

© Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknologi Informasi
Karya ini berada di bawah Lisensi Creative Commons Atribusi-BerbagiSerupa 4.0 Internasional
Terjemahan dari DOI: 10.22146/jnteti.v13i4.12510

Analisis Keandalan Sistem Distribusi Tenaga Listrik 20 kV pada Penyulang CWRU

Tasma Sucita¹, Maman Somantri¹, Diki Fahrizal¹, Mia Agista¹

¹ Program Studi Pendidikan Teknik Elektro, Fakultas Pendidikan Teknik dan Industri, Universitas Pendidikan Indonesia, Bandung 40154, Indonesia

[Diserahkan: 14 April 2024, Direvisi: 14 September 2024, Diterima: 19 November 2024]

Penulis Korespondensi: Tasma Sucita (email: tasmascucita@upi.edu)

INTISARI — Permintaan listrik yang terus meningkat seiring dengan pertumbuhan populasi menjadikan distribusi energi listrik yang andal kepada konsumen sebagai aspek yang sangat penting. Penelitian ini menganalisis keandalan sistem distribusi tenaga listrik 20 kV pada penyulang CWRU di Unit Layanan Pelanggan (ULP) Pelabuhan Ratu, Area Surade, Perusahaan Listrik Negara (PT PLN (Persero)). Tujuan utama penelitian ini adalah untuk menganalisis indeks keandalan utama, seperti *system average interruption frequency index* (SAIFI), *system average interruption duration index* (SAIDI), *customer average interruption duration index* (CAIDI), *average service availability index* (ASAI), dan *average service unavailability index* (ASUI), serta mengkaji dampak ekonomi yang ditimbulkan oleh gangguan listrik terhadap konsumen. Metodologi penelitian yang dilakukan mencakup pengumpulan dan analisis data lapangan dari penyulang CWRU di PT PLN (Persero) ULP Pelabuhan Ratu, dengan menggunakan perhitungan keandalan kuantitatif dan observasi kualitatif untuk mengidentifikasi faktor internal dan eksternal yang memengaruhi keandalan sistem. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai SAIFI mencapai 52,077 kali/pelanggan/tahun, sedangkan nilai SAIDI adalah 99,400 jam/pelanggan/tahun. Berdasarkan Standar PLN (SPLN) 68-2:1986, sistem ini diklasifikasikan sebagai tidak andal. Namun, nilai CAIDI sebesar 1,813 jam per kali per tahun menunjukkan bahwa waktu respons sistem masih berada dalam batas yang dapat diterima. Ketersediaan listrik, dengan ASAI sebesar 99,828% dan ASUI sebesar 0,172%, dianggap memadai. Gangguan akibat faktor internal menyumbang 10,47%, sedangkan faktor eksternal seperti cuaca dan pohon tumbang memberikan kontribusi sebesar 48,84%. Sisanya, yaitu 40,69%, berasal dari penyebab yang tidak diketahui. Kerugian ekonomi akibat gangguan ini diperkirakan mencapai Rp52.432,50 per pelanggan. Untuk meningkatkan keandalan, disarankan agar pemeliharaan dilakukan lebih sering dan langkah-langkah proteksi tambahan diterapkan.

KATA KUNCI — Keandalan Sistem Distribusi Tenaga Listrik, Indeks Keandalan, SAIFI, SAIDI, Analisis Kerugian Ekonomi.

I. PENDAHULUAN

Permintaan energi listrik terus meningkat seiring dengan pertumbuhan populasi. Di era modern ini, hampir semua aspek kehidupan membutuhkan energi listrik. Oleh karena itu, proses distribusi listrik menjadi hal penting yang perlu diperhatikan untuk memastikan kebutuhan listrik konsumen dapat terpenuhi secara optimal [1]. Sistem distribusi tenaga listrik, yang terdiri atas jaringan kompleks mencakup pembangkitan, transmisi, dan distribusi hingga ke beban, memiliki peran penting dalam menyediakan energi listrik sesuai kebutuhan konsumen [2].

Keandalan sistem distribusi listrik dapat diukur menggunakan indeks keandalan. Indeks ini merupakan pengaturan yang digunakan sebagai parameter untuk menilai kualitas pelayanan dan penyaluran energi listrik, mulai dari tahap produksi hingga sampai ke konsumen [3]. Pada sistem distribusi, beberapa indeks yang sering dijadikan acuan meliputi *system average interruption frequency index* (SAIFI), *system average interruption duration index* (SAIDI), dan *customer average interruption duration index* (CAIDI), yang berfokus pada keandalan dari perspektif pelanggan. Selain itu, terdapat juga *average service availability index* (ASAI) dan *average service unavailability index* (ASUI), yang lebih berkaitan dengan aspek ketersediaan layanan [3], [4]. Indeks keandalan lainnya mencakup pengukuran berdasarkan beban, seperti *energy not supplied* (ENS) dan *average energy not supplied* (AENS) [5].

Namun, ada beberapa faktor yang dapat memengaruhi proses penyaluran tenaga listrik, seperti gangguan akibat faktor

internal, misalnya kegagalan sistem, dan faktor eksternal, seperti cuaca, petir, atau pohon tumbang. Gangguan ini dapat mengurangi keandalan penyaluran listrik ke konsumen dan berdampak langsung pada terjadinya pemadaman listrik sementara. Oleh karena itu, evaluasi dan peningkatan kontinuitas sistem distribusi listrik menjadi hal yang sangat penting [6]. Kualitas sistem distribusi listrik dapat diketahui dengan menganalisis keandalan sistem distribusi tersebut. Analisis keandalan sistem distribusi listrik ini dilakukan dengan menghitung faktor frekuensi gangguan yang sering terjadi serta durasi gangguan yang dialami [7], [8].

Dalam industri distribusi tenaga listrik, peningkatan keandalan sistem menjadi salah satu fokus utama bagi para peneliti guna memenuhi kebutuhan energi yang terus meningkat. Penelitian sebelumnya banyak menyoroti analisis keandalan pada struktur sistem distribusi tenaga listrik tegangan menengah, baik untuk kondisi saat ini maupun proyeksi masa depan, dengan mempertimbangkan penerapan pembangkit tersebar (*distributed generation*, DG) dan infrastruktur teknologi informasi dan komunikasi (TIK) [9]. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan teknologi DG dan penentuan lokasi sumber energi memiliki dampak signifikan terhadap keandalan pasokan listrik. Akan tetapi, penelitian-penelitian tersebut belum sepenuhnya mempertimbangkan variasi lokal maupun kondisi operasional spesifik yang dapat memengaruhi efektivitas solusi yang diusulkan.

Selain itu, beberapa penelitian lainnya berfokus pada peningkatan keandalan jaringan distribusi listrik melalui penempatan DG secara optimal. Hasil penelitian ini mengungkapkan bahwa penempatan DG secara strategis dapat meningkatkan keandalan sistem dengan mengurangi nilai SAIFI hingga hampir 40%, SAIDI sebesar 25%, dan energi yang tidak tersalurkan (*expected energy not supplied*, EENS) hingga 25% setelah DG diintegrasikan ke dalam jaringan distribusi [10]. Penelitian tersebut juga mengidentifikasi lokasi optimal untuk penempatan DG dengan memanfaatkan jaringan saraf tiruan (*artificial neural network*, ANN) serta memvalidasi hasilnya menggunakan *Roy Billinton test system* (RBTS). Namun, untuk memastikan relevansi dan keakuratan metode yang diusulkan, masih diperlukan validasi tambahan pada jaringan distribusi listrik dalam aplikasi sebenarnya.

Penelitian terkini berfokus pada analisis penempatan penutup balik (*auto-recloser*) berbasis nilai serta pemodelan ulang jaringan untuk meningkatkan keandalan dan efisiensi sistem distribusi radial. Hasilnya menunjukkan bahwa pemodelan ulang jaringan dan penempatan penutup balik secara signifikan dapat mengurangi durasi pemadaman serta meningkatkan keandalan sistem [11]. Namun demikian, penerapan penutup balik menghadapi kendala biaya investasi dan pemeliharaan, terutama di wilayah dengan keterbatasan anggaran. Penelitian lanjutan diperlukan untuk menentukan cara menyeimbangkan biaya operasional dengan manfaat keandalan.

Fokus utama penelitian ini adalah evaluasi keandalan penyulang CWRU yang dikelola oleh Perusahaan Listrik Negara (PT PLN (Persero)) Unit Layanan Pelanggan (ULP) Pelabuhan Ratu Area Surade, menggunakan indeks SAIFI, SAIDI, dan CAIDI. Penelitian ini tidak bertujuan untuk mengusulkan solusi atau kerangka kerja baru, tetapi memberikan evaluasi mendalam terhadap kinerja keandalan sistem yang ada. Dengan menganalisis karakteristik operasional lokal dan pengaruh eksternal, penelitian ini memberikan masukan untuk meningkatkan pemeliharaan preventif serta tindakan perlindungan guna mendukung peningkatan keandalan sistem. Selain itu, penelitian ini juga mencakup analisis ekonomi terkait dampak gangguan, suatu aspek yang jarang dibahas dalam studi sebelumnya.

Data yang diperoleh dari PT PLN (Persero) ULP Area Pelabuhan Ratu Surade menunjukkan bahwa penyulang CWRU, yang merupakan bagian dari jalur distribusi dalam jaringan listrik, menggunakan konfigurasi jaringan radial yang dilengkapi dengan *pre-break opening* (PBO) atau sakelar seksi otomatis (SSO). Penggunaan perangkat ini bertujuan untuk meminimalkan frekuensi gangguan serta memperpendek durasi gangguan. Pada tahun 2022, tercatat sebanyak 86 gangguan terjadi pada penyulang CWRU, dengan rata-rata durasi gangguan mencapai 1 jam 6 menit [12]. Gangguan ini memberikan dampak langsung kepada konsumen berupa pemadaman listrik. Oleh karena itu, evaluasi terhadap kontinuitas dan keandalan sistem distribusi listrik pada penyulang tersebut menjadi sangat diperlukan [13].

Meskipun indeks seperti SAIFI, SAIDI, dan CAIDI telah lama digunakan secara luas sejak diterbitkannya Standar PLN (SPLN) 68-2:1986, penelitian ini menawarkan perspektif baru, khususnya melalui analisis keandalan penyulang CWRU di PT PLN (Persero) ULP Area Pelabuhan Ratu Surade. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang sebagian besar berfokus pada pemasangan DG atau teknologi tertentu, penelitian ini mempertimbangkan faktor lokal dan variabel operasional yang memengaruhi keandalan sistem distribusi. Selain itu, studi ini

juga memasukkan aspek konsekuensi ekonomi dari gangguan, sebuah elemen yang jarang dibahas dalam penelitian sebelumnya. Dengan pendekatan yang lebih komprehensif dan praktis, penelitian ini mengusulkan solusi spesifik yang disesuaikan dengan kebutuhan wilayah, yang diharapkan dapat berkontribusi pada perumusan kebijakan serta peningkatan operasional di masa depan [14].

II. METODOLOGI

A. DESAIN PENELITIAN

Untuk mempermudah proses penelitian, studi ini mengikuti serangkaian tahapan yang terstruktur. Diagram alir penelitian yang ditampilkan pada Gambar 1 memberikan gambaran menyeluruh tentang langkah-langkah yang dilakukan selama pelaksanaan penelitian ini. Penelitian ini diawali dengan tahap utama pengembangan konseptual, yang mencakup tinjauan komprehensif terhadap literatur akademik terkait keandalan jaringan distribusi listrik serta perumusan kerangka teoretis sebagai panduan untuk penyelidikan lebih lanjut. Tahap berikutnya adalah identifikasi masalah, yang menjadi langkah krusial dalam menentukan permasalahan spesifik pada penyulang CWRU di PT PLN (Persero) ULP Pelabuhan Ratu Surade. Masalah yang ditemukan berfokus pada tingginya frekuensi gangguan dan tantangan keandalan yang dihadapi oleh penyulang CWRU, yang berdampak pada kontinuitas pasokan listrik bagi konsumen. Proses identifikasi ini memberikan arah yang jelas bagi penelitian, sehingga memungkinkan pengumpulan dan analisis data secara terfokus untuk meningkatkan keandalan sistem.

Setelah tahap penyusunan pengembangan konseptual, penelitian dilanjutkan ke tahap empiris, yang dimulai dengan pengumpulan data secara komprehensif dari penyulang CWRU di PT PLN (Persero) ULP Pelabuhan Ratu. Sebelum memasuki tahap analisis, yang akan mengidentifikasi penyebab utama gangguan pada penyulang CWRU secara mendalam, integritas dan kelengkapan data harus dipastikan terlebih dahulu.

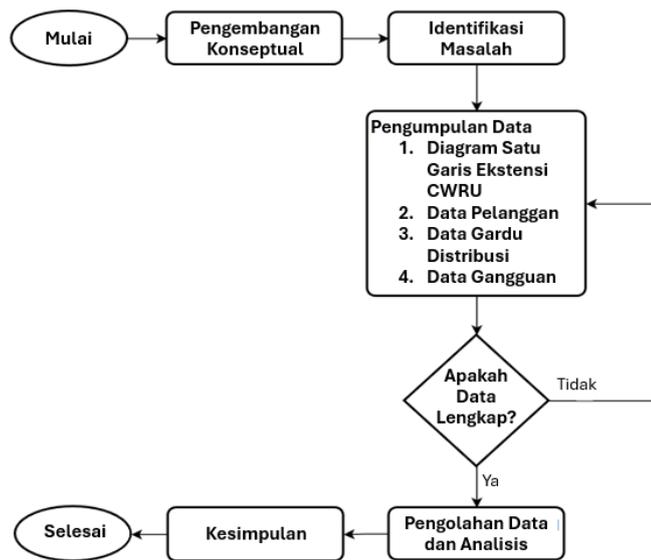
Analisis yang lebih mendalam dilakukan dengan menghitung berbagai indeks keandalan, seperti SAIFI, SAIDI, dan CAIDI. Secara bersamaan, indeks ketersediaan layanan seperti ASAI dan ASUI juga dievaluasi. Selain itu, dampak ekonomi akibat penurunan keandalan dianalisis menggunakan parameter ENS dan AENS. Hasil perhitungan indeks ini kemudian dibandingkan dengan tolok ukur keandalan reguler SPLN untuk memberikan gambaran komparatif terkait kinerja sistem.

Selanjutnya, penelitian ini juga mengkaji metrik ASAI dan ASUI untuk mengevaluasi kontinuitas layanan listrik yang diterima oleh pelanggan. Seiring dengan ini, kerugian ekonomi akibat pemadaman dianalisis menggunakan parameter ENS dan AENS sebagai titik acuan penting. Evaluasi yang komprehensif tersebut memberikan gambaran yang jelas mengenai efektivitas operasional serta dampak biaya yang ditimbulkan akibat permasalahan keandalan penyulang [15], [16].

Di akhir penelitian, berbagai analisis dirangkum menjadi hasil yang bermakna. Temuan ini tidak hanya menandai berakhirnya penelitian, tetapi juga berpotensi membuka peluang untuk penelitian lanjutan, pengembangan kebijakan, serta peningkatan operasional di sektor distribusi listrik pada masa mendatang.

B. LOKASI DAN OBJEK PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan di PT PLN (Persero) ULP Pelabuhan Ratu, yang berlokasi di Jalan Bhayangkara No. 11,



Gambar 1. Diagram alir penelitian.

Kecamatan Pelabuhan Ratu, Kabupaten Sukabumi, Jawa Barat, 43364. Fokus penelitian ini secara khusus ditujukan pada penyulang CWRU yang terhubung ke gardu induk *gas insulated switchgear* (GIS) PRABU. Data diperoleh berdasarkan izin resmi melalui perjanjian dengan PT PLN (Persero) ULP Pelabuhan Ratu, untuk memastikan penelitian tetap berada dalam ruang lingkup operasional penyulang yang ditentukan dalam jaringan penyedia layanan listrik.

C. METODE PENGUMPULAN DATA

Beragam metode pengumpulan data yang komprehensif digunakan untuk memperoleh informasi yang relevan, dengan fokus pada analisis keandalan sistem distribusi 20 kV di area PT PLN (Persero) ULP Pelabuhan Ratu Surade. Observasi lapangan dilakukan dengan mengunjungi langsung lokasi sistem untuk mengamati dan mendokumentasikan kondisi aktual sistem distribusi listrik, termasuk interaksi antara komponen-komponennya. Observasi ini menyediakan data *real-time* mengenai operasi dan keandalan sistem.

Selain itu, wawancara dilakukan dengan teknisi, manajer, staf operasional PT PLN (Persero), serta pengguna layanan listrik di wilayah tersebut. Wawancara ini bertujuan untuk memperoleh pemahaman mendalam tentang isu-isu operasional, kejadian gangguan, serta strategi penanganannya dalam sistem distribusi. Proses pengumpulan data juga mencakup tinjauan literatur, yang berperan penting dalam memahami kerangka teori yang menjadi dasar penelitian ini.

Beragam informasi yang luas dan variatif dikumpulkan melalui kombinasi berbagai metode pengumpulan data. Data ini digunakan untuk mendukung analisis mendalam terhadap keandalan sistem distribusi listrik di wilayah PT PLN (Persero) ULP Pelabuhan Ratu Surade pada penyulang CWRU.

D. DATA LAPANGAN

Data lapangan yang signifikan dikumpulkan untuk menganalisis keandalan sistem distribusi listrik di area ULP Pelabuhan Ratu Surade yang dikelola oleh PT PLN (Persero). Data ini mencakup informasi rinci mengenai jumlah pelanggan, kapasitas dan jumlah trafo distribusi, serta frekuensi dan durasi gangguan pada penyulang CWRU. Informasi tersebut memberikan gambaran menyeluruh tentang komponen-komponen utama dalam sistem distribusi.

Secara khusus, pada tahun 2022 terdapat 2.761 pelanggan yang terhubung ke penyulang CWRU. Sepanjang jaringan

tersebut, terpasang 137 trafo distribusi, terdiri atas 136 trafo aktif dan 1 trafo tidak aktif. Secara keseluruhan, trafo-trafo ini memiliki kapasitas total 11.210 kVA, menunjukkan kapasitas besar yang dapat digunakan untuk memenuhi kebutuhan listrik di wilayah Kabupaten Sukabumi. Terkait gangguan, pada tahun yang sama terjadi 86 kali gangguan pada penyulang CWRU dengan total waktu padam selama 8.510 menit atau 141,83 jam, dengan rata-rata setiap gangguan berlangsung selama 1 jam 6 menit. Gangguan-gangguan ini terjadi di beberapa segmen jaringan dengan sebaran kejadian yang bervariasi, mulai dari SSO tegangan jaringan rendah (TJR) hingga SSO *local interlocking and operation control* (LIOC). Penyebaran dan frekuensi gangguan ini mengindikasikan adanya titik-titik rawan pada sistem distribusi [17].

Selain itu, salah satu alat penting yang digunakan dalam analisis para peneliti adalah diagram satu garis yang diperoleh dari penyulang CWRU. Diagram ini menampilkan seluruh komponen yang terpasang pada penyulang, memberikan gambaran yang lebih jelas tentang konfigurasi sistem serta mempermudah identifikasi sumber gangguan atau potensi kelemahan dalam jaringan. Penelitian ini memanfaatkan data lapangan untuk melakukan analisis keandalan secara mendalam, dengan tujuan utama mengidentifikasi dan merekomendasikan strategi perbaikan yang efektif [18].

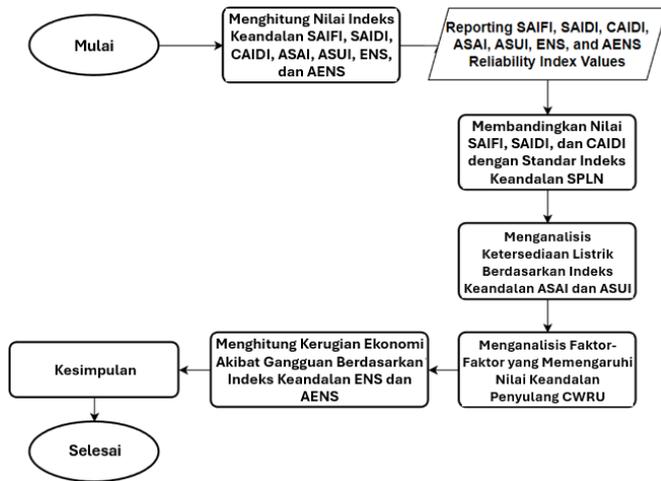
E. ANALISIS DATA

Gambar 2 memperlihatkan diagram alir analisis data yang dilakukan dalam penelitian tentang keandalan sistem distribusi tenaga listrik pada penyulang CWRU [19]. Gambar tersebut menunjukkan langkah-langkah analisis data yang digunakan untuk mengevaluasi keandalan sistem distribusi tenaga listrik pada penyulang CWRU. Langkah pertama melibatkan perhitungan indeks keandalan, seperti SAIFI, SAIDI, CAIDI, ASAI, ASUI, ENS, dan AENS, menggunakan rumus matematika yang relevan. Microsoft Excel dipilih sebagai alat perhitungan karena merupakan perangkat lunak yang umum digunakan dalam analisis data, dengan antarmuka yang ramah pengguna dan kemampuan untuk menangani ukuran data yang digunakan dalam penelitian ini.

Setelah nilai keandalan diperoleh, dilakukan analisis komparatif dengan membandingkan SAIFI, SAIDI, dan CAIDI yang dihitung terhadap standar keandalan SPLN yang berlaku [20]. Perbandingan ini penting untuk mengevaluasi tingkat kepatuhan terhadap standar industri. Selain itu, nilai ASAI dan ASUI dianalisis secara mendalam untuk mengukur ketersediaan daya pada penyulang CWRU, memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai kinerja sistem dalam kondisi normal maupun saat beban penuh.

Investigasi dilanjutkan dengan menganalisis laporan insiden dan data gangguan secara menyeluruh untuk mengidentifikasi faktor utama yang memengaruhi keandalan penyulang CWRU [21]. Pemahaman mendalam terhadap elemen-elemen ini sangat penting untuk menentukan penyebab utama kegagalan sistem.

Selanjutnya, penelitian ini mengukur dampak finansial dari gangguan dengan menghitung kerugian ekonomi yang disebabkan oleh penurunan kinerja operasional penyulang CWRU, sebagaimana ditunjukkan oleh data ENS dan AENS. Analisis ini mengilustrasikan proses kinerja teknis dalam memengaruhi aspek ekonomi, sekaligus menyoroti dampak yang lebih luas dari keandalan sistem terhadap ekonomi utilitas dan biaya yang ditanggung konsumen.



Gambar 2. Alur analisis data.

F. NILAI STANDAR INDEKS KEANDALAN BERDASARKAN SPLN 68-2:1986

Tujuan utama penelitian ini adalah untuk mengukur tingkat keandalan SAIFI, SAIDI, dan CAIDI, serta tingkat ketersediaan listrik berdasarkan indeks keandalan ASAI dan ASUI pada penyulang CWRU di PT PLN (Persero) ULP Pelabuhan Ratu Surade. Perhitungan indeks keandalan berikut ini dilakukan menggunakan program Microsoft Excel [22].

SAIFI, sebagaimana ditunjukkan pada (1), mengukur rata-rata jumlah gangguan sistem yang berlangsung lebih dari 3 menit dan dialami oleh pelanggan selama periode pengamatan, biasanya dalam satu tahun. Indeks ini merupakan bilangan tanpa dimensi, yang dapat dihitung dengan (1) [23], [24].

$$SAIFI = \frac{\sum_i N_i}{N_T} [1/yr]. \quad (1)$$

SAIDI dirumuskan dalam (2) [23], [25]. Indeks ini mengevaluasi total durasi gangguan yang berlangsung lebih dari 3 menit yang dialami rata-rata pelanggan dalam suatu periode tertentu, biasanya dalam satu tahun. SAIDI dinyatakan dalam satuan menit atau jam gangguan per pelanggan.

$$SAIDI = \frac{\sum_i r_i N_i}{N_T} [hr/yr]. \quad (2)$$

CAIDI mengukur waktu rata-rata yang diperlukan untuk memulihkan layanan setelah terjadi pemadaman. Indeks ini menunjukkan durasi rata-rata gangguan yang berlangsung lebih dari 3 menit. CAIDI juga mencerminkan waktu yang dibutuhkan konsumen untuk kembali mendapatkan pasokan energi setiap kali terjadi gangguan. Perhitungan indeks CAIDI dilakukan menggunakan (3) [23], [26].

$$CAIDI = \frac{\sum_i r_i N_i}{\sum_i N_i} [hr]. \quad (3)$$

ASAI merupakan peluang untuk mendapatkan seluruh beban yang tersedia. Indeks ini biasanya dinyatakan dalam bentuk persentase dan dapat dihitung menggunakan (4) [23].

$$ASAI = \frac{N_T(T) - \sum_i r_i N_i}{N_T(T)} [pu] \quad (4)$$

dengan T merupakan periode pengamatan, yang biasanya berlangsung selama satu tahun, atau setara dengan 8.760 jam pada tahun nonkabisat.

ASUI, sebagaimana ditunjukkan pada (5), merepresentasikan probabilitas terjadinya gangguan pada satu atau beberapa beban [23].

$$ASUI = 1 - ASAI = 1 - \frac{N_T(T) - \sum_i r_i N_i}{N_T(T)} [pu]. \quad (5)$$

EENS merujuk pada total energi yang diperkirakan tidak dapat disalurkan kepada konsumen yang dituju. Indeks ini dapat dihitung menggunakan (6) [23], [27].

$$EENS = \sum_i r_i P_{avg,i} [MWh/yr] \quad (6)$$

dengan $P_{avg,i}$ sebagai daya rata-rata yang terhubung selama setiap pemadaman.

Dalam mengevaluasi kinerja sistem distribusi tenaga listrik di Indonesia, penting untuk membandingkannya dengan indeks keandalan yang ditetapkan oleh PT PLN (Persero). Standar ini mengacu pada SPLN 68-2:1986, yang menjabarkan berbagai nilai acuan berdasarkan konfigurasi jaringan distribusi tenaga listrik [28]. Tabel I menampilkan standar indeks keandalan SPLN, yang mencakup ambang batas gangguan listrik yang dapat diterima untuk berbagai jenis konfigurasi jaringan.

Tabel I menyajikan gambaran umum metrik kinerja untuk saluran udara tegangan menengah (SUTM) dengan dan tanpa PBO, saluran kabel tegangan menengah (SKTM) dengan dan tanpa pemulihan penghantar jaringan distribusi (PPJD), serta konfigurasi SKTM yang mencakup klaster. Sebagai ilustrasi, konfigurasi SUTM radial umumnya menghasilkan nilai SAIFI sebesar 3,2 kali/tahun, SAIDI sebesar 21 jam/tahun, dan CAIDI sebesar 0,65 jam/gangguan. Penambahan PBO terbukti meningkatkan keandalan sistem, yang dibuktikan melalui penurunan nilai SAIFI dan SAIDI.

Sebaliknya, jaringan SKTM tanpa PPJD memiliki SAIFI yang lebih rendah, yaitu 1,2 kali/tahun, tetapi nilai CAIDI yang lebih tinggi, yang menunjukkan durasi gangguan rata-rata per insiden yang lebih lama. Dengan penambahan PPJD, terjadi peningkatan kinerja yang signifikan, ditandai dengan penurunan nilai SAIDI dan CAIDI. Selain itu, SKTM dengan klaster menunjukkan keandalan yang lebih unggul dibandingkan konfigurasi lainnya, dengan SAIFI sebesar 0,6 kali/tahun dan SAIDI tersingkat, yaitu 1,75 jam/tahun.

Nilai-nilai standar ini berfungsi sebagai tolok ukur kinerja jaringan distribusi dan menjadi acuan penting dalam mengevaluasi keandalan pasokan listrik kepada konsumen akhir. Dengan membandingkan data kinerja aktual dari *repeater* CWRU terhadap standar tersebut, studi ini dapat mengidentifikasi area yang memerlukan perbaikan serta menyusun strategi untuk meningkatkan keandalan sistem distribusi listrik secara keseluruhan.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. INDEKS KEANDALAN BERBASIS PELANGGAN (SAIFI, SAIDI, dan CAIDI)

Data penelitian yang diperoleh dari PT PLN (Persero) ULP Pelabuhan Ratu menunjukkan bahwa penyulang CWRU menyuplai 137 gardu distribusi, dengan satu gardu di antaranya tidak aktif. Selain itu, penelitian ini menghasilkan perhitungan nilai indeks keandalan berbasis pelanggan, yang meliputi SAIFI, SAIDI, dan CAIDI.

Tabel II menyajikan nilai indeks keandalan sistem distribusi tenaga listrik untuk setiap bulan selama satu tahun, yang mencerminkan frekuensi dan durasi rata-rata pemadaman yang dialami pelanggan penyulang CWRU. Nilai SAIFI menggambarkan rata-rata frekuensi pemadaman per pelanggan, sedangkan SAIDI menunjukkan total durasi pemadaman per pelanggan.

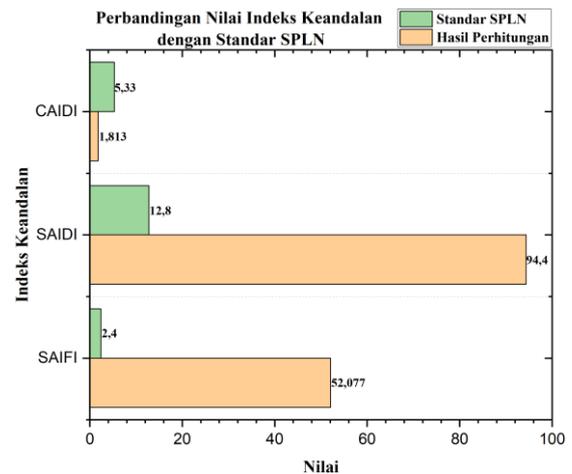
Gambar 3 menyajikan perbandingan hasil SAIFI, SAIDI, dan CAIDI dengan standar SPLN. Data pada Tabel II dan

TABEL I
STANDAR INDEKS KEANDALAN SPLN

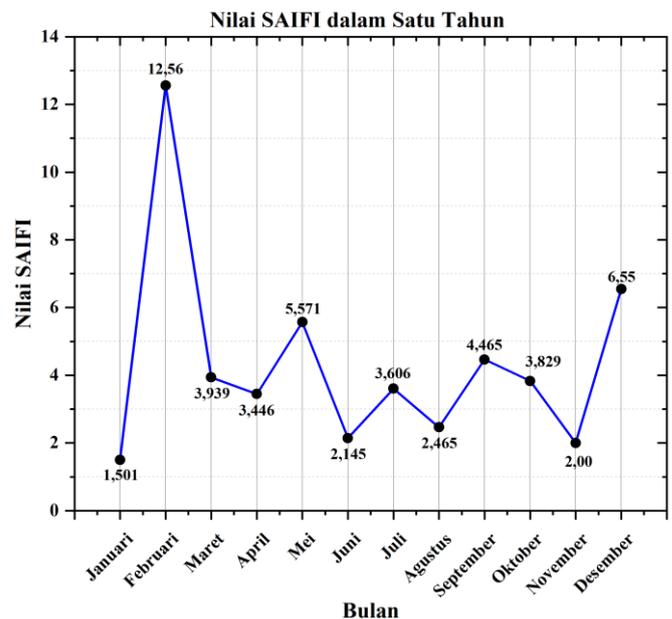
Konfigurasi Jaringan	SAIFI (kali/tahun)	SAIDI (jam/tahun)	CAIDI (jam/kali/tahun)
Saluran udara tegangan menengah (SUTM) radial	3,2	21	0,65
SUTM radial dengan PBO	2,4	12,8	5,33
Saluran kabel tegangan menengah, (SKTM) tanpa pemulihan penghantar jaringan distribusi (PPJD)	1,2	4,36	3,63
SKTM dengan PPJD	1,2	3,33	2,78
SKTM dengan klaster	0,6	1,75	2,92

TABEL II
PERBANDINGAN NILAI SAIFI DAN SAIDI

No	Bulan	SAIFI	SAIDI
1	Januari	1,501	1,356
2	Februari	12,560	24,739
3	Maret	3,939	6,503
4	April	3,446	14,778
5	Mei	5,571	7,890
6	Juni	2,145	2,343
7	Juli	3,606	4,730
8	Agustus	2,465	8,859
9	September	4,465	3,759
10	Oktober	3,829	4,886
11	November	2,000	4,817
12	Desember	6,550	9,740



Gambar 3. Grafik perbandingan nilai indeks keandalan dengan SPLN.



Gambar 4. Grafik nilai indeks keandalan SAIFI.

Gambar 3 memberikan gambaran umum tentang kinerja sistem distribusi daya. Berdasarkan rincian nilai SAIFI dan SAIDI bulanan dalam Tabel II, periode tertentu, seperti Februari dan Mei, menunjukkan frekuensi dan durasi pemadaman tertinggi. Bulan-bulan ini menandai waktu dengan gangguan paling signifikan, sehingga perlu diprioritaskan dalam kegiatan perbaikan atau pemeliharaan oleh PT PLN (Persero) ULP Pelabuhan Ratu. Analisis ini membantu mengidentifikasi periode kritis yang memerlukan penyesuaian sistem untuk meningkatkan keandalan secara keseluruhan.

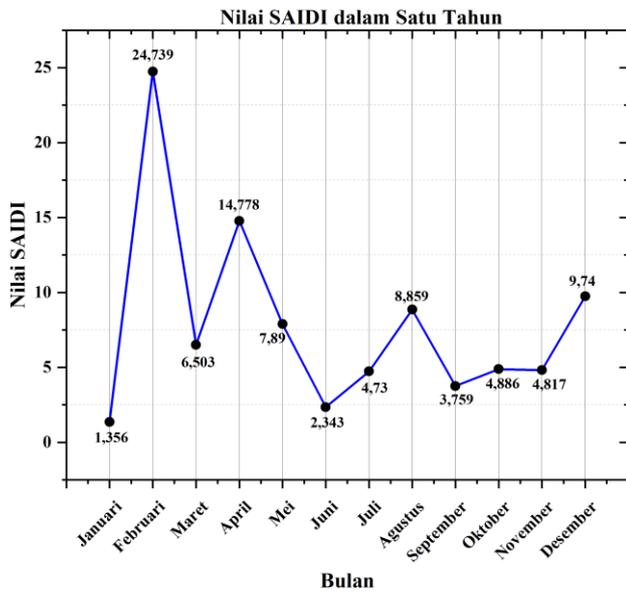
Gambar 4 menampilkan grafik nilai bulanan SAIFI sepanjang tahun 2022. Nilai SAIFI sebesar 52,077 kali/pelanggan/tahun tergolong tidak andal karena melebihi standar keandalan SPLN, yang menetapkan nilai SAIFI andal di bawah 2,4 kali/pelanggan/tahun. Tingginya nilai SAIFI ini dipengaruhi oleh frekuensi gangguan yang terjadi pada penyulang CWRU, yaitu sebanyak 86 kali selama tahun 2022. Gangguan yang sering terjadi pada segmen *recloser* (REC) *breaker control relay* (BCR) juga berdampak pada seluruh pelanggan yang terhubung. Nilai SAIFI tertinggi tercatat pada bulan Februari, yaitu sebesar 12,560 kali/pelanggan (Gambar 4), sedangkan nilai terendah terjadi pada bulan Januari, yaitu sebesar 1,501 kali/pelanggan.

Pada bulan Januari, jaringan mengalami gangguan minimal dengan hanya lima kejadian, menghasilkan nilai SAIFI sebesar

1,501 kali/pelanggan. Nilai yang relatif rendah ini menunjukkan bahwa gangguan yang terjadi bersifat terbatas, baik dalam frekuensi maupun cakupan, sehingga hanya memengaruhi sebagian kecil pelanggan.

Sebaliknya, pada bulan Februari terjadi lonjakan gangguan yang signifikan, dengan nilai SAIFI meningkat tajam menjadi 12,560 kali/pelanggan. Frekuensi gangguan yang meningkat, dengan total 19 kejadian dalam satu bulan, ditambah dampaknya yang meluas pada seluruh basis pelanggan, menunjukkan adanya tekanan yang lebih besar pada sistem. Kondisi ini menyoroti perlunya evaluasi ulang terhadap desain jaringan dan protokol pemeliharaan, khususnya pada segmen yang mengalami pemadaman total, untuk meningkatkan keandalan sistem.

Nilai SAIDI pada penyulang CWRU tergolong tidak andal karena mencapai 94,400 jam/pelanggan/tahun (Gambar 5), jauh di atas standar keandalan yang ditetapkan oleh SPLN. Berdasarkan standar tersebut, SAIDI dianggap andal jika berada di bawah 12,8 jam/pelanggan/tahun. Tingginya nilai SAIDI ini dipengaruhi oleh durasi gangguan yang cukup lama, dengan rata-rata gangguan berlangsung selama 1 jam 6 menit. Selain itu, frekuensi gangguan yang sering terjadi pada segmen REC BCR turut berdampak signifikan pada pelanggan secara keseluruhan.



Gambar 5. Grafik nilai indeks keandalan SAIDI.

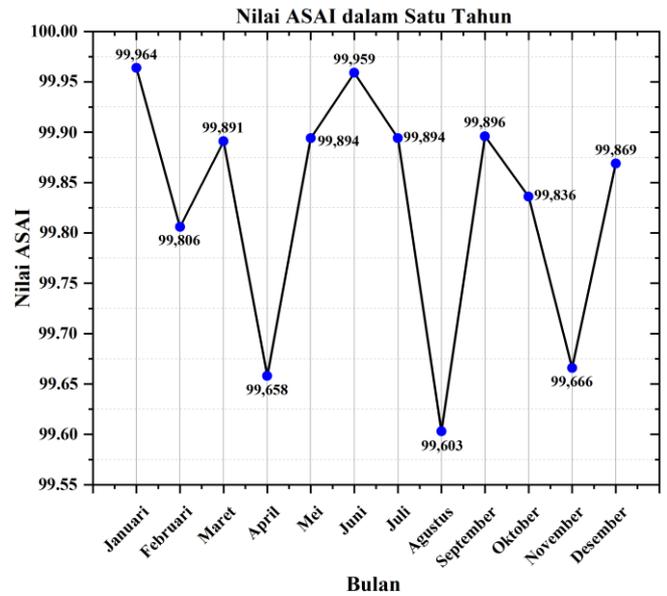
Evaluasi terhadap SAIDI juga menunjukkan adanya variasi durasi pemadaman listrik yang dialami oleh pelanggan penyulang CWRU. Pada bulan Januari, dampak gangguan relatif ringan, dengan nilai SAIDI sebesar 1,356 jam/pelanggan. Hal ini menunjukkan bahwa pemadaman yang terjadi pada bulan tersebut dapat diatasi dengan cepat, sehingga durasi ketidaknyamanan pelanggan dapat diminimalkan.

Sebaliknya, bulan Februari mencatat peningkatan signifikan dalam durasi gangguan layanan, tercermin dari nilai SAIDI sebesar 24,739 jam/pelanggan. Angka ini mengindikasikan tantangan besar pada bulan tersebut, termasuk tingginya frekuensi gangguan dan lamanya waktu pemulihan layanan, sehingga diperlukan analisis jaringan yang lebih mendalam serta langkah-langkah strategis untuk peningkatan keandalan.

Di sisi lain, CAIDI, yang menggambarkan durasi rata-rata pemadaman per gangguan, menunjukkan nilai 1,813 jam/insiden untuk tahun ini. Nilai ini berada di bawah ambang batas SPLN sebesar 5,33 jam/insiden, mengindikasikan bahwa metode pemulihan layanan saat terjadi pemadaman telah berjalan secara efektif, meskipun tantangan tetap terlihat dari tingginya nilai SAIFI dan SAIDI. Secara keseluruhan, meskipun indeks CAIDI menunjukkan keberhasilan dalam protokol pemulihan layanan, tingginya nilai SAIDI, terutama pada bulan Februari, menyoroti kebutuhan mendesak untuk meningkatkan ketahanan sistem distribusi listrik demi mengurangi frekuensi dan durasi pemadaman di masa mendatang.

B. INDEKS KEANDALAN BERDASARKAN KETERSEDIAAN (ASAI DAN ASUI)

Berdasarkan hasil perhitungan, rata-rata nilai indeks keandalan ASAI pada penyulang CWRU mencapai 99,828%, sedangkan rata-rata indeks keandalan ASUI sebesar 0,172%. Hal ini menunjukkan bahwa sistem mampu merespons gangguan dengan cepat. Dengan demikian, ketersediaan daya listrik pada penyulang CWRU dapat dikategorikan cukup baik. Gambar 6 menampilkan nilai ASAI setiap bulan selama tahun 2022. Nilai ASAI tertinggi tercatat sebesar 99,964% pada bulan Januari, sedangkan nilai terendah, sebesar 99,603%, terjadi pada bulan Agustus. Meskipun terdapat fluktuasi, nilai ASAI bulanan tetap berada di kisaran 99%.



Gambar 6. Grafik nilai indeks keandalan ASAI.

C. FAKTOR-FAKTOR YANG MEMENGARUHI NILAI INDEKS KEANDALAN PADA PENYULANG CWRU

Berdasarkan hasil analisis, nilai indeks keandalan pada penyulang CWRU dipengaruhi oleh berbagai gangguan yang terjadi pada sistem distribusi tenaga listrik. Gangguan-gangguan tersebut diklasifikasikan menjadi dua kategori utama berdasarkan faktor penyebabnya, yaitu faktor internal dan eksternal. Berikut adalah rincian gangguan yang terjadi pada penyulang CWRU menurut kedua faktor tersebut.

Hasil analisis keandalan sistem penyulang CWRU, seperti ditunjukkan pada Gambar 7, mengidentifikasi dua kategori utama gangguan serta satu kategori yang belum teridentifikasi. Faktor internal menyumbang 10,47% dari total gangguan. Contoh gangguan internal meliputi tabrakan antarfasa, fase terbakar, serta komponen yang terputus atau rusak. Untuk mengurangi jumlah gangguan internal ini, disarankan agar semua komponen dijaga dalam kondisi optimal melalui perawatan rutin dan inspeksi berkala.

Sebaliknya, 47,67% gangguan berasal dari faktor eksternal, dengan pohon tumbang sebagai penyebab utama, diikuti oleh sambaran petir, gangguan hewan, tiang roboh akibat longsor, dan tindakan manusia, seperti pelemparan kabel NYM oleh masyarakat. Temuan ini menunjukkan perlunya perawatan rutin dan pemangkasan pohon secara berkala serta pemasangan peralatan yang dapat mengurangi gangguan eksternal, terutama pada area REC BCR yang sering mengalami masalah.

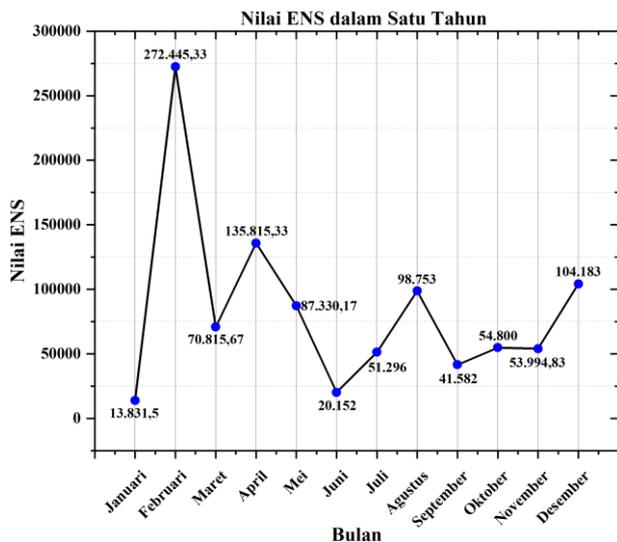
Sementara itu, 41,86% gangguan masih belum teridentifikasi. Potensi penyebabnya dapat berupa pemeliharaan jaringan atau kesalahan manusia. Untuk itu, PT PLN (Persero) harus melakukan pemeriksaan dan pencatatan secara menyeluruh setiap kali terjadi gangguan. Di masa mendatang, mungkin hal ini akan menjadi evaluasi yang lebih efektif untuk meningkatkan keandalan sistem dan mempermudah penanganan gangguan. Dengan mengetahui penyebab gangguan ini, perbaikan dan pencegahan dapat lebih tepat sasaran, sehingga akan menghasilkan peningkatan keandalan penyulang CWRU yang signifikan.

D. NILAI KERUGIAN EKONOMI BERDASARKAN ENS DAN AENS

Gambar 8 menunjukkan besarnya ENS yang diakibatkan oleh gangguan pada penyulang CWRU selama satu tahun. Nilai



Gambar 7. Grafik faktor penyebab gangguan pada penyulang CWRU.



Gambar 8. Nilai ENS dalam kurun waktu satu tahun.

ENS dihitung dengan cara mengalikan daya aktif dengan durasi gangguan dalam satuan jam. Berdasarkan hasil perhitungan, total ENS pada penyulang CWRU mencapai 1.004.998,833 kWh. Selanjutnya, nilai AENS diperoleh dengan membagi total ENS yang dihasilkan dengan jumlah pelanggan secara keseluruhan.

$$AENS = \frac{ENS}{N_T} = \frac{1.004.998,833 \text{ kWh}}{27,691} = 36.293,34 \text{ kWh.}$$

Berdasarkan hasil analisis indeks keandalan ENS, energi yang hilang akibat gangguan pada penyulang CWRU selama tahun 2022 tercatat sebesar 1.004.998,833 kWh. Sementara itu, nilai rata-rata energi yang tidak tersalurkan ke pelanggan (AENS) mencapai 36.293,34 kWh/pelanggan.

Pada tahun yang sama, tarif listrik pelanggan ditetapkan sebesar Rp1.444,70/kWh. Dengan demikian, total kerugian ekonomi akibat gangguan pada penyulang CWRU selama 2022 mencapai Rp1.451.921.814,00 atau setara dengan Rp52.432,50/pelanggan. Upaya untuk mengurangi kerugian ekonomi ini dapat dilakukan dengan menekan frekuensi gangguan yang terjadi serta meminimalkan durasi gangguan [29], [30].

IV. KESIMPULAN

Indeks keandalan berbasis pelanggan pada penyulang CWRU tahun 2022 menunjukkan nilai SAIFI sebesar 52,077 kali/tahun, yang dikategorikan sebagai tidak andal karena melebihi nilai indeks standar SPLN. Nilai SAIDI tercatat sebesar 94,400 jam/pelanggan/tahun, juga tergolong tidak

andal karena berada di atas ambang batas standar SPLN. Sementara itu, nilai CAIDI sebesar 1,813 jam/pelanggan/tahun termasuk dalam kategori andal karena berada di bawah nilai indeks standar SPLN, sehingga memenuhi kriteria keandalan. Berdasarkan ketersediaan, penyulang CWRU pada tahun 2022 dinilai andal karena nilai indeks keandalan ASAI mencapai 99,828%, sedangkan ASUI hanya sebesar 0,172%. Tingginya ketersediaan energi listrik ini mencerminkan respons sistem yang cepat dalam menangani gangguan. Nilai ini dipengaruhi oleh gangguan pada penyulang CWRU yang sebagian besar disebabkan oleh faktor eksternal, dengan persentase sebesar 47,67%. Gangguan akibat faktor internal relatif jarang terjadi, hanya 10,47%, sedangkan 41,86% gangguan lainnya tidak diketahui penyebabnya. Sementara itu, kerugian ekonomi yang diakibatkan oleh gangguan pada penyulang CWRU selama tahun 2022 mencapai Rp1.451.921.814,00, dengan rata-rata kerugian sebesar Rp52.432,50 per pelanggan.

Meskipun terdapat hasil yang tampak kontradiktif, di mana nilai SAIFI dan SAIDI menunjukkan ketidakandalan, sementara nilai CAIDI, ASAI, dan ASUI berada dalam batas yang dapat diterima, kondisi sistem secara keseluruhan dapat dijelaskan sebagai berikut. Tingginya nilai SAIFI dan SAIDI menunjukkan bahwa pelanggan sering mengalami pemadaman dengan durasi yang cukup lama, mengindikasikan adanya masalah pada frekuensi dan durasi gangguan. Namun, nilai CAIDI yang memenuhi standar menunjukkan bahwa saat pemadaman terjadi, proses pemulihan daya dilakukan dengan efisien. Selain itu, nilai ASAI yang tinggi dan ASUI yang rendah mencerminkan bahwa sistem secara keseluruhan mampu mempertahankan tingkat ketersediaan daya yang tinggi. Oleh karena itu, meskipun sistem ini sudah efektif dalam memulihkan daya dan menjaga ketersediaan, diperlukan langkah signifikan untuk mengatasi penyebab utama yang mengakibatkan pemadaman yang sering dan lama guna meningkatkan keandalan sistem secara keseluruhan.

Selain mengevaluasi indeks keandalan tradisional seperti SAIFI, SAIDI, dan CAIDI, penelitian ini juga menyoroti pentingnya memperhatikan variasi lokal dan kondisi operasional yang secara signifikan memengaruhi keandalan sistem distribusi di wilayah PT PLN (Persero) ULP Pelabuhan Ratu Surade. Berbeda dengan studi sebelumnya yang umumnya berfokus pada solusi teknis seperti pemanfaatan DG, penelitian ini mengusulkan pendekatan yang lebih holistik dengan mempertimbangkan dampak ekonomi dari gangguan sistem, sehingga menawarkan perspektif baru dalam evaluasi keandalan distribusi tenaga listrik. Temuan dan rekomendasi dari penelitian ini memberikan solusi yang realistis dan terarah, yang dapat menjadi panduan dalam merumuskan kebijakan dan strategi operasional di masa mendatang, khususnya dalam menangani gangguan eksternal dan mengoptimalkan prosedur pemeliharaan.

KONTRIBUSI PENULIS

Konseptualisasi, Tasma Sucita dan Mia Agista; metodologi, Maman Somantri dan Mia Agista; perangkat lunak, Diki Fahrizal dan Mia Agista; validasi, Mia Agista; investigasi, Tasma Sucita dan Mia Agista; sumber daya, Maman Somantri dan Mia Agista; kurasi data, Diki Fahrizal dan Mia Agista; penulisan—penyiapan draf awal, Mia Agista; penulisan—peninjauan ulang dan penyuntingan, Diki Fahrizal; visualisasi, Mia Agista; supervisi, Tasma Sucita dan Maman Somantri; administrasi proyek, Tasma Sucita; akuisisi pendanaan, Tasma Sucita.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada semua pihak yang telah berkontribusi secara aktif dalam mendukung keberhasilan penelitian ini, sehingga tujuan yang diharapkan dapat tercapai.

REFERENSI

- [1] A.R. Misari, J.B. Leite, D. Piasson, dan J.R.S. Mantovani, "Reliability-centered maintenance task planning for overhead electric power distribution networks," *J. Control Autom. Electr. Syst.*, vol. 31, no. 5, hal. 1278–1287, Okt. 2020, doi: 10.1007/s40313-020-00606-8.
- [2] P. Li, M. Yang, dan Q. Wu, "Confidence interval based distributionally robust real-time economic dispatch approach considering wind power accommodation risk," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 12, no. 1, hal. 58–69, Jan. 2021, doi: 10.1109/TSTE.2020.2978634.
- [3] S. Kumar dkk., "Reliability enhancement of electrical power system including impacts of renewable energy sources: A comprehensive review," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 14, no. 10, hal. 1799–1815, Mei 2020, doi: 10.1049/iet-gtd.2019.1402.
- [4] M. Jooshaki dkk., "Reliability-oriented electricity distribution system switch and tie line optimization," *IEEE Access*, vol. 8, hal. 130967–130978, Jul. 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3009827.
- [5] B.M. Enyew dkk., "Techno-economic analysis of distributed generation for power system reliability and loss reduction," *Int. J. Sustain. Energy*, vol. 42, no. 1, hal. 873–888, Agu. 2023, doi: 10.1080/14786451.2023.2244617.
- [6] A. Pahwa dan M. Jaller, "Assessing last-mile distribution resilience under demand disruptions," *Transp. Res. E, Logist. Transp. Rev.*, vol. 172, hal. 1–25, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.tre.2023.103066.
- [7] X. Ren dkk., "Design of multi-information fusion based intelligent electrical fire detection system for green buildings," *Sustainability*, vol. 13, no. 6, hal. 1–15, Mar. 2021, doi: 10.3390/su13063405.
- [8] N. Bhusal, M. Abdelmalak, M. Kamruzzaman, dan M. Benidris, "Power system resilience: Current practices, challenges, and future directions," *IEEE Access*, vol. 8, hal. 18064–18086, Jan. 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2968586.
- [9] M. Parol dkk., "Reliability analysis of MV electric distribution networks including distributed generation and ICT infrastructure," *Energies*, vol. 15, no. 14, hal. 1–34, Jul. 2022, doi: 10.3390/en15145311.
- [10] S. Ahmad dan A.U. Asar, "Reliability enhancement of electric distribution network using optimal placement of distributed generation," *Sustainability*, vol. 13, no. 20, hal. 1–16, Okt. 2021, doi: 10.3390/su132011407.
- [11] B. Ghosh, A.K. Chakraborty, dan A.R. Bhowmik, "Reliability and efficiency enhancement of a radial distribution system through value-based auto-recloser placement and network remodelling," *Prot. Control Mod. Power Syst.*, vol. 8, hal. 1–14, Jan. 2023, doi: 10.1186/s41601-022-00274-7.
- [12] R.P. Gomes, P.C.C. Vieira, E.G. Domingues, dan A.L.F. Filho, "Analysis of the impact of integrating photovoltaic solar generation on the reliability of distribution systems," dalam *2023 Workshop Commun. Netw. Power Syst. (WCNPS)*, 2023, hal. 1–7, doi: 10.1109/WCNPS60622.2023.10345158.
- [13] M.S. Hossain, N.A. Madlool, A.W. Al-Fatlawi, dan M.E.H. Assad, "High penetration of solar photovoltaic structure on the grid system disruption: An overview of technology advancement," *Sustainability*, vol. 15, no. 2, hal. 1–25, Jan. 2023, doi: 10.3390/su15021174.
- [14] J.L. López-Prado, J.I. Vélez, dan G.A. Garcia-Llinás, "Reliability evaluation in distribution networks with microgrids: Review and classification of the literature," *Energies*, vol. 13, no. 23, hal. 1–31, Des. 2020, doi: 10.3390/en13236189.
- [15] A. Durgadevi dan N. Shanmugavadivoo, "Availability capacity evaluation and reliability assessment of integrated systems using metaheuristic algorithm," *Comput. Syst. Sci. Eng.*, vol. 44, no. 3, hal. 1951–1971, Agu. 2023, doi: 10.32604/csse.2023.026810.
- [16] M. Ghanbari-Ghalehjoughi, K. Taghizad-Tavana, dan S. Nojavan, "Resilient operation of the renewable energy and battery energy storages based smart distribution grid considering physical-cyber-attacks," *J. Energy Storage*, vol. 62, hal. 1–17, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.est.2023.106950.
- [17] S.R. Pani, M.K. Kar, dan P.K. Bera, "Reliability assessment of distribution power network," dalam *2022 2nd Odisha Int. Conf. Elect. Power Eng. Commun. Comput. Technol. (ODICON)*, 2022, hal. 1–5, doi: 10.1109/ODICON54453.2022.10010301.
- [18] Nazaruddin dkk., "Reliability analysis of 20 KV electric power distribution system," dalam *2nd Int. Conf. Sci. Innov. Eng.*, 2020, hal. 1–8, doi: 10.1088/1757-899X/854/1/012007.
- [19] A. Azizi, B. Vahidi, dan A.F. Nematollahi, "Reconfiguration of active distribution networks equipped with soft open points considering protection constraints," *J. Mod. Power Syst. Clean Energy*, vol. 11, no. 1, hal. 212–222, Jan. 2023, doi: 10.35833/MPCE.2022.000425.
- [20] M.J. Abed dan A. Mhalla, "Reliability assessment of grid-connected multi-inverter for renewable power generation sector," *Arab Gulf J. Sci. Res.*, vol. 42, no. 1, hal. 68–84, Jan. 2024, doi: 10.1108/AGJSR-08-2022-0149.
- [21] H. Patel, B.K. Saw, A.K. Bohre, dan O. Yadav, "Analyze the impact of distributed generation units on distribution system performances," dalam *2023 IEEE Int. Conf. Power Electron. Smart Grid Renew. Energy (PESGRE)*, 2023, hal. 1–6, doi: 10.1109/PESGRE58662.2023.10404345.
- [22] O. Toirov dan S. Khalikov, "Analysis of the safety of pumping units of pumping stations of machine water lifting in the function of reliability indicators," dalam *E3S Web Conf. IV Int. Sci. Conf. Constr. Mech. Hydraul. Water Resour. Eng. (CONMECHYDRO - 2022)*, 2023, hal. 1–8, doi: 10.1051/e3sconf/202336504010.
- [23] H.M. Salman, J. Pasupuleti, dan A.H. Sabry, "Review on causes of power outages and their occurrence: Mitigation strategies," *Sustainability*, vol. 15, no. 20, hal. 1–34, Okt. 2023, doi: 10.3390/su152015001.
- [24] M.B. Shafik dkk., "Distribution networks reliability assessment considering distributed automation system with penetration of DG units and SOP devices," *Energy Rep.*, vol. 9, hal. 6199–6210, Des. 2023, doi: 10.1016/j.egyrs.2023.05.224.
- [25] M. Qawaqzeh dkk., "The assess reduction of the expected energy not-supplied to consumers in medium voltage distribution systems after installing a sectionalizer in optimal place," *Sustain. Energy Grids Netw.*, vol. 34, hal. 1–8, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.segan.2023.101035.
- [26] S. Wang, F. Li, G. Zhang, dan C. Yin, "Analysis of energy storage demand for peak shaving and frequency regulation of power systems with high penetration of renewable energy," *Energy*, vol. 267, hal. 1–17, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.energy.2022.126586.
- [27] D. Yang dkk., "A digital twin-driven life prediction method of lithium-ion batteries based on adaptive model evolution," *Materials*, vol. 15, no. 9, hal. 1–22, Mei 2022, doi: 10.3390/ma15093331.
- [28] V. Vita dkk., "Predictive maintenance for distribution system operators in increasing transformers' reliability," *Electronics*, vol. 12, no. 6, hal. 1–23, Mar. 2023, doi: 10.3390/electronics12061356.
- [29] H. Prasad C, K. Subbaramaiah, dan P. Sujatha, "Optimal DG unit placement in distribution networks by multi-objective whale optimization algorithm & its techno-economic analysis," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 214, hal. 1–11, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.ejepsr.2022.108869.
- [30] G.A. Putri, A.K. Widagdo, dan D. Setiawan, "Analysis of financial technology acceptance of peer to peer lending (P2P lending) using extended technology acceptance model (TAM)," *J. Open Innov. Technol. Mark. Complex.*, vol. 9, no. 1, hal. 1–12, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.joitmc.2023.100027.