunakan dua variabel Input berupa kontribusi rata-rata tahunan SAIDI dan SAIFI serta satu variabel output berupa Indeks Ketahanan Jaringan pada rentang 0–100. Nilai indeks tersebut digunakan untuk menghasilkan kategori dan pemeringkatan kondisi relatif dari 53 kombinasi ULP–pemadaman yang teridentifikasi. Indeks yang dihasilkan merupakan indikator ketahanan relatif berbasis frekuensi dan durasi pemadaman, sehingga tidak dimaksudkan untuk menggantikan analisis teknis lapangan atau merepresentasikan seluruh dimensi ketahanan jaringan.

TINJAUAN PUSTAKA

Jaringan Distribusi Tenaga Listrik

Jaringan distribusi tenaga listrik merupakan bagian akhir dari sistem tenaga yang menyalurkan energi listrik dari gardu induk menuju konsumen. Kinerja jaringan distribusi dipengaruhi oleh struktur jaringan, konfigurasi pemadaman, kondisi peralatan, dan gangguan yang terjadi selama proses penyaluran. Oleh karena itu, pemahaman mengenai pengertian, struktur, dan bentuk gangguan pada jaringan distribusi diperlukan sebagai dasar untuk menganalisis keandalan serta ketahanan jaringan dalam penelitian ini (Gönen, 2014; Short, 2014). 2.1.1 Pengertian Jaringan Distribusi Jaringan distribusi tenaga listrik merupakan bagian dari sistem tenaga listrik yang berfungsi menyalurkan energi listrik dari gardu induk ke konsumen akhir. Jaringan distribusi berperan penting dalam menjaga kontinuitas dan kualitas penyaluran energi listrik karena berhubungan langsung dengan pelanggan (Gönen, 2014). 2.1.2 Struktur Jaringan Distribusi Struktur jaringan distribusi terdiri atas jaringan distribusi primer dan jaringan distribusi sekunder. Jaringan distribusi primer menyalurkan tenaga listrik dari gardu induk ke gardu distribusi, sedangkan jaringan distribusi sekunder menyalurkan tenaga listrik dari gardu distribusi ke konsumen. Struktur jaringan yang baik sangat memengaruhi keandalan dan efisiensi sistem distribusi (Gönen, 2014; Short, 2014).

Karakteristik Jaringan Distribusi Tenaga Listrik

Jaringan distribusi tegangan menengah (JTM) merupakan bagian penting dalam sistem distribusi tenaga listrik yang berfungsi menyalurkan daya dari gardu induk ke gardu distribusi sebelum disalurkan ke konsumen melalui jaringan tegangan rendah. Pada sistem distribusi di Indonesia, jaringan tegangan menengah umumnya beroperasi pada level tegangan 20 kV dengan konfigurasi radial yang luas dan tersebar. Karakteristik ini menyebabkan jaringan distribusi tegangan menengah memiliki tingkat kerentanan yang relatif tinggi terhadap gangguan, baik yang berasal dari faktor lingkungan seperti cuaca ekstrem dan vegetasi, maupun faktor operasional seperti kegagalan peralatan dan sistem proteksi. Dalam beberapa tahun terakhir, perhatian terhadap kinerja jaringan distribusi tidak hanya difokuskan pada aspek keandalan (reliability), tetapi juga pada ketahanan sistem (resilience) dalam menghadapi gangguan dan memulihkan pelayanan. Panteli dan Mancarella (2015) menjelaskan bahwa ketahanan sistem tenaga mencakup kemampuan untuk mengantisipasi, menyerap, beradaptasi, dan pulih dari gangguan berdampak besar. Selanjutnya, Panteli et al. (2017) mengembangkan kerangka serta metrik untuk mengukur ketahanan operasional dan ketahanan infrastruktur sistem tenaga.

Konsep Dasar Fuzzy Logic

Fuzzy Logic digunakan untuk merepresentasikan kondisi yang tidak memiliki batas tegas melalui derajat keanggotaan pada rentang 0 sampai 1. Dalam penelitian ini, pendekatan tersebut memungkinkan nilai SAIDI dan SAIFI diolah melalui fungsi keanggotaan dan aturan linguistik untuk menghasilkan Indeks Ketahanan Jaringan. Oleh karena itu, pembahasan mengenai pengertian Fuzzy Logic, fungsi keanggotaan, aturan fuzzy, serta tahapan inferensi dan defuzzifikasi menjadi dasar konseptual dalam perancangan model Mamdani (Klir & Yuan, 1995; Mamdani & Assilian, 1975; Ross, 2010; Zadeh, 1965). 2.6.1 Pengertian Fuzzy Logic Fuzzy Logic merupakan pendekatan logika yang digunakan untuk merepresentasikan ketidakpastian dan kondisi yang tidak memiliki batas tegas. Konsep himpunan fuzzy pertama kali diperkenalkan oleh Zadeh (1965) dengan menggunakan derajat keanggotaan pada rentang 0 sampai 1. Berbeda dengan logika tegas yang hanya mengenal nilai benar atau salah, logika fuzzy memungkinkan suatu nilai memiliki tingkat keanggotaan tertentu dalam suatu himpunan.

Penerapan Fuzzy Logic pada Sistem Tenaga Listrik Fuzzy Logic telah diterapkan dalam perencanaan dan evaluasi keandalan sistem distribusi karena mampu mengolah data yang tidak pasti serta penilaian berbasis pengalaman teknis. Lang dan Pahwa (2000) menggunakan pendekatan berbasis pengetahuan fuzzy untuk mendukung perencanaan keandalan sistem distribusi. Shokrollahi et al. (2017) menerapkan logika fuzzy untuk memodelkan ketidakpastian kondisi transformator, saluran, dan faktor lingkungan dalam penilaian keandalan jaringan distribusi. Kavousifard dan Samet (2011) mengembangkan pendekatan berbasis Radial Basis Function Network dan logika fuzzy untuk mengurangi pengaruh ketidakpastian dalam perhitungan indeks keandalan sistem tenaga. Selanjutnya, Paci et al. (2021) menggunakan pendekatan Fuzzy Reasoning untuk mengevaluasi indeks keandalan jaringan distribusi berdasarkan sejumlah variabel teknis dan lingkungan.

METODE PENELITIAN

Penelitian Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif terapan dengan pendekatan pemodelan dan studi kasus. Penelitian bertujuan mengembangkan model penilaian ketahanan penyulang jaringan distribusi menggunakan Fuzzy Logic tipe Mamdani berdasarkan nilai SAIDI dan SAIFI. Studi kasus dilakukan pada jaringan distribusi tegangan menengah 20 kV di wilayah kerja PT PLN (Persero) UP3 Palopo dengan menggunakan data gangguan periode tahun 2023–2025.

Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian dilaksanakan pada PT PLN (Persero) UP3 Palopo yang berada di bawah koordinasi PT PLN (Persero) UID Sulselrabar. Data yang digunakan merupakan data operasional jaringan distribusi periode Januari 2023 sampai Desember 2025. Adapun kegiatan pengolahan data, pemodelan, simulasi, analisis, dan penyusunan laporan dilaksanakan pada tahun 2026.

Data dan Sumber Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data sekunder yang diperoleh dari instansi terkait dalam bentuk data gangguan jaringan distribusi tenaga listrik. Data tersebut meliputi frekuensi gangguan dan durasi gangguan pada jaringan distribusi dalam periode waktu tertentu. Data gangguan tersebut selanjutnya digunakan untuk menghitung indeks System Average Interruption Frequency Index (SAIFI) dan System Average 29 Interruption Duration Index (SAIDI) yang berfungsi sebagai parameter Input dalam model penilaian ketahanan jaringan distribusi tenaga listrik menggunakan pendekatan Fuzzy Logic. Selain data gangguan jaringan, penelitian ini juga menggunakan data pendukung berupa literatur, standar, serta hasil penelitian terdahulu yang relevan dengan topik ketahanan jaringan distribusi dan penerapan metode Fuzzy Logic dalam sistem tenaga listrik. Data pendukung tersebut digunakan sebagai dasar dalam penyusunan model, penentuan parameter, serta pembahasan hasil penelitian. Data yang diperoleh berbentuk data berbasis kejadian gangguan. Setiap baris data dapat memuat informasi tahun dan tanggal gangguan, ULP, penyulang, jumlah pelanggan padam, durasi gangguan, jumlah pelanggan total, penyebab gangguan, serta nilai kontribusi SAIDI dan SAIFI. Sebelum digunakan dalam pemodelan, data terlebih dahulu melalui proses seleksi, pembersihan, standardisasi, dan agregasi berdasarkan penyulang dan tahun pengamatan. Nilai SAIDI dan SAIFI pada setiap kejadian gangguan tidak langsung digunakan sebagai satu Input Fuzzy. Data tersebut terlebih dahulu direkap agar diperoleh satu pasangan nilai SAIDI dan SAIFI yang merepresentasikan kondisi masing masing penyulang dalam suatu periode.

3.3.1 Jenis Data Data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari data kuantitatif yang berkaitan dengan kondisi dan kinerja jaringan distribusi tenaga listrik. Data tersebut digunakan sebagai parameter Input dalam model Fuzzy Logic untuk menilai ketahanan jaringan. 30 3.3.2 Sumber Data Sumber data diperoleh dari: a. Data gangguan jaringan distribusi tenaga listrik yang mencakup frekuensi dan durasi gangguan. b. Literatur dan referensi ilmiah yang relevan. c. Penelitian terdahulu yang mendukung analisis ketahanan jaringan.

Parameter Penelitian

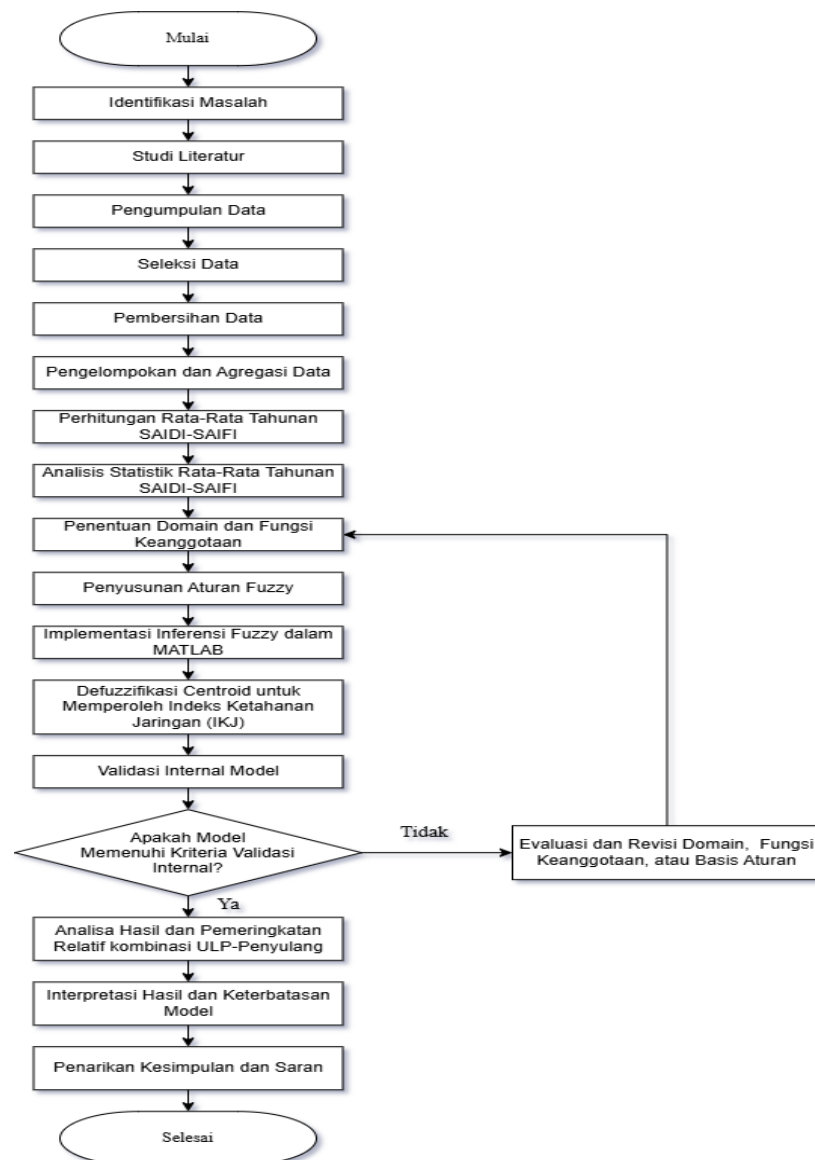
Parameter penelitian merupakan variabel yang digunakan untuk menilai ketahanan jaringan distribusi tenaga listrik. Parameter ini dipilih berdasarkan kajian pustaka dan penelitian terdahulu yang relevan. Parameter-parameter tersebut digunakan sebagai Input pada sistem Fuzzy Logic untuk menghasilkan nilai ketahanan jaringan distribusi. 3.4.1 Parameter Input Parameter Input dalam penelitian ini merupakan variabel yang digunakan sebagai masukan pada sistem Fuzzy Logic. Input model berupa rata-rata tahunan kontribusi SAIDI dan SAIFI ULP periode 2023–2025. Kontribusi setiap kejadian dikelompokkan berdasarkan tahun, ULP, dan penyulang, kemudian dijumlahkan untuk memperoleh nilai tahunan dan dirata-ratakan menjadi satu pasangan Input setiap kombinasi ULP penyulang. Parameter Input tersebut meliputi: 1. System Average Interruption Frequency Index (SAIFI) 2. System Average Interruption Duration Index (SAIDI) 31 Parameter Input ini dinyatakan dalam bentuk nilai numerik yang selanjutnya diubah menjadi nilai linguistik pada tahap fuzzifikasi. 3.4.2 Parameter Output Parameter output dalam penelitian ini berupa Indeks Ketahanan Jaringan dengan rentang nilai 0–100. Nilai output diperoleh melalui proses defuzzifikasi dan diklasifikasikan ke dalam lima kategori, yaitu sangat rendah, rendah, sedang, tinggi, dan sangat tinggi. Semakin tinggi nilai indeks menunjukkan kondisi relatif penyulang yang semakin baik berdasarkan nilai SAIDI dan SAIFI, sedangkan nilai yang semakin rendah menunjukkan kondisi yang memerlukan evaluasi lebih lanjut.

Metode Fuzzy Logic

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah Fuzzy Logic tipe Mamdani. Metode Mamdani dipilih karena merupakan metode yang paling umum digunakan dalam sistem pengambilan keputusan berbasis aturan (rule-based system) serta mudah diimplementasikan dalam penilaian ketahanan jaringan distribusi tenaga listrik. Pendekatan Fuzzy Logic Mamdani memungkinkan pengolahan data yang bersifat tidak pasti dan linguistik, sehingga sesuai untuk merepresentasikan kondisi ketahanan jaringan distribusi yang tidak selalu dapat dinyatakan secara tegas. 3.5.1 Prosedur Pengolahan Data dengan Fuzzy Logic Mamdani Proses pengolahan data dimulai dengan melakukan seleksi data yang termasuk dalam wilayah kerja PT PLN (Persero) UP3 Palopo. Selanjutnya dilakukan pemeriksaan terhadap data kosong, data duplikat, 32 kesalahan format, ketidakkonsistenan nama ULP dan penyulang, serta keseragaman satuan data. Data yang telah dibersihkan kemudian dikelompokkan berdasarkan tahun, ULP, dan penyulang. Untuk setiap kombinasi ULP–penyulang dihitung jumlah kejadian gangguan serta kontribusinya terhadap SAIDI dan SAIFI ULP pada setiap tahun pengamatan. Hasil agregasi tersebut selanjutnya digunakan sebagai dataset utama penelitian. Sebelum dilakukan pemodelan fuzzy, nilai kontribusi SAIDI dan SAIFI dianalisis secara deskriptif untuk mengetahui karakteristik dan rentang data. Nilai minimum dan maksimum digunakan sebagai dasar dalam menentukan domain variabel fuzzy. Variabel Input model terdiri atas kontribusi rata-rata tahunan SAIDI dan SAIFI setiap kombinasi ULP–penyulang, sedangkan variabel output berupa Indeks Ketahanan Jaringan pada rentang 0–100. Masing-masing variabel dibagi menjadi lima himpunan linguistik, yaitu sangat rendah, rendah, sedang, tinggi, dan sangat tinggi. Penentuan interval dilakukan menggunakan metode equal interval berdasarkan rentang nilai minimum dan maksimum data agregasi.

Flowchart Penelitian

Untuk memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai proses penelitian yang akan dilakukan mulai dari tahap awal hingga akhir dapat dilihat pada gambar 1 di bawah ini.



Gambar 1 Flowchart Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Model *Fuzzy Logic* Mamdani yang telah dirancang dan diimplementasikan menggunakan MATLAB selanjutnya digunakan untuk menghitung Indeks Ketahanan Jaringan pada setiap penyulang. Data *Input* yang digunakan berupa nilai rata-rata tahunan kontribusi *SAIDI* dan *SAIFI* setiap kombinasi ULP–penyulang selama periode tahun 2023–2025.

Sebanyak 53 kombinasi ULP dan penyulang digunakan dalam proses pemodelan. Data penyulang yang tidak teridentifikasi tidak disertakan karena tidak dapat digunakan sebagai objek penilaian dan pemeringkatan. Setiap pasangan nilai *SAIDI* dan *SAIFI* dimasukkan ke dalam *Fuzzy Inference System* untuk melalui proses fuzzifikasi, evaluasi basis aturan, agregasi, dan defuzzifikasi menggunakan metode *centroid*.

Hasil pemodelan berupa nilai Indeks Ketahanan Jaringan pada rentang 0–100. Nilai IKJ yang semakin tinggi menunjukkan kondisi relatif penyulang yang semakin baik berdasarkan frekuensi dan durasi pemadaman. Sebaliknya, nilai IKJ yang semakin rendah menunjukkan bahwa penyulang memiliki nilai *SAIDI* dan/atau *SAIFI* yang relatif tinggi sehingga memerlukan evaluasi lebih lanjut.

Hasil pemodelan selanjutnya dianalisis berdasarkan nilai IKJ, kategori ketahanan, distribusi

kategori, serta pemeringkatan penyulang. Analisis tersebut digunakan untuk mengidentifikasi penyulang dengan kondisi ketahanan relatif tinggi dan penyulang yang menjadi prioritas evaluasi.

Hasil Perhitungan Indeks Ketahanan Jaringan

Berdasarkan hasil perhitungan menggunakan model *Fuzzy Mamdani*, seluruh 53 penyulang memperoleh nilai Indeks Ketahanan Jaringan dan kategori ketahanan. Nilai tertinggi yang dihasilkan model adalah sebesar 89,439, sedangkan nilai terendah sebesar 10,561.

Nilai IKJ tertinggi sebesar 89,439 diperoleh secara bersama oleh 30 penyulang. Kesamaan nilai tersebut menunjukkan bahwa kombinasi *SAIDI* dan *SAIFI* pada penyulang-penyulang tersebut berada pada wilayah fungsi keanggotaan yang menghasilkan keluaran *fuzzy* dengan karakteristik agregasi yang sama. Oleh karena itu, penyulang tersebut tidak dapat dinyatakan memiliki perbedaan peringkat ketahanan hanya berdasarkan nilai IKJ yang telah dibulatkan menjadi tiga angka desimal.

Nilai IKJ terendah diperoleh Penyulang Pongtiku pada ULP Rantepao, yaitu sebesar 10,561 dengan kategori Sangat Rendah. Penyulang tersebut memiliki nilai *SAIDI* sebesar 189,450 menit/pelanggan/tahun dan *SAIFI* sebesar 2,411 kali/pelanggan/tahun. Kedua nilai tersebut merupakan nilai tertinggi dalam dataset penelitian sehingga menghasilkan nilai ketahanan yang paling rendah.

Penyulang Rantepao pada ULP Rantepao memperoleh IKJ sebesar 12,156 dan juga termasuk kategori Sangat Rendah. Sementara itu, Penyulang Makale pada ULP Makale memperoleh IKJ sebesar 35,831 dan termasuk kategori Rendah. Ringkasan hasil perhitungan model disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1 Ringkasan Hasil Perhitungan Indeks Ketahanan Jaringan

Hasil	Hasil
Jumlah penyulang yang dianalisis	53 penyulang
Nilai IKJ tertinggi	89,439
Jumlah penyulang dengan IKJ tertinggi yang sama	44 penyulang
Nilai IKJ terendah	10,561
Penyulang dengan IKJ terendah	Pongtiku – ULP Rantepao
Kategori IKJ terendah	Sangat Rendah
Metode defuzzifikasi	<i>Centroid</i>

Nilai IKJ tertinggi tidak mencapai nilai 100 karena keluaran model diperoleh melalui proses defuzzifikasi *centroid*. Metode *centroid* menentukan nilai tegas berdasarkan titik pusat luas daerah hasil agregasi fungsi keanggotaan output. Dengan demikian, aktivasi kategori Sangat Tinggi tidak selalu menghasilkan nilai tepat 100, tetapi menghasilkan nilai tegas yang berada pada wilayah representatif kategori tersebut.

Hasil perhitungan juga menunjukkan bahwa model telah memberikan keluaran yang sesuai dengan hubungan logis antara variabel *Input* dan output.

Penyulang dengan nilai *SAIDI* dan *SAIFI* rendah memperoleh nilai IKJ tinggi. Sebaliknya, penyulang dengan nilai *SAIDI* dan *SAIFI* tinggi memperoleh nilai IKJ rendah. Sebagai contoh, Penyulang Pongtiku pada ULP Makale dengan *SAIDI* 0,100 dan *SAIFI* 0,001 memperoleh IKJ 89,439, sedangkan Penyulang Pongtiku pada ULP Rantepao dengan *SAIDI* 189,450 dan *SAIFI* 2,411 memperoleh IKJ 10,561.

Perbedaan tersebut memperlihatkan bahwa nama penyulang yang sama tidak secara otomatis menunjukkan kondisi ketahanan yang sama. Dalam penelitian ini, setiap unit analisis ditentukan berdasarkan kombinasi ULP dan penyulang sehingga hasil penilaian dipengaruhi oleh nilai *SAIDI* dan *SAIFI* pada masing-masing wilayah pelayanan.

Klasifikasi Tingkat Ketahanan Kombinasi ULP-Penyulang

Nilai Indeks Ketahanan Jaringan yang diperoleh melalui proses defuzzifikasi selanjutnya diklasifikasikan ke dalam lima kategori, yaitu Sangat Rendah, Rendah, Sedang, Tinggi, dan Sangat Tinggi. Klasifikasi dilakukan berdasarkan pembagian domain output IKJ menggunakan metode *equal interval* sebagaimana dijelaskan pada Persamaan (2.4).

Nilai IKJ pada rentang 0–20 dikategorikan sebagai Sangat Rendah, nilai lebih dari 20 sampai 40 dikategorikan sebagai Rendah, nilai lebih dari 40 sampai 60 dikategorikan sebagai Sedang, nilai lebih dari 60 sampai 80 dikategorikan sebagai Tinggi, dan nilai lebih dari 80 sampai 100 dikategorikan sebagai Sangat Tinggi.

Tabel 2 Distribusi Kategori Ketahanan Jaringan

No.	Kategori Ketahanan	Rentang IKJ	Jumlah Penyulang	Persentase
1	Sangat Tinggi	>80–100	44	83,02%
2	Tinggi	>60–80	4	7,55%
3	Sedang	>40–60	2	3,77%
4	Rendah	>20–40	1	1,89%
5	Sangat Rendah	0–20	2	3,77%
	Total		53	100,00%

Berdasarkan Tabel 2 di atas, kategori Sangat Tinggi mendominasi hasil klasifikasi dengan jumlah 44 penyulang. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa sebagian besar penyulang memiliki nilai *SAIDI* dan *SAIFI* yang relatif rendah dibandingkan dengan keseluruhan rentang data penelitian. Kombinasi kedua *Input* tersebut menyebabkan aturan *fuzzy* dengan keluaran Tinggi atau Sangat Tinggi lebih dominan dalam proses inferensi.

Validasi Model Fuzzy Logic

Validasi model dilakukan untuk memastikan bahwa sistem inferensi *Fuzzy Mamdani* yang dikembangkan menghasilkan keluaran yang sesuai dengan hubungan logis antara *SAIDI*, *SAIFI*, dan Indeks Ketahanan Jaringan. Validasi yang dilakukan dalam penelitian ini merupakan validasi internal atau validasi logis model, bukan validasi akurasi prediksi terhadap nilai ketahanan acuan.

Validasi internal dilakukan melalui pemeriksaan konsistensi basis aturan, pengujian skenario *Input*, pemeriksaan nilai pada batas domain, serta analisis sensitivitas perubahan *SAIDI* dan *SAIFI* terhadap nilai IKJ. Model dinyatakan konsisten apabila peningkatan nilai *SAIDI* dan/atau *SAIFI* tidak menyebabkan peningkatan nilai ketahanan. Sebaliknya, nilai *SAIDI* dan *SAIFI* yang lebih rendah seharusnya menghasilkan IKJ yang relatif lebih tinggi.

Pemeriksaan Konsistensi Basis Aturan

Basis aturan model terdiri atas 25 aturan yang berasal dari kombinasi lima himpunan *SAIDI* dan lima himpunan *SAIFI*. Pemeriksaan dilakukan terhadap arah perubahan konsekuen aturan pada setiap baris dan kolom matriks aturan.

Prinsip yang digunakan adalah bahwa *SAIDI* dan *SAIFI* memiliki hubungan berlawanan arah dengan IKJ. Nilai *SAIDI* dan *SAIFI* yang semakin tinggi menunjukkan durasi dan frekuensi pemadaman yang semakin besar sehingga kategori ketahanan seharusnya menurun. Beberapa aturan representatif disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3 Pemeriksaan Konsistensi Aturan Fuzzy

No.	Kategori <i>SAIDI</i>	Kategori <i>SAIFI</i>	Keluaran IKJ	Interpretasi
1	Sangat Rendah	Sangat Rendah	Sangat Tinggi	Durasi dan frekuensi gangguan sangat rendah
2	Sangat Rendah	Sangat Tinggi	Sedang	Frekuensi tinggi menurunkan ketahanan meskipun durasi rendah
3	Sedang	Sedang	Sedang	Kedua <i>Input</i> berada pada kondisi menengah
4	Sangat Tinggi	Sangat Rendah	Sedang	Durasi tinggi menurunkan ketahanan meskipun frekuensi rendah
5	Sangat Tinggi	Sangat Tinggi	Sangat Rendah	Durasi dan frekuensi gangguan

No.	Kategori SAIDI	Kategori SAIFI	Keluaran IKJ	Interpretasi
				sangat tinggi

Berdasarkan Tabel 3 diatas, konsekuen setiap aturan telah mengikuti arah hubungan yang ditetapkan. Kombinasi *Input* Sangat Rendah menghasilkan keluaran Sangat Tinggi, sedangkan kombinasi *Input* Sangat Tinggi menghasilkan keluaran Sangat Rendah.

Tabel 4 Hasil Pengujian Skenario *Input* Model

No.	ULP	Penyulang	SAIDI	SAIFI	IKJ	Kategori
1	Makale	Pongtiku	0,100	0,001	89,439	Sangat Tinggi
2	Masamba	Baebunta	55,840	1,030	70,510	Tinggi
3	Masamba	Malangke	79,477	1,304	55,531	Sedang
4	Makale	Makale	108,386	1,449	35,831	Rendah
5	Rantepao	Pongtiku	189,450	2,411	10,561	Sangat Rendah

Tabel 4 menunjukkan bahwa model mampu menghasilkan kelima kategori ketahanan. Kombinasi SAIDI dan SAIFI yang sangat rendah menghasilkan IKJ sebesar 89,439 atau kategori Sangat Tinggi. Ketika kedua indikator meningkat, nilai IKJ mengalami penurunan hingga mencapai 10,561 pada kombinasi SAIDI dan SAIFI tertinggi.

Pengujian pada Penyulang Pongtiku ULP Makale menunjukkan bahwa nilai *Input* yang mendekati batas bawah domain tetap dapat diproses dan menghasilkan kategori Sangat Tinggi. Sementara itu, Penyulang Pongtiku ULP Rantepao memiliki nilai yang mendekati batas atas domain dan menghasilkan kategori Sangat Rendah.

Dengan demikian, perbaikan domain menjadi 0–190 untuk SAIDI dan 0–2,5 untuk SAIFI telah memastikan seluruh data berada dalam cakupan fungsi keanggotaan. Tidak ditemukan lagi nilai IKJ sebesar 50 yang disebabkan oleh tidak aktifnya aturan akibat *Input* berada di luar domain.

Analisis Sensitivitas Model

Analisis sensitivitas dilakukan untuk mengetahui perubahan nilai IKJ ketika salah satu variabel *Input* dinaikkan sementara variabel lainnya dipertahankan pada nilai tertentu. Pengujian pertama dilakukan dengan mengubah nilai SAIDI dan mempertahankan SAIFI sebesar 1,25. Nilai tersebut dipilih karena berada pada titik representatif kategori Sedang.

Tabel 5 Sensitivitas IKJ Terhadap Perubahan SAIDI

No.	SAIDI	SAIFI Tetap	IKJ	Kategori
1	19	1,25	70,00	Tinggi
2	57	1,25	70,00	Tinggi
3	95	1,25	50,00	Sedang
4	133	1,25	30,00	Rendah
5	171	1,25	10,56	Sangat Rendah

Berdasarkan Tabel 5 diatas, peningkatan SAIDI dari 19 menjadi 171 menghasilkan penurunan IKJ dari sekitar 70 menjadi 10,561. Hasil tersebut menunjukkan bahwa model sensitif terhadap peningkatan durasi pemadaman.

Nilai IKJ pada SAIDI 19 dan 57 menghasilkan kategori yang sama karena kedua kondisi tersebut mengaktifkan aturan dengan konsekuen Tinggi ketika SAIFI berada pada kategori Sedang. Kesamaan nilai tersebut merupakan karakteristik basis aturan *fuzzy* dan tidak menunjukkan ketidakkonsistenan karena peningkatan SAIDI tidak menyebabkan peningkatan IKJ.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengolahan data gangguan, pengembangan model Fuzzy Logic tipe Mamdani, pengujian konsistensi internal, serta analisis kondisi jaringan distribusi PT PLN (Persero) UP3 Palopo selama periode 2023–2025, diperoleh kesimpulan sebagai berikut. 1. Kontribusi rata-rata tahunan SAIDI dan SAIFI pada setiap kombinasi ULP penyulang menunjukkan kondisi yang bervariasi. Kontribusi tertinggi terdapat pada Penyulang Pongtiku dan Penyulang Rantepao di ULP

Rantepao, yang menunjukkan bahwa kedua penyulang tersebut memberikan kontribusi relatif terbesar terhadap frekuensi dan durasi pemadaman pada ULP. 2. Model Fuzzy Logic tipe Mamdani berhasil dikembangkan menggunakan kontribusi SAIDI dan SAIFI sebagai Input serta Indeks Ketahanan Jaringan sebagai output. Validasi internal menunjukkan bahwa model bekerja secara konsisten, yaitu peningkatan SAIDI dan/atau SAIFI menghasilkan nilai IKJ yang menurun atau tetap. 3. Pemodelan terhadap 53 kombinasi ULP–penyulang menghasilkan nilai IKJ antara 10,561–89,439 dan mencakup lima kategori ketahanan. Sebagian besar kombinasi berada pada kategori Sangat Tinggi, sedangkan nilai IKJ terendah diperoleh Penyulang Pongtiku dan Penyulang Rantepao di ULP Rantepao, disusul Penyulang Makale di ULP Makale. Ketiga penyulang tersebut menjadi prioritas evaluasi awal berdasarkan indikator yang digunakan

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Politeknik Negeri Ujung Pandang yang sudah memberikan motivasi terhadap kami dan terima kasih kepada keluarga kami yang paling kami sayangi.

REFERENSI

- Asrul, A. (2025). Pengaruh Kebijakan Manajemen Teknologi Terhadap Inovasi Produk Di Industri Kreatif. *Portal Riset Dan Inovasi Sistem Perangkat Lunak*, 3(1), 21–27. <https://doi.org/10.59696/prinsip.v3i1.78>
- Asrul, A., Putra, A. ., & Rajab, M. . (2025). Transpormasi Bisnis Di Era Digital: Peluang, Tantangan, Dan Strategi Inovasi. *Jurnal Minfo Polgan*, 13(2), 2294-2298.
- Aprialdi, R., & Aini, Z. (2023). Analysis of the reliability of electrical distribution systems using the technical section method and RNEA repeat GIBP-MESIR. *Jurnal Edukasi Elektro*, 7(2), 133–145. doi: 10.21831/jee.v7i2.63118.
- Gönen, T. (2014). *Electric power distribution engineering* (3rd ed.). CRC Press.
- Prasetya, A. M., Sartika, L., & others. (2024). Evaluation of 20 KV Distribution System Using SAIDI and SAIFI Reliability Indices at PT PLN. *Emitor: Jurnal Teknik Elektro*, 115–120.
- Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2012). *IEEE guide for electric power distribution reliability indices* (IEEE Std 1366-2012). IEEE.
- Kavousifard, A., & Samet, H. (2011). Consideration effect of uncertainty in power system reliability indices using radial basis function network and fuzzy logic theory. *Neurocomputing*, 10.1016/j.neucom.2011.05.017. 74(17), 3420–3427. doi: 10.1016/j.neucom.2011.05.017.
- Klir, G. J., & Yuan, B. (1995). *Fuzzy sets and fuzzy logic: Theory and applications*. Prentice Hall.
- Lang, B. P., & Pahwa, A. (2000). Power distribution system reliability planning using a fuzzy knowledge-based approach. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 15(1), 279–284. doi: 10.1109/61.847263.
- Mamdani, E. H., & Assilian, S. (1975). An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International Journal of Man-Machine Studies*, 7(1), 1–13. doi: 10.1016/S0020-7373(75)80002-2.
- 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. doi: 10.24018/ejece.2021.5.3.264.
- Panteli, M., & Mancarella, P. (2015). The grid: Stronger, bigger, smarter? Presenting a conceptual framework of power system resilience. *IEEE Power & Energy Magazine*, 13(3), 58–66. doi: 10.1109/MPE.2015.2397334.
- Panteli, M., Mancarella, P., Trakas, D. N., Kyriakides, E., & Hatziargyriou, N. D. (2017). Metrics and quantification of operational and infrastructure resilience in power systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 32(6), 4732–4742. doi: 10.1109/TPWRS.2017.2664141.
- Prasetya, A. M., Sartika, L., & Muslim, A. A. H. (2024). Evaluation of 20 KV distribution system using SAIDI and SAIFI reliability indices at PT PLN. *124 Emitor: Jurnal Teknik* 10.23917/emitor.v24i2.2482. *Elektro*, 24(2), 115–120. doi: 10.23917/emitor.v24i2.2482.
- Ross, T. J. (2010). *Fuzzy logic with engineering applications* (3rd ed.). John Wiley & Sons. doi: 10.1002/9781119994374.
- Sadiq, E. H., & Antar, R. K. (2025). Reliability improvement of distribution networks: A case study of Duhok distribution network. *EMITTER International Journal of Engineering Technology*, 13(1), 73–92. doi: 10.24003/emitter.v13i1.908.

-
- Saftian, H., Fajri, M., & Suprijadi, S. (2025). Fuzzy Logic Approach for Prediction of Health Index of Feeder Cable Based on Partial Discharge Parameter. *Eduvest-Journal of Universal Studies*, 5(1), 611–627.
- Short, T. A. (2014). *Electric power distribution handbook* (2nd ed.). CRC Press.
- Shokrollahi, A., Sangrody, H., Motaleb, M., Rezaeiahari, M., Foruzan, E., & Hassanzadeh, F. (2017). Reliability assessment of distribution system using fuzzy logic for modelling of transformer and line uncertainties. In *2017 North American Power Symposium*. IEEE. doi: 10.1109/NAPS.2017.8107257.
- Ummara, A., & Suprawikno. (2025). Optimasi penempatan recloser jaringan distribusi menggunakan metode section technique dan algoritma Grey Wolf Optimizer. *Jurnal Informatika dan Rekayasa Elektronik*, 8(2), 274–282. doi: 10.36595/jire.v8i2.1703.
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3), 338–353. doi: 10.1016/S0019-9958(65)90241-X.