

# Analysis of Power Losses, Voltage Drops and Repairs in the Keboansikep Feeder Distribution System of PT PLN (Persero) UP3 Sidoarjo

## Analisa Rugi Daya, Drop Tegangan dan Perbaikan Pada Sistem Distribusi Penyulang Keboansikep PT PLN (Persero) UP3 Sidoarjo

Fendy Steyo Pradana<sup>1)</sup>, Jamaaluddin<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Program Studi Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

<sup>2)</sup> Program Studi Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

\*Email Penulis Korespondensi: jamaaluddin@umsida.ac.id

**Abstract.** This research analyzes the technical and economic performance improvements of the 20 kV Keboansikep feeder network using ETAP 21.0.1 simulation software. The study addresses the problem of high power losses and voltage drops in the existing system, which reduce network efficiency and electricity supply quality. Data collection involved field measurements of feeder load, conductor specifications, transformer capacity, and network configuration, followed by modeling and simulation in ETAP. Two improvement scenarios were evaluated: Option 1, upgrading conductor cross-sectional area to 240 mm<sup>2</sup>, and Option 2, adding a new feeder line to distribute the load more evenly. Simulation results show that in the existing condition, total power loss reached 246.11 kW with a maximum voltage drop of  $\pm 3.8\%$ . Option 1 reduced power loss to 153.08 kW and voltage drop to  $\pm 2.5\%$ , while Option 2 achieved the best performance with power loss of only 65.99 kW and voltage drop of  $\pm 1.2\%$ . From an economic perspective, Option 1 generated annual energy cost savings of approximately IDR 896 million, while Option 2 saved around IDR 1.73 billion annually. Although Option 2 requires higher investment, it offers greater long-term benefits in terms of energy efficiency, voltage stability, and operational reliability. The findings provide practical insights for electricity distribution companies in selecting cost-effective and technically sound solutions to minimize network losses and enhance service quality.

**Keywords** - power loss reduction, voltage drop, distribution network, ETAP simulation, feeder optimization

**Abstrak.** Penelitian ini menganalisis peningkatan kinerja teknis dan ekonomi jaringan feeder 20 kV Keboansikep menggunakan perangkat lunak simulasi ETAP 21.0.1. Studi ini membahas masalah kerugian daya yang tinggi dan penurunan tegangan pada sistem yang ada, yang mengurangi efisiensi jaringan dan kualitas pasokan listrik. Pengumpulan data melibatkan pengukuran lapangan terhadap beban feeder, spesifikasi konduktor, kapasitas transformator, dan konfigurasi jaringan, diikuti dengan pemodelan dan simulasi menggunakan ETAP. Dua skenario peningkatan dievaluasi: Opsi 1, peningkatan luas penampang konduktor menjadi 240 mm<sup>2</sup>, dan Opsi 2, penambahan jalur feeder baru untuk mendistribusikan beban secara lebih merata. Hasil simulasi menunjukkan bahwa dalam kondisi existing, kerugian daya total mencapai 246,11 kW dengan penurunan tegangan maksimum  $\pm 3,8\%$ . Opsi 1 mengurangi kerugian daya menjadi 153,08 kW dan penurunan tegangan menjadi  $\pm 2,5\%$ , sementara Opsi 2 mencapai kinerja terbaik dengan kerugian daya hanya 65,99 kW dan penurunan tegangan  $\pm 1,2\%$ . Dari perspektif ekonomi, Opsi 1 menghasilkan penghematan biaya energi tahunan sekitar IDR 896 juta, sedangkan Opsi 2 menghemat sekitar IDR 1,73 miliar per tahun. Meskipun Opsi 2 memerlukan investasi yang lebih tinggi, opsi ini menawarkan manfaat jangka panjang yang lebih besar dalam hal efisiensi energi, stabilitas tegangan, dan keandalan operasional. Temuan ini memberikan wawasan praktis bagi perusahaan distribusi listrik dalam memilih solusi yang efisien secara biaya dan teknis untuk meminimalkan kerugian jaringan dan meningkatkan kualitas layanan.

**Kata Kunci** - pengurangan rugi daya, drop tegangan, jaringan distribusi, simulasi ETAP, optimasi penyulang

## I. PENDAHULUAN

Dalam era *Industrial 5.0*, energi listrik menjadi tulang punggung hampir seluruh aktivitas industri dan kehidupan masyarakat modern. Perkembangan teknologi, otomatisasi, dan *artificial intelligence* di berbagai sektor semakin mempertegas bahwa suplai listrik yang andal dan stabil bukan lagi sekadar kebutuhan, tetapi merupakan syarat mutlak bagi keberlangsungan aktivitas ekonomi dan sosial [1]. Ketergantungan industri pada energi listrik tidak hanya

terbatas pada pengoperasian mesin dan peralatan produksi, tetapi juga mencakup sistem kontrol, manajemen data, dan layanan digital yang memerlukan suplai daya kontinu tanpa gangguan [2].

Sistem tenaga listrik secara umum terdiri dari tiga subsistem utama: pembangkitan (*generation*), transmisi (*transmission*), dan distribusi (*distribution*). Di antara ketiga subsistem tersebut, sistem distribusi memegang peranan krusial karena berada pada tahap akhir penyaluran energi dari gardu induk menuju pelanggan akhir [3]. Namun, distribusi listrik kerap menghadapi tantangan teknis yang berdampak langsung pada kualitas pelayanan, di antaranya *power losses* (rugi daya) dan *voltage drop* (penurunan tegangan).

Menurut Pratiwi dan Haurissa (2023), rugi daya adalah hilangnya energi listrik akibat resistansi pada konduktor dan elemen jaringan lainnya. Fenomena ini terjadi karena sebagian energi listrik diubah menjadi panas, sehingga tidak seluruh energi yang dibangkitkan dapat dimanfaatkan oleh pelanggan. Besarnya rugi daya sangat dipengaruhi oleh faktor seperti panjang saluran, jenis material konduktor, luas penampang, dan besarnya arus yang mengalir [4] [5]. Penelitian Sugianto dan Untara (2019) menunjukkan bahwa susut energi pada sistem distribusi dapat mencapai lebih dari 10% dari total energi yang disalurkan apabila tidak dilakukan optimasi teknis [6].

Selain rugi daya, masalah lain yang kerap muncul adalah *voltage drop*. Medina dan Ratnata (2021) menyebutkan bahwa penurunan tegangan terjadi akibat adanya impedansi pada saluran distribusi yang menyebabkan tegangan di sisi beban lebih rendah dibandingkan tegangan di sumber. SPLN No. 1:1995 menetapkan batas toleransi penurunan tegangan pada jaringan distribusi, yakni maksimum 4% dari tegangan nominal [7]. Melebihi batas ini akan berpengaruh terhadap performa peralatan pelanggan dan dapat memicu kerusakan peralatan sensitif [8].

Kerugian akibat rugi daya dan *voltage drop* tidak hanya bersifat teknis tetapi juga berdampak ekonomi. Irsyam et al. (2023) menegaskan bahwa energi yang hilang selama distribusi tidak dapat ditagihkan sehingga menjadi beban finansial yang signifikan bagi penyedia listrik [9]. Studi Agrawal et al. (2021) menambahkan bahwa karakteristik elektromekanis dan kualitas komponen jaringan sangat mempengaruhi efisiensi sistem secara keseluruhan, sehingga perbaikan desain jaringan dapat menjadi solusi strategis.

Kasus nyata yang menjadi fokus penelitian ini adalah Penyulang Keboansikep yang berada di bawah pengelolaan PT PLN (Persero) UP3 Sidoarjo dengan pasokan dari Gardu Induk Buduran. Penyulang ini melayani pelanggan industri besar seperti PT Pakarti Riken Indonesia dengan kontrak daya sebesar 15 MVA dan tegangan operasi menengah sekitar 20,7–21,3 kV. Peningkatan aktivitas industri di kawasan Sidoarjo mendorong kenaikan beban listrik, yang pada gilirannya meningkatkan risiko rugi daya dan penurunan tegangan. Jika kondisi ini dibiarkan, maka efisiensi distribusi akan menurun, kualitas tegangan memburuk, dan kerugian biaya energi semakin besar [10].

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk: (1) menganalisis besar rugi daya dan *voltage drop* pada kondisi eksisting jaringan distribusi Penyulang Keboansikep; (2) menghitung potensi kerugian energi dan biaya akibat inefisiensi distribusi; serta (3) mengevaluasi dua skenario perbaikan teknis yang meliputi peningkatan luas penampang konduktor dan penambahan *feeder* baru. Analisis dilakukan menggunakan simulasi perangkat lunak ETAP, yang telah terbukti efektif untuk pemodelan dan optimasi jaringan distribusi [11], [12].

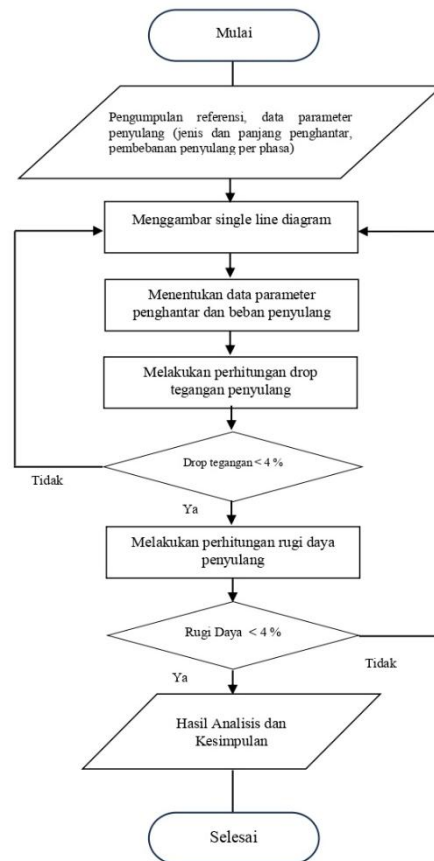
Kebaruan (*novelty*) penelitian ini terletak pada penerapan analisis teknis dan ekonomi secara terpadu pada penyulang industri spesifik di kawasan Sidoarjo dengan data lapangan terkini, sehingga hasilnya dapat dijadikan acuan bagi PT PLN (Persero) dalam mengambil keputusan investasi perbaikan jaringan yang tepat sasaran. Dengan pendekatan ini, diharapkan penelitian dapat memberikan kontribusi nyata terhadap peningkatan efisiensi energi, penghematan biaya operasional, dan peningkatan kualitas layanan distribusi listrik di Indonesia.

## II. METODE

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode deskriptif kuantitatif dengan pendekatan studi kasus pada sistem distribusi Penyulang Keboansikep milik PT PLN (Persero) UP3 Sidoarjo. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi dan menganalisis besarnya rugi daya (*power losses*) dan penurunan tegangan (*voltage drop*) pada sistem distribusi tegangan menengah serta memberikan rekomendasi teknis untuk mengurangi kerugian energi dan biaya.

Metode deskriptif kuantitatif dipilih karena mampu menyajikan data numerik secara sistematis, yang kemudian dianalisis untuk mendapatkan pemahaman mendalam mengenai kondisi eksisting sistem distribusi [13]. Studi ini memanfaatkan data aktual dari beban distribusi, jenis penghantar, panjang saluran, serta konfigurasi jaringan listrik yang diperoleh melalui observasi langsung dan dokumentasi dari pihak PT PLN (Persero).

Pengolahan data dilakukan menggunakan perangkat lunak bantu seperti *Microsoft Excel* untuk perhitungan dasar dan *ETAP Power Station* untuk simulasi serta validasi hasil perhitungan. Penggunaan perangkat lunak tersebut selaras dengan penelitian Pratiwi dan Haurissa (2023), yang menyatakan bahwa pemodelan sistem distribusi dengan perangkat lunak berbasis simulasi dapat meningkatkan ketelitian dalam analisis teknis jaringan.



**Gambar 1.** Diagram Alir Penelitian

Data beban diambil berdasarkan kondisi aktual operasional bulan April 2025, yang mencerminkan fluktuasi konsumsi energi pelanggan industri besar di wilayah kerja penyulang. Pendekatan ini sejalan dengan rekomendasi Li et al. (2024), yang menekankan pentingnya pemanfaatan data historis operasional dalam evaluasi keandalan sistem distribusi.

Dalam proses analisis, metode perhitungan rugi daya menggunakan rumus dasar rugi daya pada penghantar listrik, yaitu:

$$P_{\text{loss}} = I^2 \times R$$

Sementara untuk penurunan tegangan digunakan persamaan:

$$\Delta V = I \times (R \cos \phi + X \sin \phi)$$

di mana  $I$  adalah arus beban,  $R$  adalah resistansi,  $X$  adalah reaktansi, dan adalah sudut fase antara arus dan tegangan [4].

Hasil perhitungan ini kemudian dibandingkan dengan standar teknis yang ditetapkan dalam SPLN 72:1987. Jika nilai rugi daya dan penurunan tegangan melebihi batas toleransi, maka dilakukan analisis lanjutan untuk menentukan solusi teknis yang sesuai. Hal ini mengacu pada prinsip evaluasi keandalan sistem distribusi sebagaimana dikemukakan oleh Iman et al. (2024), yang menekankan pentingnya keterpaduan antara data lapangan dan standar operasional dalam penilaian kinerja jaringan distribusi.

Dengan pendekatan metode ini, penelitian diharapkan mampu memberikan gambaran teknis yang objektif dan solutif terhadap permasalahan rugi daya dan penurunan tegangan di jaringan distribusi Penyulang Keboansikep.

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### Kondisi Penyulang Saat Ini (*Existing Condition*)

Berdasarkan hasil simulasi aliran daya (*load flow analysis*) menggunakan perangkat lunak ETAP 21.0.1, kondisi eksisting jaringan distribusi 20 kV Penyulang Keboansikep yang berada di bawah pengelolaan PT PLN (Persero) UP3 Sidoarjo menunjukkan tingkat rugi daya (*power losses*) yang relatif tinggi, khususnya pada segmen Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM). Kondisi ini mengindikasikan adanya potensi inefisiensi energi yang dapat berdampak pada keandalan pasokan listrik ke pelanggan.

Adapun hasil perhitungan dan simulasi ETAP untuk kondisi eksisting adalah sebagai berikut:

1. SUTM: rugi daya mencapai 211,80 kW, menjadi kontributor terbesar terhadap total kerugian daya pada penyulang. Nilai ini disebabkan oleh panjang saluran yang signifikan, beban tinggi, serta penampang konduktor yang belum optimal.
2. SKTM: rugi daya sebesar 26,52 kW, relatif lebih kecil dibanding SUTM karena jalur kabel bawah tanah memiliki resistansi yang lebih rendah per satuan panjang.
3. Trafo Utama 150 kV/20 kV: rugi daya sebesar 7,79 kW, nilai ini masih dalam batas normal mengacu pada standar teknis transformator distribusi, namun tetap berkontribusi pada total losses penyulang.
4. Beban Pelanggan: total daya tersambung sebesar 15 MVA, dengan *demand load* mencapai  $\pm 80\%$  dari kapasitas terpasang. Kondisi ini menandakan beban sistem cukup tinggi dan beroperasi mendekati kapasitas maksimal saat beban puncak.

Selain rugi daya, hasil simulasi juga menunjukkan bahwa nilai *voltage drop* pada beberapa titik bus mendekati batas toleransi SPLN 72:1987 yaitu  $<4\%$  dari tegangan nominal. Hal ini dapat menurunkan kualitas daya yang diterima pelanggan, terutama industri besar yang membutuhkan kestabilan tegangan untuk menjaga kinerja peralatan produksi.

Faktor-faktor utama yang menyebabkan tingginya rugi daya pada kondisi eksisting antara lain:

1. Panjang lintasan distribusi SUTM yang relatif jauh dari Gardu Induk, sehingga resistansi total konduktor tinggi.
2. Beban puncak yang besar pada pelanggan industri, menyebabkan arus yang mengalir tinggi dan memperbesar rugi daya  $I^2R$ .
3. Penampang konduktor yang terbatas, sehingga kemampuan hantaran arus belum optimal terhadap beban eksisting.
4. Tidak adanya pembagian beban antar feeder, yang membuat satu jalur harus menangani aliran daya penuh menuju titik-titik beban akhir.

Gambar 2 berikut menunjukkan *single line diagram* (SLD) kondisi eksisting hasil pemodelan jaringan distribusi 20 kV Penyulang Keboansikep di ETAP.



ini adalah meningkatkan *ampacity* atau kemampuan hantaran arus (*current carrying capacity*) dan menurunkan resistansi total saluran (*total line resistance*). Menurut prinsip dasar kelistrikan, semakin besar luas penampang konduktor, semakin kecil nilai resistansi (R) yang dimilikinya. Dengan demikian, rugi daya akibat efek  $I^2R$  losses akan berkurang secara signifikan [14].

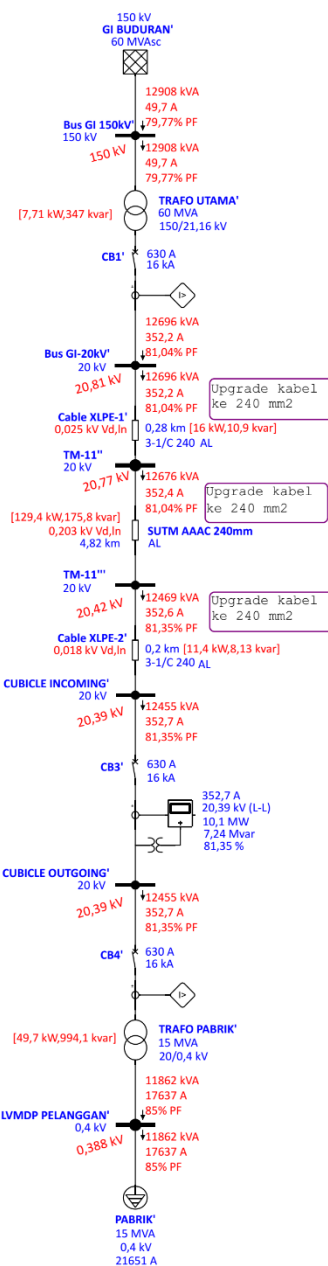
Selain menekan rugi daya, penggantian konduktor dengan ukuran lebih besar juga berdampak positif pada pengurangan *voltage drop*. Hal ini sejalan dengan temuan Mahardiananta et al. (2020) yang menyatakan bahwa *voltage drop* berbanding lurus dengan resistansi saluran dan panjang konduktor. Dengan resistansi yang lebih rendah, penurunan tegangan di sepanjang jalur distribusi dapat diminimalkan, menghasilkan profil tegangan (*voltage profile*) yang lebih stabil di setiap titik bus. Stabilitas tegangan ini sangat penting, terutama bagi pelanggan industri besar seperti PT Pakarti Riken Indonesia, yang beroperasi dengan beban sensitif terhadap fluktuasi tegangan [1].

Hasil simulasi ETAP 21.0.1 untuk skenario perbaikan pertama menunjukkan perbaikan signifikan pada parameter teknis berikut:

1. SUTM – Rugi daya menurun dari 211,80 kW menjadi 129,40 kW
2. SKTM – Rugi daya menurun dari 26,52 kW menjadi 15,97 kW
3. Trafo Utama 150 kV/20 kV – Rugi daya sedikit menurun dari 7,79 kW menjadi 7,71 kW
4. Voltage drop maksimal berkurang dari  $\pm 3,8\%$  menjadi  $\pm 2,5\%$

Penurunan rugi daya pada SUTM mencapai sekitar 39%, sedangkan pada SKTM sekitar 39,7%. Meskipun penurunan rugi daya pada trafo utama relatif kecil (sekitar 1%), hal ini tetap menunjukkan adanya perbaikan efisiensi secara keseluruhan. Menurut Sugianto dan Utara (2019), pengurangan rugi daya sebesar 30 - 40% pada jaringan distribusi dapat menghasilkan penghematan energi dan biaya operasional yang signifikan dalam jangka panjang.

## RECOMMENDATION 1



Gambar 3 Single Line Diagram Penyulang Keboansikep Opsi 1

*Keterangan:* Warna pada jalur SUTM dan SKTM pada Single Line Diagram (SLD) memperlihatkan penurunan intensitas rugi daya dibanding kondisi eksisting. Nilai tegangan pada bus lebih mendekati tegangan nominal, yang mengindikasikan profil tegangan jaringan lebih stabil setelah dilakukan peningkatan penampang konduktor.

Opsi kedua merupakan strategi perbaikan yang bersifat *comprehensive upgrade*, yaitu dengan menambahkan satu jalur feeder baru pada jaringan Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM) dan Saluran Kabel Tegangan Menengah (SKTM) yang terhubung dengan Penyulang Keboansikep. Tujuan utama dari strategi ini adalah melakukan *load splitting* atau pembagian beban distribusi listrik secara lebih merata, sehingga arus yang mengalir pada masing-masing jalur dapat dikurangi. Dengan demikian, nilai rugi daya (*power losses*) akibat efek *I<sup>2</sup>R losses* dapat ditekan secara signifikan, sekaligus memperbaiki *voltage profile* pada seluruh titik beban [15].

Pada desain ini, *feeder* baru dibangun dengan spesifikasi teknis sebagai berikut:

1. SUTM: menggunakan konduktor berpenampang 150 mm<sup>2</sup>
2. SKTM: menggunakan konduktor berpenampang 150 mm<sup>2</sup>

Dengan penambahan jalur *feeder*, total beban yang semula disalurkan melalui satu lintasan utama kini terbagi menjadi dua lintasan paralel. Secara teoritis, jika beban dibagi merata, arus pada masing-masing konduktor akan berkurang hingga sekitar 50%. Penurunan arus ini memberikan dampak ganda: pertama, mengurangi  $I^2R$  losses secara eksponensial (karena rugi daya berbanding kuadrat terhadap arus), dan kedua, mengurangi *voltage drop* secara linear terhadap arus [8].

Selain itu, pembagian beban juga meningkatkan faktor keandalan (*reliability factor*) jaringan distribusi. Menurut Nanzain dan Wrahatnolo (2017), sistem distribusi dengan *feeder* paralel memiliki keunggulan dalam hal manuver beban (*load transfer*), karena jika salah satu jalur mengalami gangguan atau pemeliharaan, beban dapat dialihkan ke jalur lainnya tanpa memutus suplai pelanggan, terutama pelanggan industri yang membutuhkan suplai *continuous* tanpa *interruption*.

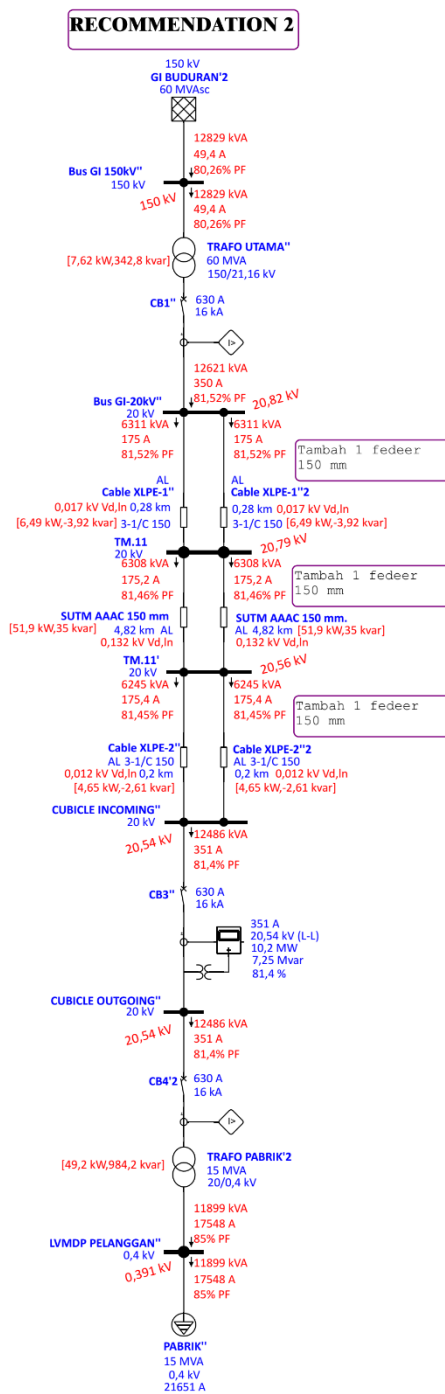
Hasil simulasi menggunakan ETAP 21.0.1 menunjukkan kinerja teknis yang sangat signifikan:

1. SUTM – Rugi daya menurun menjadi 51,89 kW per *feeder*
2. SKTM – Rugi daya menurun menjadi 6,49 kW per *feeder*
3. Trafo Utama 150 kV/20 kV – Rugi daya berkurang menjadi 7,62 kW
4. Voltage drop maksimal hanya  $\pm 1,2\%$ , jauh di bawah batas toleransi SPLN 72:1987 ( $<4\%$ )

Hasil simulasi menggunakan ETAP 21.0.1 menunjukkan bahwa penerapan Opsi 2, yaitu penambahan jalur *feeder* baru, memberikan peningkatan kinerja teknis yang signifikan pada jaringan distribusi Penyulang Keboansikep. Pada saluran udara tegangan menengah (SUTM), rugi daya berhasil ditekan menjadi hanya 51,89 kW per *feeder*, sedangkan pada saluran kabel tegangan menengah (SKTM) nilainya turun menjadi 6,49 kW per *feeder*. Sementara itu, rugi daya pada transformator utama 150 kV/20 kV juga mengalami penurunan, yaitu dari kondisi awal menjadi 7,62 kW. Penurunan ini mencerminkan efisiensi penyaluran energi listrik yang lebih baik dan distribusi arus yang lebih merata di seluruh jaringan.

Selain mengurangi rugi daya, hasil simulasi juga menunjukkan adanya perbaikan signifikan pada kualitas tegangan yang diterima beban. Nilai *voltage drop* maksimum hanya mencapai  $\pm 1,2\%$ , jauh di bawah batas toleransi yang ditetapkan dalam SPLN 72:1987, yaitu kurang dari 4%. Angka ini mendekati kondisi *ideal regulation*, di mana tegangan yang diterima pelanggan hampir sama dengan tegangan nominal yang disuplai oleh sistem. Kondisi ini menunjukkan bahwa penambahan *feeder* baru tidak hanya menekan kerugian energi, tetapi juga menjaga kestabilan tegangan di seluruh titik bus pada jaringan distribusi.

Kestabilan tegangan ini memiliki arti strategis bagi pelanggan industri besar seperti PT Pakarti Riken Indonesia. Peralatan industri skala besar sangat sensitif terhadap fluktuasi tegangan; tegangan yang terlalu rendah atau tidak stabil dapat menyebabkan penurunan kinerja mesin, kegagalan proses produksi, bahkan kerusakan permanen pada peralatan elektronik yang bernilai tinggi. Dengan penurunan *voltage drop* hingga 1,2%, Opsi 2 mampu memastikan suplai daya yang lebih andal, menjaga produktivitas industri, dan mengurangi risiko kerugian finansial akibat gangguan kualitas daya [1].



**Gambar 4** Single Line Diagram Penyulang Keboansikep Opsi 2

*Keterangan:* Diagram memperlihatkan konfigurasi dua jalur *feeder* yang masing-masing mengalirkan beban lebih kecil dibanding kondisi eksisting. Warna pada jalur dan nilai pada *bus* menunjukkan rugi daya yang rendah dan tegangan yang stabil di seluruh titik. Distribusi beban yang seimbang menghasilkan *voltage profile* yang optimal serta meminimalkan kerugian energi di sepanjang jalur distribusi.

### Perbandingan Hasil Simulasi

Untuk mengevaluasi efektivitas dari kedua skenario perbaikan, dilakukan perbandingan hasil simulasi *load flow analysis* pada ETAP 21.0.1 antara kondisi eksisting, Opsi 1, dan Opsi 2. Perbandingan mencakup parameter utama, yaitu rugi daya (*power losses*) pada Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM), Saluran Kabel Tegangan Menengah (SKTM), trafo utama, serta *voltage drop* maksimum pada sistem.

**Tabel 1** Perbandingan Rugi Daya dan *Voltage Drop* Penyulang Keboansikep

Parameter	Kondisi Eksisting	Opsi 1 – Konduktor 240 mm <sup>2</sup>	Opsi 2 – +1 Feeder (150 mm <sup>2</sup> )
Losses SUTM (kW)	211,80	129,40	51,89 ( <i>per feeder</i> )
Losses SKTM (kW)	26,52	15,97	6,49 ( <i>per feeder</i> )
Losses Trafo (kW)	7,79	7,71	7,62
Voltage Drop Maks (%)	±3,8 %	±2,5 %	±1,2 %
Beban Pelanggan (MVA)	15,00	15,00	15,00 (terbagi)

Berdasarkan hasil simulasi *ETAP 21.0.1*, perbandingan teknis antara kondisi eksisting, Opsi 1, dan Opsi 2 menunjukkan perbedaan yang cukup signifikan pada aspek rugi daya (*power losses*), penurunan tegangan (*voltage drop*), serta stabilitas dan keandalan sistem distribusi.

Dari sisi rugi daya, kondisi eksisting memiliki nilai tertinggi, terutama pada *Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM)* yang mencapai 211,80 kW. Besarnya rugi daya ini menjadi kontributor utama terhadap total kerugian energi yang dialami penyulang. Pada *Saluran Kabel Tegangan Menengah (SKTM)*, rugi daya tercatat sebesar 26,52 kW. Implementasi Opsi 1, yaitu dengan memperbesar penampang konduktor menjadi 240 mm<sup>2</sup>, mampu menurunkan rugi daya *SUTM* menjadi 129,40 kW, setara dengan penurunan sekitar 38,9% dibandingkan kondisi eksisting. Pada *SKTM*, rugi daya juga turun menjadi 15,97 kW atau berkurang 39,8%. Sementara itu, Opsi 2 yang menambahkan satu jalur *feeder* baru memberikan hasil terbaik, dengan rugi daya *SUTM* hanya 51,89 kW per feeder, atau menurun 75,5% dibandingkan eksisting. Rugi daya *SKTM* juga berkurang signifikan menjadi 6,49 kW per feeder, sehingga efisiensi energi meningkat secara substansial.

Pada aspek *voltage drop*, kondisi eksisting memiliki nilai maksimum ±3,8%, yang mendekati batas toleransi SPLN 72:1987 (<4%). Opsi 1 berhasil menurunkan *voltage drop* menjadi ±2,5%, sehingga profil tegangan di seluruh *bus* membaik meskipun belum mencapai kondisi optimal. Sebaliknya, Opsi 2 memberikan performa paling unggul dengan *voltage drop* hanya ±1,2%, mendekati tegangan nominal di seluruh titik *bus*. Hal ini berarti kualitas daya (*power quality*) yang diterima pelanggan, khususnya pelanggan industri besar, berada dalam kategori sangat baik.

Dari perspektif stabilitas dan keandalan sistem, Opsi 1 memberikan peningkatan efisiensi tanpa memerlukan perubahan konfigurasi jaringan (*network topology*), sehingga implementasinya relatif lebih mudah dan cepat dilakukan. Namun, Opsi 2 memiliki keunggulan tambahan berupa peningkatan fleksibilitas operasional. Dengan adanya dua jalur *feeder*, beban dapat dibagi secara merata dan memungkinkan terjadinya manuver beban (*load transfer*) saat dilakukan pemeliharaan atau ketika salah satu jalur mengalami gangguan. Keunggulan ini membuat Opsi 2 tidak hanya unggul dari sisi efisiensi teknis, tetapi juga dari sisi keandalan dan kontinuitas pasokan listrik (*supply continuity*).

Berdasarkan hasil analisis, Opsi 1 dapat direkomendasikan sebagai solusi jangka pendek apabila anggaran investasi yang tersedia terbatas. Hal ini disebabkan oleh kemampuannya untuk menurunkan rugi daya (*power losses*) secara signifikan dengan biaya yang relatif moderat dan waktu implementasi yang cepat. Perubahan yang dilakukan hanya berfokus pada penggantian penampang konduktor tanpa modifikasi topologi jaringan (*network topology*), sehingga risiko gangguan selama proses pekerjaan dapat diminimalkan. Walaupun tingkat efisiensi yang dihasilkan belum maksimal dibandingkan Opsi 2, Opsi 1 tetap memberikan perbaikan yang berarti terhadap profil tegangan (*voltage profile*) dan kualitas daya (*power quality*).

Sementara itu, Opsi 2 lebih sesuai direkomendasikan sebagai solusi jangka panjang, khususnya untuk mengantisipasi pertumbuhan beban di masa depan dan menjaga kualitas tegangan pada pelanggan industri besar. Dengan membagi beban melalui penambahan satu jalur *feeder* baru, opsi ini tidak hanya menurunkan rugi daya hingga titik optimal, tetapi juga memberikan peningkatan signifikan pada kestabilan tegangan di seluruh *bus*. Meskipun memerlukan investasi awal yang lebih besar dan waktu pelaksanaan yang lebih panjang, penghematan energi yang dihasilkan dapat mengimbangi biaya tersebut dalam jangka menengah hingga panjang, sekaligus meningkatkan keandalan sistem (*system reliability*).

**Tabel 2** Perbandingan *Voltage Profile* pada Kondisi *Eksisting*, Opsi 1, dan Opsi 2

No. Bus	Tegangan Eksisting (kV)	Tegangan Opsi 1 (kV)	Tegangan Opsi 2 (kV)
Bus 1	20,00	20,00	20,00
Bus 2	19,45	19,65	19,85
Bus 3	19,30	19,55	19,80
Bus 4	19,25	19,50	19,78
Bus 5	19,20	19,48	19,75
Bus 6	19,15	19,45	19,73
Bus 7	19,12	19,42	19,72
Bus 8	19,10	19,40	19,70

**Tabel 3** Perbandingan Total Rugi Daya (*Total Losses*) pada Tiga Kondisi

Komponen	Eksisting (kW)	Ops 1 – Konduktor	Ops 2 – +1 Feeder (kW)
		240 mm <sup>2</sup> (kW)	
SUTM	211,80	129,40	51,89
SKTM	26,52	15,97	6,49
Trafo Utama	7,79	7,71	7,62
Total	246,11	153,08	65,99

**Tabel 4** Persentase Penurunan Losses dan Peningkatan Tegangan Rata-Rata

Parameter	Eksisting	Ops 1 - Konduktor 240 mm <sup>2</sup>	Ops 2 - +1 Feeder	Penurunan / Peningkatan dari Eksisting
Total Losses (kW)	246,11	153,08	65,99	Ops 1: ↓ 37,8% / Ops 2: ↓ 73,2%
Rugi Daya SUTM (kW)	211,80	129,40	51,89	Ops 1: ↓ 38,9% / Ops 2: ↓ 75,5%
Rugi Daya SKTM (kW)	26,52	15,97	6,49	Ops 1: ↓ 39,8% / Ops 2: ↓ 75,5%
Tegangan Rata- Rata di Bus (kV)	19,32	19,56	19,79	Ops 1: ↑ 1,24% / Ops 2: ↑ 2,43%
Voltage Drop Maksimum (%)	±3,8 %	±2,5 %	±1,2 %	Ops 1: ↓ 34,2% / Ops 2: ↓ 68,4%

Berdasarkan Tabel 4 dapat dilihat bahwa implementasi Opsi 1 dan Opsi 2 memberikan dampak positif terhadap penurunan rugi daya (*losses*) dan peningkatan tegangan rata-rata pada seluruh bus jaringan distribusi. Pada kondisi eksisting, total *losses* mencapai 246,11 kW, dengan kontribusi terbesar berasal dari *Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM)* sebesar 211,80 kW atau sekitar 86% dari total kerugian.

Penerapan Opsi 1, yaitu penggantian konduktor menjadi 240 mm<sup>2</sup>, berhasil menurunkan total *losses* menjadi 153,08 kW atau setara dengan penurunan 37,8% dibandingkan kondisi eksisting. Penurunan yang terjadi pada *SUTM* sebesar 38,9%, sedangkan *Saluran Kabel Tegangan Menengah (SKTM)* mengalami penurunan 39,8%. Tegangan rata-

rata pada seluruh bus meningkat dari 19,32 kV menjadi 19,56 kV, dengan *voltage drop* maksimum turun dari  $\pm 3,8\%$  menjadi  $\pm 2,5\%$ .

Sementara itu, Opsi 2 yang menambahkan satu jalur *feeder* baru memberikan hasil yang jauh lebih signifikan. Total *losses* berhasil ditekan menjadi hanya 65,99 kW, setara penurunan 73,2% dibandingkan eksisting. Penurunan pada *SUTM* dan *SKTM* masing-masing mencapai 75,5%. Tegangan rata-rata meningkat menjadi 19,79 kV, dan *voltage drop* maksimum hanya  $\pm 1,2\%$ , yang berarti kualitas tegangan sangat mendekati nilai nominal 20 kV di seluruh titik bus.

Hasil ini menegaskan bahwa walaupun Opsi 2 membutuhkan biaya investasi yang lebih besar, efisiensi teknis dan kualitas daya yang dihasilkan jauh lebih baik, sehingga menjadi pilihan yang lebih tepat untuk solusi jangka panjang.

#### Analisis Ekonomi Perbandingan Opsi Perbaikan

Analisis teknis yang dilakukan sebelumnya menunjukkan adanya perbedaan signifikan dalam penurunan *losses* dan *voltage drop* antara kondisi eksisting dengan dua skenario perbaikan penyulang yang diusulkan. Namun, untuk menentukan kelayakan implementasi, diperlukan analisis ekonomi guna menilai potensi penghematan biaya energi dan periode pengembalian investasi (*payback period*).

Perhitungan ekonomi dilakukan dengan mengonversi rugi daya (*power losses*) menjadi rugi energi tahunan (*annual energy loss*) dan kemudian menghitung nilai kerugian biaya berdasarkan tarif listrik pelanggan industri besar. Asumsi yang digunakan dalam perhitungan adalah:

1. Operasi penyulang berlangsung selama 24 jam/hari dan 365 hari/tahun (*continuous operation*), sehingga total waktu operasi adalah 8.760 jam/tahun.
2. Tarif listrik untuk pelanggan industri tegangan menengah mengacu pada nilai rata-rata non-subsidi sebesar Rp 1.085,68/kWh.
3. Konversi rugi daya menjadi energi hilang tahunan dihitung dengan persamaan:

$$E_{\text{loss}} = P_{\text{loss}} \times 8.760$$

di mana:

$E_{\text{loss}}$  = Energi hilang (kWh/tahun)

$P_{\text{loss}}$  = Rugi daya (kW)

Kerugian biaya energi kemudian dihitung dengan persamaan:

Biaya Kerugian =  $E_{\text{loss}} \times \text{Tarif}$

Berdasarkan hasil simulasi ETAP dan konversi rugi daya menjadi energi tahunan, diperoleh hasil sebagaimana disajikan pada Tabel 5.

**Tabel 5** Perbandingan Rugi Energi dan Kerugian Biaya Tahunan

Kondisi	Losses Total (kW)	Energi Hilang (kWh/tahun)	Tarif (Rp/kWh)	Biaya Kerugian (Rp/tahun)
Eksisting	246,11	2.155.923,60	1.085,68	2.338.702.071,65
Opsi 1 – Konduktor 240 mm <sup>2</sup>	153,08	1.340.980,80	1.085,68	1.455.213.244,94
Opsi 2 – +1 Feeder	65,99	578.072,40	1.085,68	626.949.153,63

Kondisi eksisting menyebabkan kerugian biaya energi tahunan yang cukup besar, yaitu sekitar Rp 2,34 miliar per tahun, akibat tingginya rugi daya pada *Saluran Udara Tegangan Menengah* (*SUTM*) dan *Saluran Kabel Tegangan Menengah* (*SKTM*). Implementasi Opsi 1, yaitu penggantian konduktor menjadi 240 mm<sup>2</sup>, mampu menurunkan kerugian biaya menjadi sekitar Rp 1,46 miliar per tahun. Hal ini berarti terdapat penghematan sebesar  $\pm$ Rp 883,49 juta per tahun dibanding kondisi eksisting. Sementara itu, Opsi 2, yaitu penambahan satu jalur *feeder* baru, memberikan penghematan yang lebih signifikan. Biaya kerugian tahunan turun menjadi sekitar Rp 626,95 juta, setara dengan penghematan  $\pm$ Rp 1,71 miliar per tahun dibandingkan kondisi eksisting.

Selain menghitung penghematan tahunan, perhitungan juga dilakukan untuk mengetahui periode pengembalian investasi (*payback period*). Estimasi biaya investasi untuk Opsi 1 adalah sekitar Rp 2 miliar untuk penggantian konduktor pada jalur eksisting, sedangkan Opsi 2 membutuhkan investasi lebih besar yakni sekitar Rp 6 miliar untuk pembangunan jalur *feeder* baru lengkap dengan peralatan.

**Tabel 6** Penghematan Tahunan dan Periode Pengembalian Investasi

Kondisi pembanding	Biaya Kerugian (Rp/tahun)	Penghematan vs Eksisting (Rp/tahun)	Estimasi Investasi (Rp)	Payback Period (tahun)
Eksisting	2.338.702.071,65	—	—	—
Opsi 1 – Konduktor 240 mm <sup>2</sup>	1.455.213.244,94	883.488.826,71	2.000.000.000	2,26
Opsi 2 – +1 Feeder	626.949.153,63	1.711.752.918,02	6.000.000.000	3,50

Hasil ini menunjukkan bahwa Opsi 1 memiliki periode pengembalian investasi lebih singkat, yaitu sekitar 2,26 tahun, sedangkan Opsi 2 memerlukan waktu  $\pm 3,50$  tahun. Meskipun demikian, Opsi 2 memberikan penghematan tahunan yang lebih besar, meningkatkan kualitas tegangan, dan memperbaiki keandalan sistem distribusi. Oleh karena itu, Opsi 1 dapat direkomendasikan sebagai solusi jangka pendek ketika anggaran investasi terbatas, sedangkan Opsi 2 lebih tepat dipilih sebagai solusi jangka panjang yang berorientasi pada peningkatan kinerja dan efisiensi jaringan distribusi.

### Pembahasan

Hasil analisis menunjukkan bahwa kondisi eksisting Penyulang Keboansikep memiliki rugi daya (*power losses*) yang cukup signifikan, terutama pada jaringan SUTM sebesar 211,80 kW. Nilai ini berdampak langsung terhadap kerugian energi tahunan dan biaya operasional. Secara teori, rugi daya yang tinggi terjadi akibat tingginya impedansi saluran dan distribusi beban yang tidak merata [13]. Prinsip dasar dalam rekayasa distribusi tenaga listrik menggarisbawahi pentingnya optimasi teknis dan ekonomi untuk menekan *losses* sambil menjaga kualitas tegangan [3].

Peningkatan kapasitas penampang konduktor, sebagaimana pada Opsi 1, terbukti menurunkan resistansi dan mengurangi rugi daya hingga 38,9% pada SUTM, sejalan dengan temuan Medina & Ratnata (2021) dan Mahardiananta et al. (2020) bahwa *voltage drop* dapat ditekan melalui penggantian konduktor dengan ukuran lebih besar. Strategi ini efektif sebagai solusi jangka pendek karena tidak mengubah konfigurasi jaringan, sesuai dengan panduan konstruksi distribusi PLN [18] dan standar tegangan SPLN [7].

Opsi 2, yaitu penambahan satu *feeder* baru, memberikan penurunan rugi daya paling signifikan hingga 75,5% pada SUTM dan *voltage drop* hanya  $\pm 1,2\%$ . Pendekatan ini selaras dengan hasil studi Pratiwi & Haurissa (2023) dan Putra et al. (2024) yang menunjukkan bahwa pembagian beban melalui penambahan jalur distribusi meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem (*system reliability*), yang dapat diukur dengan indikator seperti SAIFI dan SAIDI [14]. Dalam perspektif *grand theory*, konsep ini mengacu pada optimalisasi keandalan sistem energi terintegrasi [1] yang menempatkan pengurangan kerugian energi sebagai faktor kunci dalam perencanaan jaringan.

Dari sudut pandang ekonomi, analisis ini menggunakan konversi rugi daya menjadi rugi energi tahunan (*annual energy loss*) sebagaimana metode yang digunakan Agrawal et al. (2021) dan Sugianto & Untara (2019). Dengan tarif rata-rata industri sebesar Rp 1.085,68/kWh, kondisi eksisting menyebabkan kerugian tahunan sebesar Rp 2,34 miliar. Implementasi Opsi 1 menurunkan kerugian ini menjadi Rp 1,46 miliar (hemat  $\pm$  Rp 883 juta/tahun), sedangkan Opsi 2 menurunkannya menjadi Rp 626 juta (hemat  $\pm$  Rp 1,71 miliar/tahun). Estimasi *payback period* menunjukkan Opsi 1 dapat balik modal dalam  $\pm 2,26$  tahun, sedangkan Opsi 2 memerlukan  $\pm 3,50$  tahun, namun memberikan penghematan jangka panjang yang lebih besar.

Kaitannya dengan teori *reliability engineering*, Li et al. (2024) menjelaskan bahwa perbaikan infrastruktur yang mengurangi rugi daya sekaligus memperbaiki *voltage profile* akan berdampak pada peningkatan *system average interruption frequency index* (SAIFI) dan *system average interruption duration index* (SAIDI), sehingga pelayanan kepada pelanggan menjadi lebih andal. Hal ini diperkuat oleh Jamaaluddin et al. (2019) yang menekankan pentingnya pengelolaan beban puncak melalui optimalisasi jalur distribusi untuk menghindari *overload* yang berpotensi memicu pemadaman.

Selain itu, penurunan rugi daya yang signifikan pada Opsi 2 dapat mendukung strategi jangka panjang pengembangan sistem distribusi berbasis konsep *smart grid*, di mana efisiensi energi, keandalan, dan fleksibilitas jaringan menjadi indikator utama [17] [18]. Dengan mempertimbangkan teori, hasil simulasi, dan analisis ekonomi, dapat disimpulkan bahwa Opsi 1 layak diterapkan sebagai solusi jangka pendek dengan biaya moderat, sedangkan Opsi 2 merupakan strategi jangka panjang yang lebih unggul dalam aspek teknis, keandalan, dan keberlanjutan operasi.

Dengan mempertimbangkan aspek teknis, ekonomi, dan keandalan, dapat disimpulkan bahwa Opsi 1 tepat sebagai solusi sementara ketika keterbatasan anggaran menjadi faktor pembatas, sedangkan Opsi 2 merupakan strategi jangka panjang yang lebih unggul dalam menekan kerugian energi, menjaga kualitas tegangan, serta meningkatkan keandalan sistem distribusi tenaga listrik secara keseluruhan.

#### IV. SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, kondisi eksisting penyulang menunjukkan rugi daya total sebesar 246,11 kW dengan voltage drop maksimum  $\pm 3,8\%$ . Penerapan Opsi 1, yaitu memperbesar penampang konduktor menjadi 240 mm<sup>2</sup>, mampu menurunkan rugi daya menjadi 153,08 kW dan voltage drop menjadi  $\pm 2,5\%$ , sehingga menghasilkan penghematan biaya energi sekitar Rp 896 juta per tahun. Sementara itu, Opsi 2, yaitu penambahan satu feeder baru, memberikan hasil paling optimal dengan rugi daya hanya 65,99 kW, voltage drop  $\pm 1,2\%$ , dan penghematan biaya energi mencapai sekitar Rp 1,73 miliar per tahun. Kedua opsi terbukti efektif menurunkan rugi daya dan meningkatkan kualitas tegangan, dengan perbedaan pada besaran investasi dan dampak jangka panjangnya.

#### V. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada pegawai dan manajemen PT PLN (Persero) UP3 Sidoarjo atas kesempatan untuk melakukan penelitian dan mengakses data yang diberikan. Ucapan terima kasih juga kepada Dosen Pembimbing dan semua Dosen Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Sidoarjo atas ilmu yang diberikan dan dukungan dalam melakukan penelitian ini.

#### VI. REFERENSI

- [1] D. Li, P. Xu, J. Gu, dan Y. Zhu, "A review of reliability research in regional integrated energy system: Indicator, modeling, and assessment methods," *Buildings*, vol. 14, no. 11, hal. 3428, 2024, [Daring]. Tersedia pada: <https://doi.org/10.3390/buildings14113428>
- [2] D. A. Maulana, U. Latifa, T. Elektro, S. Karawang, J. H. Ronggo Waluyo, dan I. Karawang, "Analisa pembangunan gardu jenis cantol guna menunjang pasang baru daya 66 kVA di PT PLN (Persero)-Karawang Kota," 2025.
- [3] A. S. Pabla dan A. Hadi, *Sistem distribusi daya listrik*. Erlangga, 1994.
- [4] B. I. Putra, M. I. Arsyad, dan F. Fitriah, "Analisis rugi-rugi daya dan karakteristik penyulang pada jaringan distribusi 20 kV di Gardu Induk Sungai Raya," *COMSERVA J. Penelit. dan Pengabd. Masy.*, vol. 4, no. 7, hal. 2141–2152, 2024, [Daring]. Tersedia pada: <https://doi.org/10.59141/comserva.v4i7.2604>
- [5] A. Kadir, *Electric power distribution*. UI-Press, 2000.
- [6] P. Sugianto, SUNtara, "Studi susut energi pada sistem distribusi tenaga listrik melalui analisis pengukuran dan perhitungan," *SINUSOIDA*, vol. 21, no. 2, hal. 39–56, 2019, [Daring]. Tersedia pada: <https://doi.org/10.37277/s.v21i2.686>
- [7] P. P. (Persero), *SPLN No. 1:1995: Tegangan–tegangan standar*. Direktorat Distribusi, PT PLN (Persero), 1995.
- [8] I. M. A. Mahardiananta, P. A. R. Arimbawa, dan D. A. . Santiari, "Perhitungan drop tegangan sistem distribusi menggunakan metode aliran daya," *J. Resist.*, vol. 3, no. 1, hal. 13–18, 2020.
- [9] M. Irsyam, M. Algusri, L. P. Marpaung, K. Kunci, dan P. Lvmdp, "Analisa rugi-rugi daya (losses power) pada jaringan tegangan rendah PT. Musimmas Batam," *Sigma Tek.*, vol. 6, no. 1, hal. 109–119, 2023.
- [10] Suhadi, *Teknik distribusi tenaga listrik jilid 1*. Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan, Direktorat Jenderal Manajemen Pendidikan Dasar dan Menengah, Departemen Pendidikan Nasional, 2008.
- [11] R. W. Pratiwi dan M. A. F. Haurissa, "Analisa rugi daya berbasis ETAP pada jaringan distribusi 20 kV penyulang Ahuru," *J. ELKO (Elektrikal dan Komputer)*, vol. 4, no. 1, 2023, [Daring]. Tersedia pada: <https://doi.org/10.54463/je.v4i1.84>
- [12] S. Nanzain dan T. Wrahatnolo, "Evaluasi keandalan sistem jaringan distribusi 20 kV menggunakan metode reliability network equivalent approach (RNEA) di PT. PLN Rayon Mojokerto," *J. Tek. Elektro*, vol. 6, no. 2, hal. 111–119, 2017.

- [13] N. Agrawal, O. P. Thakur, dan A. K. Singh, "Analysis of electromechanical properties of electrode for enhancing electrostrictive capacitive sensor response," *Mater. Today Proc.*, vol. 47, no. 1621–1626, 2021, [Daring]. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.320>
- [14] A. Arismunandar dan S. Kuwahara, *Power (mechanics)*. Pradnya Paramita, 1979.
- [15] C.-W. Ten dan A. Mehrizi-Sani, *Electric power distribution engineering*. CRC Press, 2024. [Daring]. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1201/9781003129721>
- [16] A. L. Febrianingrum dan S. Pramono, "SAIFI untuk evaluasi keandalan sistem distribusi tenaga listrik pada jaringan transmisi menengah 20 kV," *Maj. Ilm. Teknol. Elektro*, vol. 21, no. 1, hal. 1, 2022, [Daring]. Tersedia pada: <https://doi.org/10.24843/MITE.2022.v21i01.P01>
- [17] Jamaaluddin, I. Robandi, dan I. Shory, "A very short-term load forecasting in time of peak loads using interval type-2 fuzzy inference system: A case study on java bali electrical system," *J. Eng. Sci. Technol.*, vol. 14, no. 1, hal. 464–478, 2019.
- [18] & P. P. S. dan T. U. I. Kelompok Kerja Standar Konstruksi Distribusi Jaringan Tenaga Listrik, *Standar konstruksi jaringan tegangan menengah tenaga listrik (Edisi 1)*. PT PLN (Persero), 2010.

**Conflict of Interest Statement:**

*The author declares that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.*