Journal of Authentic Research
https://journal-center.litpam.com/index.php/jar/index

November 2026 Vol. 5, No. 4
e-ISSN: 2828-3724
pp. 7950-7967

Analisis Tekno Ekonomi Rekonfigurasi Penyulang Walikukun 20 kV melalui Integrasi GI Ngawi dan GI Sragen

[1] Fiqar Hanurcantyo, [2] Zainal Arifin
[1,2] Program Studi Teknik Elektro, Institut Teknologi PLN. Jl. Duri Cengkareng Raya No.3, RT.1/RW.1, Duri Kosambi, Kecamatan Cengkareng, Kota Jakarta Barat, Daerah Khusus Ibukota Jakarta 11750 Indonesia
*Corresponding Author e-mail: fhanurcantyo@gmail.com

Received: September 2026; Revised: October 2026; Published: November 2026

Abstrak

Sistem distribusi tenaga listrik 20 kV pada penyulang Walikukun menghadapi permasalahan berupa penurunan tegangan dan tingginya rugi-rugi daya akibat panjang jaringan dan distribusi beban yang tidak optimal. Kondisi tersebut berpotensi menurunkan efisiensi sistem distribusi serta meningkatkan kehilangan energi. Penelitian ini bertujuan menganalisis kondisi eksisting jaringan 20 kV, mengevaluasi strategi rekonfigurasi jaringan melalui integrasi suplai Gardu Induk (GI) Ngawi dan GI Sragen, serta menganalisis kelayakan teknis dan ekonomi dari rekonfigurasi tersebut. Analisis teknis dilakukan menggunakan ETAP 21.0.1 dengan metode Newton-Raphson melalui simulasi aliran daya (load flow analysis). Analisis ekonomi dilakukan menggunakan pendekatan Life Cycle Cost (LCC), Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), Benefit Cost Ratio (BCR), dan Payback Period. Hasil simulasi kondisi awal menunjukkan tegangan pada Bus1177 sebesar 14,88 kV dengan penurunan tegangan sebesar 25,56%, sedangkan rugi-rugi daya penyulang mencapai 1.097 kW atau 20,93%. Rekonfigurasi dilakukan melalui pemecahan beban dan pengalihan sebagian beban ke GI Sragen menggunakan LBS Widodaren22. Setelah rekonfigurasi, tegangan Bus1177 meningkat menjadi 18,79 kV dengan penurunan tegangan 6,015%, sedangkan rugi-rugi daya turun menjadi 346 kW atau 6,6%, atau berkurang sebesar 751 kW (68,46%). Energi yang terselamatkan diperkirakan sebesar 3.483.129,45 kWh dengan nilai penghematan sebesar Rp2.650.661.514. Analisis ekonomi menunjukkan investasi sebesar Rp15.883.163.267, NPV sebesar Rp4.571.350.256, IRR 11,43%, BCR 1,28, dan Payback Period 7 tahun 5 bulan. Berdasarkan parameter yang digunakan, rekonfigurasi jaringan memberikan peningkatan kinerja teknis dan memenuhi kriteria kelayakan finansial yang digunakan dalam penelitian.

Kata kunci: Rekonfigurasi Jaringan, Newton-Raphson, Etap, Rugi-Rugi Daya, Techno Economic Analysis.

Techno Economic Analysis of the 20 kV Walikukun Feeder Reconfiguration through the Integration of Ngawi Substation and Sragen Substation

Abstract

The 20 kV electrical distribution system of the Walikukun feeder faces voltage drop and high power losses due to the long distribution network and suboptimal load allocation. These conditions may reduce distribution system efficiency and increase energy losses. This study aims to analyze the existing 20 kV distribution network, evaluate a reconfiguration strategy by integrating supply from the Ngawi and Sragen Substations, and assess the technical and economic feasibility of the proposed reconfiguration. The technical analysis was conducted using ETAP 21.0.1 with the Newton-Raphson method through load flow analysis. The economic analysis employed Life Cycle Cost (LCC), Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), Benefit Cost Ratio (BCR), and Payback Period approaches. Initial simulation results showed a voltage at Bus1177 of 14.88 kV, corresponding to a 25.56% voltage drop, while total feeder power losses reached 1,097 kW (20.93%). The network reconfiguration was implemented through load splitting and the transfer of part of the load to the Sragen Substation using LBS Widodaren22. After reconfiguration, the voltage at Bus1177 increased to 18.79 kV, with the voltage drop decreasing to 6.015%. Total power losses decreased to 346 kW or 6.6%, representing a reduction of 751 kW (68.46%). The estimated energy saving reached 3,483,129.45 kWh, with an estimated saving value of IDR 2,650,661,514. The economic analysis resulted in an investment requirement of IDR 15,883,163,267, an NPV of IDR 4,571,350,256, an IRR of 11.43%, a BCR of 1.28, and a Payback Period of 7 years and 5 months. Based on the parameters applied in this study, the network reconfiguration improves the technical performance of the distribution system and meets the financial feasibility criteria applied in the analysis.

Keywords: *Network Reconfiguration, Newton-Raphson, Etap, Power Losses, Techno-Economic Analysis.*

How to Cite: Hanurcantyo, F., & Arifin, Z. (2026). Analisis Tekno Ekonomi Rekonfigurasi Penyulang Walikukun 20 kV melalui Integrasi GI Ngawi dan GI Sragen. *Journal of Authentic Research*, *5*(4), 7950-7967. https://journal-center.litpam.com/index.php/jar/article/view/6980

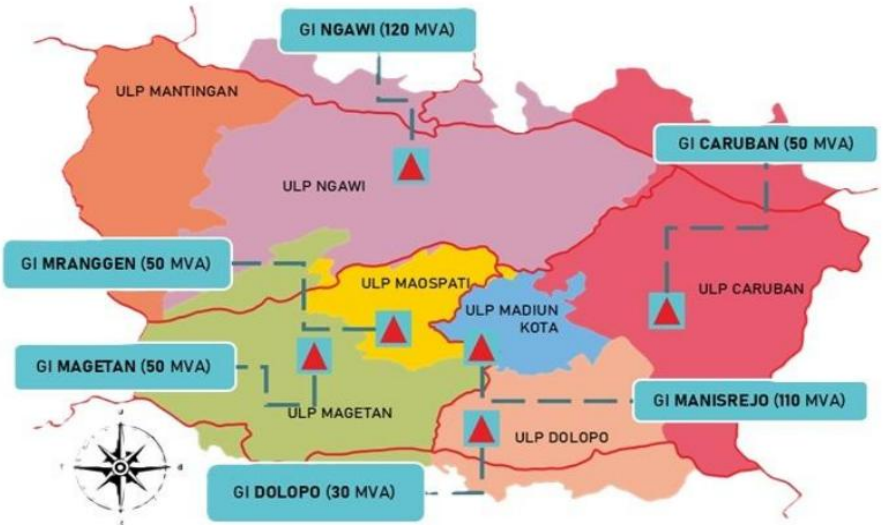
https://journal-center.litpam.com/index.php/jar/article/view/6980

Copyright© 2026, Hanurcantyo et al.
This is an open-access article under the CC-BY-SA License.

PENDAHULUAN

Listrik telah menjadi sumber energi utama yang mendukung berbagai aktivitas masyarakat pada era modern. Oleh sebab itu, penyelenggaraan sistem distribusi tenaga listrik perlu dilakukan secara andal agar pasokan energi kepada konsumen tetap terjaga. Pada sistem ketenagalistrikan, proses penyediaan listrik melibatkan tahapan pembangkitan, transmisi, dan distribusi yang saling terintegrasi hingga energi listrik diterima oleh pelanggan. Kinerja sistem distribusi yang baik berperan penting dalam menjamin kontinuitas pelayanan serta mendukung pemanfaatan energi listrik secara efisien sesuai dengan kebutuhan masyarakat.

Efisiensi jejaring ketenagalistrikan nasional berdampak langsung terhadap keberlanjutan pasokan energi, biaya operasional, dan keandalan distribusi. Listrik menentukan daya saing daerah dan pemerataan kesejahteraan, sehingga optimalisasi jaringan menjadi tantangan utama bagi PT PLN (Persero). Kondisi geografis Indonesia yang kompleks menyebabkan penyediaan listrik efisien sulit dicapai, dengan rugi daya nasional masih berkisar 8–10% (ESDM, 2024).



Gambar 1. Gardu Induk Wilayah UP3 Madiun, sumber (PLN UP3 Madiun, 2024)

Untuk mengatasi hal ini, pemerintah melalui Rencana Umum Ketenagalistrikan Nasional (RUKN) mengembangkan proyek *Indonesia Super Grid*, yaitu jaringan transmisi tegangan tinggi yang menghubungkan wilayah berpotensi energi terbarukan dengan pusat beban utama. Integrasi ini diharapkan dapat menekan biaya penyediaan listrik, mengurangi ketergantungan pada pembangkit lokal yang tidak efisien, serta memperluas akses energi menuju target *Net Zero Emission* 2060 (PLN, 2023).

Fenomena ketidakefisienan jaringan juga muncul di daerah-daerah perbatasan administratif provinsi di Pulau Jawa, termasuk Kabupaten Ngawi di Jawa Timur. Kabupaten Ngawi terletak di ujung barat provinsi dan berbatasan langsung dengan Kabupaten Sragen di Jawa Tengah. Berdasarkan peta jaringan PLN, sebagian besar wilayah Ngawi memperoleh pasokan listrik dari jaringan distribusi dan transmisi yang bersumber dari sistem Jawa Timur. Padahal, secara jarak, beberapa wilayah Ngawi lebih dekat dengan jaringan gardu induk di Sragen. Kondisi ini menimbulkan paradoks efisiensi jalur transmisi dari Jawa Timur yang lebih panjang berpotensi menimbulkan rugi daya yang lebih tinggi, meningkatkan biaya operasional, dan memperbesar voltage drop pada ujung beban (PLN UID Jawa Timur, 2024).

Penyaluran daya listrik ke wilayah Mantingan, Kabupaten Ngawi melalui saluran udara tegangan menengah sebesar 20 kV dengan sumber utama pasokan listrik Gardu Induk Ngawi 150 kV melalui Penyulang Walikukun dengan panjang jaringan mencapai 134 km. Kondisi tersebut menyebabkan terjadinya penurunan tegangan pada jaringan distribusi 20 kV hingga mencapai nilai 14,88 kV, melebihi batas toleransi yang ditetapkan dalam standar SPLN T6.001:2013, yaitu maksimum 10%. Selain itu, beban pada Penyulang Walikukun telah mencapai 80%, sehingga meningkatkan risiko penurunan kualitas daya. Upaya perbaikan telah dilakukan, antara lain dengan menaikkan tap trafo, menambahkan kapasitor bank di titik-titik dengan tegangan terendah, serta melakukan rekonfigurasi jaringan melalui Penyulang Sidolaju. Namun, langkah-langkah tersebut belum memberikan hasil optimal karena Penyulang Sidolaju juga mengalami penurunan tegangan akibat panjang jaringan yang berlebihan, sehingga perbaikan tegangan secara signifikan masih belum tercapai.

Landasan teori dan penelitian terdahulu yang berkaitan dengan analisis tekno-ekonomi sistem kelistrikan 20 kV, khususnya rekonfigurasi jaringan distribusi antara Kabupaten Ngawi, Jawa Timur, dan Kabupaten Sragen, Jawa Tengah. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa integrasi jaringan, penambahan gardu induk, optimasi konfigurasi, serta pemanfaatan distributed generation dapat meningkatkan efisiensi penyaluran energi, memperbaiki keandalan sistem, dan mengurangi rugi-rugi daya. Namun, sebagian besar penelitian masih berfokus pada optimasi jaringan dalam satu wilayah atau evaluasi pembangunan infrastruktur kelistrikan. Oleh karena itu, penelitian ini mengembangkan kajian rekonfigurasi jaringan distribusi 20 kV lintas provinsi dengan mengintegrasikan evaluasi teknis dan ekonomi untuk memperoleh konfigurasi jaringan yang lebih efisien.

Sistem distribusi tenaga listrik terdiri atas jaringan distribusi primer bertegangan menengah, umumnya 20 kV, dan jaringan distribusi sekunder yang menyalurkan listrik dari gardu distribusi kepada konsumen. Kinerja jaringan distribusi dipengaruhi oleh panjang saluran, resistansi penghantar, karakteristik beban, faktor daya, serta konfigurasi jaringan. Analisis aliran daya digunakan untuk mengevaluasi profil tegangan, arus, aliran daya aktif dan reaktif, pembebanan peralatan, serta rugi-rugi daya. Secara teknis, rugi daya pada penghantar berkaitan dengan kuadrat arus dan resistansi penghantar, sehingga jaringan yang panjang dan memiliki pembebanan tinggi berpotensi meningkatkan kehilangan energi dan penurunan tegangan. Rekonfigurasi jaringan menjadi salah satu alternatif optimalisasi melalui perubahan jalur aliran daya menggunakan peralatan switching, dengan mempertimbangkan batas tegangan, kapasitas penghantar, kapasitas transformator, dan keandalan operasi sistem.

Analisis aliran daya dalam penelitian ini menggunakan metode Newton-Raphson melalui perangkat lunak ETAP. Metode tersebut menyelesaikan persamaan aliran daya nonlinier secara iteratif dengan memanfaatkan matriks Jacobian hingga selisih antara daya yang dijadwalkan dan daya hasil perhitungan memenuhi batas toleransi. Pendekatan ini digunakan untuk membandingkan kondisi jaringan sebelum dan sesudah rekonfigurasi, terutama berdasarkan perubahan profil tegangan dan rugi-rugi daya. Selanjutnya, evaluasi tekno-ekonomi dilakukan untuk menilai kelayakan penerapan konfigurasi jaringan yang diusulkan dengan mempertimbangkan biaya siklus hidup (Life Cycle Cost), Net Present Value (NPV),

Internal Rate of Return (IRR), Benefit Cost Ratio (BCR), dan Payback Period. Integrasi analisis teknis dan ekonomi tersebut menjadi dasar untuk menentukan apakah rekonfigurasi jaringan 20 kV antara Ngawi dan Sragen mampu meningkatkan efisiensi sistem sekaligus memberikan manfaat finansial yang layak.

Penelitian mengenai rekonfigurasi jaringan distribusi tenaga listrik terus berkembang, terutama dalam upaya meningkatkan efisiensi operasional melalui pengurangan rugi-rugi daya, perbaikan profil tegangan, dan pemerataan pembebanan jaringan. Salyani et al. (2022) mengembangkan model penempatan switch pada jaringan distribusi dengan mempertimbangkan kapasitas gardu induk yang berdekatan ketika proses transfer beban dilakukan. Kajian tersebut menunjukkan bahwa transfer beban tidak dapat hanya didasarkan pada perubahan konfigurasi jaringan, tetapi juga perlu mempertimbangkan kemampuan sumber pasokan dalam menerima tambahan beban. Dengan demikian, kapasitas gardu induk dan pembebanan jaringan menjadi aspek penting dalam perencanaan rekonfigurasi.

Dari sisi evaluasi teknis, Jayabarathi et al. (2024) mengkaji pengaruh rekonfigurasi jaringan, penempatan pembangkit tersebar, dan kapasitor bank terhadap minimisasi rugi-rugi daya serta perbaikan profil tegangan. Penelitian tersebut menggunakan sistem distribusi standar IEEE 33-bus dan 69-bus serta jaringan aktual 83-bus. Sementara itu, Behbahani et al. (2024) mengelompokkan pendekatan rekonfigurasi jaringan ke dalam metode klasik, heuristik, metaheuristik, hibrida, dan berbasis machine learning. Kajian tersebut memperlihatkan bahwa pemilihan metode rekonfigurasi perlu disesuaikan dengan karakteristik jaringan, peralatan switching, serta tujuan operasi yang ingin dicapai. Lotfi et al. (2024) juga menegaskan bahwa rekonfigurasi jaringan distribusi berperan dalam mengurangi rugi-rugi daya, memperbaiki profil tegangan, menyeimbangkan beban, dan meningkatkan keandalan jaringan.

Manfaat ekonomi dari perubahan konfigurasi jaringan juga menjadi perhatian dalam penelitian terdahulu. Lawal et al. (2023) mengevaluasi manfaat biaya dari rekonfigurasi jaringan dan kompensasi shunt pada sistem distribusi 33 kV. Penelitian tersebut membandingkan konsekuensi ekonomi dari beberapa alternatif perbaikan jaringan berdasarkan periode pengembalian investasi. Selanjutnya, Neda (2025) mengembangkan pendekatan rekonfigurasi sistem distribusi untuk meningkatkan manfaat tekno-ekonomi melalui evaluasi pengurangan rugi daya, perbaikan profil tegangan, dan penghematan biaya energi. Hasil-hasil penelitian tersebut memperlihatkan pentingnya menghubungkan perubahan kinerja teknis jaringan dengan manfaat ekonomi yang dihasilkan.

Meskipun penelitian terdahulu telah membahas rekonfigurasi jaringan, transfer beban, perbaikan profil tegangan, dan pengurangan rugi-rugi daya, masih terdapat ruang kajian pada penerapan pemecahan beban antargardu induk dalam jaringan distribusi aktual yang mengintegrasikan evaluasi teknis dan ekonomi secara bersamaan. Penelitian ini mengisi ruang kajian tersebut melalui analisis rekonfigurasi Penyulang Walikukun 20 kV dengan mengintegrasikan pasokan GI Ngawi dan GI Sragen menggunakan LBS Widodaren22. Berbeda dari kajian yang berorientasi pada optimasi algoritma di jaringan uji standar, penelitian ini mengevaluasi skenario pemecahan beban pada jaringan operasional yang mencakup 121 gardu distribusi dan panjang jaringan sekitar 134 km. Evaluasi dilakukan melalui perbandingan kondisi sebelum dan sesudah rekonfigurasi berdasarkan profil tegangan dan rugi-rugi daya,

kemudian dilanjutkan dengan penilaian ekonomi menggunakan indikator LCC, NPV, IRR, BCR, dan Payback Period. Dengan pendekatan tersebut, penelitian ini memberikan kontribusi berupa evaluasi berbasis kasus aktual untuk mendukung pertimbangan teknis dan ekonomi dalam perencanaan integrasi pasokan antargardu induk.

Penelitian mengenai rekonfigurasi jaringan distribusi tenaga listrik telah banyak dilakukan sebagai salah satu upaya untuk meningkatkan kualitas penyaluran energi, memperbaiki profil tegangan, dan mengurangi rugi-rugi daya. Secara umum, kajian terdahulu berfokus pada optimalisasi konfigurasi jaringan melalui perubahan status peralatan switching, pengaturan aliran daya, penambahan sumber pasokan, maupun pemanfaatan pembangkit tersebar (distributed generation). Pendekatan tersebut menunjukkan bahwa perubahan konfigurasi jaringan dapat memengaruhi distribusi arus dan aliran daya pada saluran, sehingga berpotensi meningkatkan efisiensi operasional sistem distribusi. Meskipun demikian, evaluasi rekonfigurasi tidak hanya perlu mempertimbangkan pencapaian parameter teknis, tetapi juga implikasi biaya investasi dan manfaat ekonomi yang dihasilkan dari perubahan konfigurasi tersebut.

Kesenjangan penelitian (research gap) yang menjadi dasar kajian ini terletak pada masih terbatasnya pembahasan yang mengintegrasikan pemecahan beban antargardu induk melalui pemanfaatan peralatan Load Break Switch (LBS) dengan evaluasi teknis dan ekonomi secara terpadu pada jaringan distribusi aktual berskala luas. Secara khusus, penelitian ini mengkaji jaringan Penyulang Walikukun 20 kV yang memiliki panjang jaringan sekitar 134 km dan mencakup 121 gardu distribusi. Permasalahan jaringan tersebut ditangani melalui skenario pembagian pasokan antara Gardu Induk (GI) Ngawi dan GI Sragen dengan memanfaatkan LBS Widodaren22. Dalam skenario rekonfigurasi, sebanyak 80 gardu distribusi dialihkan ke penyulang baru yang memperoleh pasokan dari GI Sragen, sedangkan 41 gardu distribusi tetap memperoleh pasokan dari GI Ngawi. Karakteristik tersebut memberikan konteks analisis yang berbeda dari kajian rekonfigurasi yang hanya mengevaluasi perubahan konfigurasi dalam satu jaringan atau berdasarkan optimasi parameter teknis tanpa menghubungkannya secara langsung dengan konsekuensi ekonominya.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, kontribusi utama penelitian ini adalah penyusunan evaluasi tekno-ekonomi terhadap skenario rekonfigurasi jaringan distribusi 20 kV melalui integrasi pasokan GI Ngawi dan GI Sragen. Evaluasi teknis dilakukan dengan membandingkan kondisi sebelum dan sesudah rekonfigurasi berdasarkan profil tegangan dan rugi-rugi daya melalui simulasi aliran daya menggunakan perangkat lunak ETAP. Selanjutnya, hasil teknis tersebut dihubungkan dengan evaluasi ekonomi menggunakan pendekatan Life Cycle Cost (LCC), Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), Benefit Cost Ratio (BCR), dan Payback Period. Dengan demikian, kontribusi penelitian tidak terletak pada pengembangan metode perhitungan aliran daya baru, melainkan pada penerapan kerangka evaluasi terpadu untuk menilai dampak pemecahan beban antargardu induk terhadap kinerja teknis dan kelayakan ekonomi jaringan distribusi 20 kV. Hasil kajian diharapkan dapat menjadi bahan pertimbangan dalam perencanaan rekonfigurasi jaringan dan pengambilan keputusan investasi pada sistem distribusi tenaga listrik.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode simulasi teknis dan analisis tekno-ekonomi untuk mengevaluasi rekonfigurasi jaringan distribusi tenaga listrik 20 kV antara Kabupaten Ngawi, Jawa Timur, dan Kabupaten Sragen, Jawa Tengah. Fokus penelitian adalah menganalisis kondisi eksisting penyulang Walikukun, mengevaluasi alternatif integrasi pasokan dari Gardu Induk (GI) Ngawi dan GI Sragen, serta menilai dampak rekonfigurasi terhadap profil tegangan, rugi-rugi daya, efisiensi penyaluran energi, dan kelayakan investasi. Pendekatan ini mengintegrasikan evaluasi kinerja sistem kelistrikan dengan perhitungan ekonomi untuk menentukan alternatif konfigurasi jaringan yang lebih efisien dan layak diterapkan.

Penelitian dilaksanakan di wilayah kerja PT PLN (Persero) ULP Mantingan, Kabupaten Ngawi, yang termasuk dalam wilayah kerja PT PLN (Persero) UP3 Madiun. Pelaksanaan penelitian direncanakan selama enam bulan, yaitu Maret hingga Agustus 2026. Tahapan penelitian meliputi pengumpulan data, pemodelan jaringan, simulasi aliran daya, analisis dan validasi hasil, serta penyusunan rekomendasi. Objek penelitian adalah jaringan distribusi 20 kV penyulang Walikukun beserta alternatif rekonfigurasi melalui integrasi jaringan dengan wilayah Sragen untuk memperbaiki kondisi operasi sistem kelistrikan.

Pengumpulan data dilakukan melalui studi literatur dan studi lapangan. Studi literatur mencakup jurnal ilmiah, penelitian terdahulu, serta dokumen dan laporan resmi yang berkaitan dengan sistem distribusi tenaga listrik dan perencanaan jaringan. Data primer diperoleh melalui observasi kondisi jaringan dan pengumpulan informasi teknis terkait sistem eksisting, sedangkan data sekunder berasal dari dokumen PLN, data jaringan, dan referensi pendukung. Data yang digunakan meliputi diagram satu garis (Single Line Diagram), parameter tegangan, impedansi saluran, kapasitas transformator, karakteristik dan pembebanan jaringan, serta informasi biaya investasi dan operasional yang diperlukan untuk analisis tekno-ekonomi.

Data yang terkumpul selanjutnya divalidasi dan diinventarisasi untuk memastikan kesesuaian parameter sebelum digunakan dalam pemodelan sistem. Jaringan distribusi direpresentasikan melalui diagram satu garis (Single Line Diagram/SLD) yang menggambarkan hubungan antarkomponen, sumber pasokan, saluran, transformator, dan titik beban. Berdasarkan model tersebut, disusun skenario rekonfigurasi melalui perubahan konfigurasi jaringan dan pengalihan sebagian beban dari GI Ngawi ke GI Sragen. Salah satu alternatif yang dievaluasi adalah penggunaan Load Break Switch (LBS) Widodaren22 untuk mendukung pemisahan beban dan integrasi pasokan. Setiap skenario kemudian dibandingkan dengan kondisi eksisting untuk mengidentifikasi perubahan kinerja teknis jaringan.

Analisis teknis dilakukan menggunakan perangkat lunak ETAP versi 21.0.1 melalui modul Load Flow Analysis dengan metode Newton–Raphson. Simulasi digunakan untuk memperoleh profil tegangan pada setiap bus, aliran daya aktif dan reaktif, arus saluran, pembebanan transformator, serta rugi-rugi daya. Metode Newton–Raphson menyelesaikan persamaan aliran daya nonlinier secara iteratif melalui perhitungan selisih antara daya yang dijadwalkan dan daya hasil perhitungan hingga mencapai batas toleransi. Evaluasi kinerja dilakukan dengan membandingkan tegangan dan rugi-rugi daya sebelum dan sesudah rekonfigurasi,

serta memeriksa kesesuaiannya terhadap batas operasional yang digunakan dalam penelitian, termasuk standar tegangan dan kapasitas jaringan. Hasil perbandingan tersebut menjadi dasar untuk menentukan skenario yang paling efektif secara teknis.

Analisis tekno-ekonomi dilakukan untuk menilai kelayakan finansial dari skenario rekonfigurasi yang memberikan perbaikan teknis. Analisis Life Cycle Cost (LCC) digunakan untuk memperhitungkan biaya investasi serta biaya operasi dan pemeliharaan selama umur proyek. Kelayakan investasi selanjutnya dievaluasi menggunakan Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), Benefit Cost Ratio (BCR), dan Payback Period. Perhitungan dilakukan berdasarkan estimasi biaya investasi, manfaat ekonomi dari pengurangan rugi-rugi daya, arus kas proyek, tingkat diskonto, dan periode analisis. Hasil evaluasi teknis dan ekonomi kemudian diintegrasikan untuk menentukan kelayakan rekonfigurasi jaringan distribusi 20 kV antara Ngawi dan Sragen serta menyusun rekomendasi bagi perencanaan dan pengembangan sistem distribusi tenaga listrik.

Batas sistem (system boundary) penelitian mencakup jaringan distribusi Penyulang Walikukun pada kondisi eksisting serta pengembangan konfigurasi jaringan melalui integrasi pasokan dari Gardu Induk (GI) Ngawi dan GI Sragen. Sistem eksisting memperoleh pasokan dari GI Ngawi melalui Trafo 2, sedangkan sistem setelah rekonfigurasi menggunakan dua sumber pasokan, yaitu GI Ngawi dan GI Sragen. Jaringan yang dianalisis memiliki tegangan nominal 20 kV, panjang keseluruhan sekitar 134 km, dan melayani 121 gardu distribusi. Data teknis yang digunakan dalam pemodelan meliputi diagram satu garis (Single Line Diagram), konfigurasi jaringan, parameter tegangan, impedansi saluran, karakteristik penghantar, kapasitas transformator, serta data pembebanan pada gardu distribusi. Pengembangan konfigurasi dilakukan melalui pemecahan beban (load splitting) dengan memanfaatkan Load Break Switch (LBS) Widodaren22. Pada skenario setelah rekonfigurasi, sebanyak 41 gardu distribusi memperoleh pasokan dari GI Ngawi, sedangkan 80 gardu distribusi dialihkan ke jaringan baru yang memperoleh pasokan dari GI Sragen. Perubahan konfigurasi tersebut dianalisis untuk mengetahui pengaruh pembagian beban terhadap profil tegangan, aliran daya, pembebanan jaringan, dan rugi-rugi daya.

Unit analisis teknis meliputi tegangan pada setiap bus, aliran daya aktif dan reaktif, arus pada saluran, pembebanan transformator, serta rugi-rugi daya total sistem. Seluruh parameter dianalisis menggunakan modul Load Flow Analysis pada ETAP 21.0.1 dengan metode Newton–Raphson. Evaluasi dilakukan melalui perbandingan dua kondisi utama, yaitu kondisi eksisting sebelum rekonfigurasi dan kondisi setelah penerapan skenario integrasi pasokan GI Ngawi–GI Sragen. Hasil simulasi selanjutnya digunakan sebagai dasar analisis ekonomi melalui pendekatan Life Cycle Cost (LCC), Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), Benefit Cost Ratio (BCR), dan Payback Period.

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis pemodelan dan simulasi sistem tenaga listrik dengan objek penelitian berupa jaringan distribusi 20 kV Penyulang Walikukun di wilayah kerja PT PLN (Persero) UP3 Madiun. Unit analisis penelitian mencakup komponen dan parameter operasi jaringan yang dimodelkan menggunakan perangkat lunak ETAP 21.0.1, meliputi bus, saluran distribusi, 121 gardu distribusi, transformator, penghantar, serta sumber pasokan listrik. Sistem yang dianalisis memiliki panjang jaringan sekitar 134 km dengan

kondisi awal seluruh beban disuplai dari Gardu Induk (GI) Ngawi melalui Trafo 2, sedangkan konfigurasi setelah rekonfigurasi mengintegrasikan pasokan dari GI Ngawi dan GI Sragen melalui pemecahan beban menggunakan Load Break Switch (LBS) Widodaren22. Pada skenario rekonfigurasi, sebanyak 41 gardu distribusi tetap memperoleh pasokan dari GI Ngawi, sedangkan 80 gardu distribusi dialihkan ke jaringan yang memperoleh pasokan dari GI Sragen. Analisis dilakukan terhadap dua skenario utama, yaitu kondisi eksisting sebelum rekonfigurasi dan kondisi setelah rekonfigurasi, dengan menggunakan data teknis jaringan yang diperoleh dari PT PLN (Persero), meliputi diagram satu garis, konfigurasi saluran, impedansi penghantar, kapasitas transformator, serta data pembebanan. Evaluasi kinerja sistem dilakukan melalui simulasi aliran daya menggunakan metode Newton–Raphson untuk mengidentifikasi perubahan profil tegangan, arus saluran, pembebanan transformator, aliran daya, dan rugi-rugi daya sebelum dan sesudah rekonfigurasi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kondisi Teknis Jaringan Distribusi 20 kV Sebelum Rekonfigurasi

Hasil simulasi aliran daya menggunakan ETAP 21.0.1 dengan metode Newton–Raphson menunjukkan bahwa penyulang Walikukun mengalami permasalahan teknis berupa penurunan tegangan dan tingginya rugi-rugi daya. Pada kondisi eksisting, tegangan di Bus1177 tercatat sebesar 14,88 kV, dengan persentase penurunan tegangan sebesar 25,56%. Nilai tersebut melampaui batas penurunan tegangan di bawah 10% yang digunakan sebagai acuan dalam penelitian ini. Selain itu, total rugi-rugi daya pada penyulang mencapai 1.097 kW atau 20,93% dari total daya sistem sebesar 5.240 kW. Temuan ini menunjukkan bahwa kondisi jaringan sebelum rekonfigurasi belum memberikan kinerja teknis yang optimal. Permasalahan tersebut penting diperhatikan karena penurunan tegangan dan tingginya rugi-rugi daya berpotensi mengurangi efisiensi penyaluran energi listrik. Dengan demikian, evaluasi kondisi eksisting diperlukan untuk menentukan kebutuhan perubahan konfigurasi jaringan dan menyediakan dasar pembanding yang terukur bagi evaluasi setelah rekonfigurasi.

Kondisi tersebut dapat dijelaskan melalui karakteristik jaringan distribusi yang panjang dan pembagian beban yang belum optimal. Jaringan penyulang Walikukun memiliki panjang sekitar 134 km dan melayani 121 gardu distribusi. Pada sistem distribusi, arus yang mengalir melalui impedansi saluran menimbulkan jatuh tegangan, sedangkan rugi-rugi daya aktif berkaitan dengan resistansi penghantar dan kuadrat arus yang melewatinya. Semakin besar arus yang mengalir pada saluran dengan resistansi tertentu, semakin besar pula rugi daya yang dihasilkan. Panjang jaringan dan jarak antarbeban dapat memperbesar impedansi total yang dilalui daya, terutama pada bagian ujung penyulang. Kondisi ini membantu menjelaskan mengapa Bus1177 memiliki tegangan yang relatif rendah. Namun, hasil simulasi tersebut merupakan gambaran kondisi jaringan berdasarkan data dan asumsi pemodelan yang digunakan, bukan bukti bahwa panjang jaringan merupakan satu-satunya penyebab. Oleh karena itu, rekonfigurasi perlu diarahkan pada perbaikan pola penyaluran daya, pengurangan beban pada bagian jaringan yang kritis, serta peningkatan distribusi beban antara sumber pasokan GI Ngawi dan GI Sragen.

Temuan tersebut sejalan dengan penelitian Karnadi, Gianto, dan Abidin (2023) mengenai pengaruh rekonfigurasi jaringan distribusi 20 kV terhadap profil tegangan

dan rugi-rugi daya. Penelitian pada Penyulang Raya 10 GI Sungai Raya menggunakan analisis aliran daya dengan metode Newton–Raphson dan membandingkan beberapa skenario konfigurasi. Hasilnya menunjukkan bahwa rekonfigurasi dapat memperbaiki profil tegangan sekaligus menurunkan persentase rugi-rugi daya. Kesamaan dengan penelitian Walikukun terletak pada penggunaan analisis aliran daya untuk mengidentifikasi kondisi jaringan dan menilai dampak perubahan konfigurasi terhadap indikator teknis. Penelitian lain oleh penulis dalam artikel Optimal Network Reconfiguration for Power Loss Minimization and Voltage Profile Enhancement in Distribution Systems juga menunjukkan bahwa rekonfigurasi dapat meningkatkan tegangan minimum dan menurunkan rugi-rugi daya pada jaringan distribusi. Besarnya permasalahan pada Walikukun tidak dapat langsung disamakan dengan sistem penelitian terdahulu. Nilai tegangan dan rugi-rugi daya dipengaruhi oleh topologi jaringan, karakteristik penghantar, lokasi beban, besarnya permintaan daya, dan konfigurasi awal masing-masing sistem. Karena itu, kontribusi hasil Walikukun adalah menunjukkan secara kuantitatif kondisi awal pada jaringan aktual yang diteliti dan menyediakan dasar empiris untuk mengevaluasi strategi pemecahan beban antara dua gardu induk.

Penyajian tabel dan gambar dalam artikel perlu diperbaiki agar lebih informatif, relevan, serta mampu mendukung interpretasi hasil penelitian. Gambar 1.1 yang saat ini hanya menunjukkan wilayah GI UP3 Madiun belum cukup menggambarkan hasil utama penelitian, sehingga perlu dilengkapi dengan Single Line Diagram (SLD) jaringan sebelum dan sesudah rekonfigurasi serta ilustrasi posisi LBS Widodaren22 sebagai titik pengalihan beban antara GI Ngawi dan GI Sragen. Selain itu, hasil penelitian perlu disajikan melalui tabel perbandingan tegangan pada bus-bus kritis, grafik profil tegangan seluruh bus, tabel rugi-rugi daya aktif dan reaktif, pembebanan penyulang dan transformator, serta neraca daya (power balance) sebelum dan sesudah rekonfigurasi. Pada aspek ekonomi, perlu ditambahkan tabel proyeksi arus kas selama 25 tahun dan analisis sensitivitas terhadap perubahan asumsi ekonomi yang digunakan. Setiap tabel dan gambar harus dilengkapi nomor, judul, satuan pengukuran, serta keterangan sumber yang jelas, kemudian diikuti pembahasan yang tidak sekadar mengulang angka, tetapi menjelaskan perubahan, penyebab, dan implikasi teknis maupun ekonominya terhadap efektivitas rekonfigurasi jaringan distribusi 20 kV Penyulang Walikukun.

Perbaikan Profil Tegangan Setelah Rekonfigurasi Jaringan

Hasil simulasi setelah rekonfigurasi memperlihatkan peningkatan profil tegangan pada titik-titik kritis penyulang Walikukun. Tegangan Bus1177 meningkat dari 14,88 kV menjadi 18,79 kV, sedangkan persentase penurunan tegangannya berkurang dari 25,56% menjadi 6,015%. Dengan demikian, tegangan pada bus tersebut meningkat sebesar 3,91 kV dan penurunan tegangannya berkurang sebesar 19,545 poin persentase. Perbaikan serupa juga terlihat pada Bus785, dengan tegangan yang meningkat dari 15,19 kV menjadi 18,90 kV dan penurunan tegangan yang berkurang dari 24,03% menjadi 6,49%. Pada Bus794, tegangan meningkat dari 15,07 kV menjadi 18,62 kV, sedangkan penurunan tegangan menjadi 6,89%. Hasil ini menunjukkan bahwa manfaat rekonfigurasi tidak hanya terlihat pada satu titik jaringan, tetapi juga pada beberapa bus yang sebelumnya mengalami penurunan tegangan tinggi. Berdasarkan batas penurunan tegangan di bawah 10% yang

digunakan dalam penelitian, kondisi setelah rekonfigurasi telah memenuhi kriteria teknis tersebut pada titik-titik yang dilaporkan.

Berdasarkan hasil simulasi setelah rekonfigurasi, tegangan pada Bus1177 meningkat menjadi 18,79 kV dari kondisi awal sebesar 14,88 kV. Dengan menggunakan tegangan nominal 20 kV sebagai basis perhitungan, nilai tegangan 18,79 kV menunjukkan persentase penurunan tegangan sekitar 6,05%. Hasil tersebut mengindikasikan adanya perbaikan profil tegangan yang signifikan setelah dilakukan pemecahan beban melalui integrasi pasokan GI Ngawi dan GI Sragen. Meskipun demikian, nilai penurunan tegangan sebesar 6,015% yang tercantum dalam hasil simulasi perlu disesuaikan dengan basis tegangan dan angka keluaran ETAP yang digunakan agar tidak menimbulkan perbedaan antara nilai tegangan aktual dan persentase penurunan tegangan yang dilaporkan. Secara teknis, hasil rekonfigurasi menunjukkan bahwa tegangan pada Bus1177 telah mendekati tegangan nominal 20 kV dan berada dalam batas penurunan tegangan di bawah 10% yang digunakan sebagai kriteria evaluasi dalam penelitian ini.

Perbaikan profil tegangan tersebut diperoleh melalui pemecahan beban dan pengalihan sebagian jaringan ke GI Sragen dengan memanfaatkan LBS Widodaren22 serta penyulang baru GI Sragen–Walikukun. Setelah rekonfigurasi, GI Ngawi menyuplai 41 gardu distribusi dengan daya 1.342 kW, sedangkan GI Sragen menyuplai 80 gardu distribusi dengan daya 3.078 kW. Perubahan ini membagi wilayah pelayanan dan mengubah jalur penyaluran daya sehingga sebagian beban tidak lagi bergantung pada konfigurasi awal penyulang Walikukun. Secara teknis, pengurangan panjang jalur penyaluran yang harus dilalui dari sumber tertentu dan perubahan distribusi arus pada cabang jaringan dapat mengurangi jatuh tegangan. Namun, peningkatan tegangan yang diperoleh bukan semata-mata akibat penambahan sumber pasokan, melainkan berkaitan dengan perubahan topologi dan pembagian beban secara keseluruhan. Hasil simulasi mengindikasikan bahwa strategi integrasi GI Ngawi dan GI Sragen layak dipertimbangkan sebagai alternatif perbaikan kualitas tegangan pada jaringan yang memiliki wilayah pelayanan luas dan titik beban kritis.

Hasil penelitian Walikukun konsisten dengan penelitian Karnadi, Gianto, dan Abidin (2023), yang melaporkan bahwa perubahan konfigurasi jaringan distribusi 20 kV pada Penyulang Raya 10 dapat memperbaiki profil tegangan. Dalam penelitian tersebut, persentase penurunan tegangan pada waktu beban puncak berkurang dari 4,6550% menjadi 2,7318% pada skenario yang direkomendasikan. Kesamaan temuan terletak pada membaiknya kondisi tegangan setelah aliran daya didistribusikan melalui konfigurasi jaringan yang berbeda. Penelitian mengenai rekonfigurasi optimal yang dipublikasikan di Heliyon juga memperlihatkan peningkatan tegangan minimum setelah perubahan konfigurasi jaringan distribusi, meskipun penelitian tersebut menggunakan sistem uji IEEE 33-bus dan metode optimasi yang berbeda.

Perbedaan nilai peningkatan tegangan antara penelitian terdahulu dan Walikukun dapat dipahami karena setiap sistem memiliki karakteristik impedansi, distribusi beban, tegangan awal, dan topologi yang berbeda. Selain itu, penelitian Walikukun menekankan integrasi pasokan dua gardu induk melalui pemecahan beban, sedangkan penelitian berbasis optimasi dapat memilih kombinasi sakelar berdasarkan fungsi objektif tertentu. Hasil Walikukun memperkuat bukti empiris bahwa rekonfigurasi merupakan pendekatan teknis yang dapat meningkatkan

kualitas tegangan, tetapi besarnya peningkatan harus dibuktikan melalui simulasi pada jaringan yang menjadi objek penelitian.

Penurunan Rugi-Rugi Daya dan Manfaat Energi

Rekonfigurasi jaringan menghasilkan penurunan rugi-rugi daya pada penyulang Walikukun. Berdasarkan hasil simulasi, rugi-rugi daya total berkurang dari 1.097 kW sebelum rekonfigurasi menjadi 346 kW setelah rekonfigurasi. Daya yang tidak lagi hilang sebagai rugi-rugi berkurang sebesar 751 kW, atau sekitar 68,46% dibandingkan kondisi awal. Persentase rugi-rugi daya terhadap total daya sistem juga turun dari 20,93% menjadi sekitar 6,60%. Perubahan ini memperlihatkan bahwa rekonfigurasi tidak hanya memperbaiki kondisi tegangan, tetapi juga meningkatkan efisiensi penyaluran daya. Pengurangan rugi-rugi berarti bagian daya yang sebelumnya hilang pada penghantar menjadi lebih kecil. Meskipun demikian, besarnya pengurangan tersebut merupakan hasil perbandingan dua skenario simulasi berdasarkan data dan asumsi penelitian, sehingga tidak boleh langsung dianggap sebagai penghematan energi tahunan aktual tanpa mempertimbangkan variasi beban dan lama operasi. Temuan ini tetap memberikan dasar kuantitatif untuk menilai manfaat teknis rekonfigurasi dan menghitung potensi manfaat ekonomi yang berkaitan dengan pengurangan rugi-rugi daya.

Estimasi energi terselamatkan dalam penelitian ini dihitung berdasarkan pengurangan rugi-rugi daya sebesar 751 kW setelah rekonfigurasi jaringan. Berdasarkan nilai energi terselamatkan sebesar 3.483.129,45 kWh, perhitungan tersebut mengimplikasikan sekitar 4.638 jam operasi ekuivalen beban penuh dalam satu tahun, yang diperoleh dari pembagian energi terselamatkan dengan pengurangan rugi-rugi daya. Nilai tersebut menunjukkan bahwa estimasi penghematan energi tidak hanya didasarkan pada selisih daya hasil simulasi, tetapi juga bergantung pada asumsi durasi operasi dan karakteristik pembebanan jaringan selama periode satu tahun. Oleh karena itu, penggunaan faktor jam operasi ekuivalen atau profil beban tahunan perlu dijelaskan sebagai dasar konversi pengurangan daya menjadi energi. Dengan asumsi tersebut, energi terselamatkan selanjutnya dikalikan dengan tarif energi sebesar Rp761/kWh sehingga diperoleh estimasi manfaat ekonomi sebesar Rp2.650.661.514 per tahun. Perlu ditegaskan bahwa nilai energi terselamatkan tersebut merupakan estimasi berdasarkan asumsi pembebanan dan durasi operasi, bukan pengukuran langsung penghematan energi aktual setelah rekonfigurasi.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa rekonfigurasi jaringan menghasilkan penurunan rugi-rugi daya dari 1.097 kW pada kondisi sebelum rekonfigurasi menjadi 346 kW setelah rekonfigurasi, sehingga diperoleh pengurangan sebesar 751 kW atau 68,46% dari total rugi-rugi daya awal. Persentase pengurangan tersebut diperoleh dari perbandingan selisih rugi-rugi daya terhadap kondisi awal, yaitu (1.097–346)/1.097 × 100%. Secara teknis, penurunan ini berkaitan dengan perubahan pola aliran daya akibat pemecahan beban antara GI Ngawi dan GI Sragen melalui LBS Widodaren22. Pengalihan sebagian beban menyebabkan distribusi arus pada ruas-ruas jaringan berubah sehingga arus yang mengalir pada bagian tertentu penyulang dapat berkurang. Kondisi tersebut berpengaruh terhadap penurunan rugi-rugi daya resistif yang secara teoritis sebanding dengan kuadrat arus dan resistansi penghantar ($P_{loss} = I^2R$). Hasil simulasi memperlihatkan bahwa rekonfigurasi tidak hanya memperbaiki

profil tegangan, tetapi juga meningkatkan efisiensi penyaluran daya melalui pengurangan rugi-rugi daya pada jaringan distribusi Penyulang Walikukun.

Dalam mengevaluasi persentase rugi-rugi daya, perlu diperhatikan kesesuaian antara nilai rugi-rugi daya dan total daya yang digunakan sebagai basis perhitungan. Pada kondisi sebelum rekonfigurasi, rugi-rugi daya sebesar 1.097 kW dibandingkan dengan daya sistem sebesar 5.240 kW menghasilkan persentase sekitar 20,93%. Sementara itu, pada kondisi setelah rekonfigurasi, rugi-rugi daya sebesar 346 kW menghasilkan persentase 6,60% apabila tetap menggunakan basis daya 5.240 kW. Namun, berdasarkan pembagian pasokan setelah rekonfigurasi, GI Ngawi menyuplai beban sebesar 1.342 kW dan GI Sragen sebesar 3.078 kW, sehingga total beban yang dilaporkan adalah 4.420 kW. Dengan demikian, terdapat selisih sebesar 820 kW antara daya sistem awal dan total beban setelah rekonfigurasi yang perlu diklarifikasi melalui neraca daya (power balance). Apabila total daya setelah rekonfigurasi sebesar 4.420 kW digunakan sebagai basis perhitungan, persentase rugi-rugi daya menjadi sekitar 7,83%, bukan 6,60%. Perbandingan persentase rugi-rugi daya perlu menggunakan basis daya yang konsisten dan didukung oleh data daya masuk, daya beban, serta rugi-rugi daya pada masing-masing konfigurasi agar hasil evaluasi teknis dapat dipertanggungjawabkan.

Penurunan rugi-rugi daya berkaitan dengan perubahan jalur penyaluran dan pembagian arus setelah beban dipisahkan antara GI Ngawi dan GI Sragen. Ketika sebagian beban dialihkan ke penyulang baru, arus pada bagian tertentu jaringan dapat berkurang sehingga rugi-rugi resistif juga menurun. Karena arus berada dalam bentuk kuadrat, penurunan arus dapat menghasilkan penurunan rugi daya yang relatif besar, bergantung pada karakteristik jaringan. Berdasarkan perhitungan dalam tesis, pengurangan rugi-rugi daya tersebut digunakan untuk memperkirakan energi terselamatkan sebesar 3.483.129,45 kWh dan nilai penghematan sebesar Rp2.650.661.514, menggunakan harga energi Rp761/kWh. Nilai tersebut merupakan estimasi yang bergantung pada asumsi perhitungan energi dan harga yang digunakan. Manfaat rekonfigurasi terbentuk melalui rangkaian hubungan: perubahan konfigurasi mengubah aliran arus, perubahan arus menurunkan rugi-rugi daya, dan penurunan rugi-rugi menjadi dasar estimasi energi serta nilai ekonomi yang dapat dihemat.

Penelitian Karnadi, Gianto, dan Abidin (2023) memberikan dukungan empiris bahwa rekonfigurasi jaringan distribusi 20 kV dapat mengurangi rugi-rugi daya. Pada Penyulang Raya 10, persentase rugi-rugi daya aktif pada waktu beban puncak berkurang dari 2,410% menjadi 1,489% pada skenario yang direkomendasikan. Hasil penelitian Optimal Network Reconfiguration for Power Loss Minimization and Voltage Profile Enhancement in Distribution Systems juga menunjukkan bahwa rekonfigurasi dapat menurunkan rugi-rugi daya pada beberapa kondisi pembebanan. Selain itu, artikel dalam Energy Policy mengenai rekonfigurasi jaringan distribusi menunjukkan bahwa perubahan topologi jaringan dapat mengurangi kerugian operasional, tetapi daya tarik ekonominya bergantung pada biaya investasi dan manfaat yang diperoleh.

Kesamaan penelitian tersebut dengan studi Walikukun adalah bahwa pengurangan rugi-rugi daya menjadi salah satu manfaat utama perubahan konfigurasi. Perbedaannya terletak pada skala penurunan, karakteristik jaringan, metode penentuan konfigurasi, dan cara mengestimasi manfaat ekonomi. Penurunan

sebesar 68,46% pada Walikukun tidak dapat digeneralisasi sebagai hasil yang pasti diperoleh pada penyulang lain. Namun, hasil tersebut memperlihatkan bahwa pemecahan beban antara dua gardu induk berpotensi memberikan manfaat signifikan pada jaringan yang memiliki rugi-rugi awal tinggi. Penilaian manfaat tetap perlu dilakukan dengan mempertimbangkan data beban, resistansi saluran, durasi operasi, dan biaya energi yang relevan.

Kelayakan Ekonomi Rekonfigurasi Jaringan

Analisis tekno-ekonomi menunjukkan bahwa rekonfigurasi jaringan penyulang Walikukun memenuhi kriteria kelayakan finansial berdasarkan parameter yang digunakan dalam penelitian. Investasi awal atau capital expenditure (CAPEX) diperkirakan sebesar Rp15.883.163.267, dengan periode analisis 25 tahun dan tingkat diskonto 8%. Berdasarkan perhitungan, nilai sekarang manfaat atau present value of cash inflow mencapai Rp20.454.513.523, sedangkan nilai sekarang pengeluaran atau present value of cash outflow sebesar Rp15.883.163.267. Selisih keduanya menghasilkan Net Present Value (NPV) positif sebesar Rp4.571.350.256. Nilai Internal Rate of Return (IRR) mencapai 11,43%, lebih tinggi daripada tingkat pembanding 4,75% yang digunakan dalam tesis. Selain itu, Benefit Cost Ratio (BCR) sebesar 1,28 menunjukkan rasio manfaat terhadap biaya lebih besar dari satu. Payback Period diperkirakan selama 7 tahun 5 bulan. Secara bersama-sama, indikator tersebut menunjukkan bahwa manfaat finansial yang diproyeksikan melebihi biaya investasi berdasarkan asumsi dan kriteria yang diterapkan. Dengan demikian, hasil analisis tidak hanya menunjukkan adanya perbaikan teknis, tetapi juga mengindikasikan bahwa investasi rekonfigurasi berpotensi memberikan nilai ekonomi positif selama periode evaluasi.

Kelayakan ekonomi tersebut berkaitan dengan manfaat yang dihitung dari pengurangan rugi-rugi daya. Energi terselamatkan sebesar 3.483.129,45 kWh digunakan untuk mengestimasi nilai penghematan sebesar Rp2.650.661.514. Nilai manfaat tersebut kemudian dibandingkan dengan kebutuhan investasi dan parameter biaya selama periode analisis. Pendekatan ini penting karena proyek ketenagalistrikan tidak cukup dievaluasi hanya berdasarkan keberhasilan teknis; investasi juga perlu dinilai berdasarkan arus kas, nilai waktu uang, serta waktu pengembalian modal. NPV positif mengindikasikan bahwa nilai sekarang manfaat bersih melebihi biaya menurut asumsi model. IRR yang lebih tinggi daripada tingkat pembanding menunjukkan tingkat pengembalian internal melampaui batas yang digunakan, sedangkan BCR di atas satu menunjukkan manfaat yang dihitung lebih besar daripada biaya. Walaupun demikian, hasil kelayakan finansial sangat bergantung pada ketepatan estimasi investasi, nilai energi yang dihemat, biaya operasi dan pemeliharaan, tingkat diskonto, serta periode proyek. Karena itu, hasil penelitian sebaiknya diinterpretasikan sebagai kelayakan berdasarkan skenario dan parameter yang telah ditetapkan, bukan jaminan bahwa seluruh manfaat tersebut pasti terealisasi. Evaluasi sensitivitas terhadap perubahan harga energi, biaya investasi, dan besarnya pengurangan rugi-rugi akan memperkuat dasar pengambilan keputusan investasi.

Kajian Distribution Grid Reconfiguration Reduces Power Losses and Helps Integrate Renewables yang diterbitkan dalam Energy Policy menekankan bahwa manfaat teknis rekonfigurasi harus dibandingkan dengan biaya investasi untuk menentukan daya tarik ekonominya. Studi tersebut menemukan bahwa investasi

teknologi sakelar tidak selalu menarik apabila manfaat yang dihitung hanya berasal dari pengurangan rugi-rugi, sehingga hasil ekonomi bergantung pada kondisi jaringan dan komponen manfaat yang diperhitungkan. Studi Graph Theory-Enhanced Integrated Distribution Network Reconfiguration and Distributed Generation Planning mengintegrasikan pengurangan rugi-rugi, perbaikan tegangan, serta biaya perencanaan untuk menilai manfaat teknis dan ekonomi pada jaringan distribusi. Kesamaan dengan penelitian Walikukun adalah penggunaan manfaat pengurangan rugi-rugi sebagai salah satu dasar evaluasi ekonomi. Perbedaannya, studi Walikukun menilai integrasi pasokan GI Ngawi dan GI Sragen serta menggunakan NPV, IRR, BCR, dan Payback Period berdasarkan parameter proyek setempat, sedangkan studi lain dapat memasukkan optimasi, pembangkitan terdistribusi, atau manfaat tambahan. Perbedaan tersebut menjelaskan mengapa kelayakan ekonomi tidak dapat disimpulkan hanya dari besarnya persentase penurunan rugi-rugi. Hasil Walikukun yang menghasilkan NPV positif, IRR 11,43%, dan BCR 1,28 mendukung kelayakan menurut kriteria yang digunakan dalam tesis. Namun, sebelum menjadi dasar investasi, hasil tersebut sebaiknya diuji melalui analisis sensitivitas dan validasi asumsi biaya serta manfaat agar kesimpulan lebih tangguh terhadap ketidakpastian operasional dan ekonomi.

Hasil penelitian ini memperkuat temuan Salyani et al. (2022) yang menekankan pentingnya mempertimbangkan kapasitas gardu induk dalam pelaksanaan transfer beban melalui penempatan switch pada jaringan distribusi. Dalam penelitian ini, pemecahan beban melalui LBS Widodaren22 dengan mengintegrasikan pasokan GI Ngawi dan GI Sragen menghasilkan perbaikan profil tegangan pada jaringan Penyulang Walikukun. Tegangan pada Bus1177 meningkat dari 14,88 kV menjadi 18,79 kV, sedangkan penurunan tegangan berkurang dari 25,56% menjadi 6,015%. Temuan tersebut sejalan dengan penelitian Jayabarathi et al. (2024) yang menunjukkan bahwa rekonfigurasi jaringan dapat berkontribusi terhadap perbaikan profil tegangan dan pengurangan rugi-rugi daya. Hasil ini juga didukung oleh kajian Behbahani et al. (2024) serta Lotfi et al. (2024) yang menjelaskan bahwa perubahan konfigurasi jaringan merupakan salah satu pendekatan untuk meningkatkan kinerja sistem distribusi melalui pengaturan aliran daya dan pemerataan pembebanan. Hubungan tersebut dapat dijelaskan melalui karakteristik aliran daya pada penghantar, yaitu rugi-rugi daya aktif berbanding lurus dengan kuadrat arus dan resistansi penghantar. Pemindahan sebagian beban ke GI Sragen mengubah distribusi arus pada jaringan, sehingga beban pada bagian tertentu penyulang berkurang dan kondisi penyaluran daya menjadi lebih baik. Hal ini tercermin dari penurunan rugi-rugi daya total dari 1.097 kW menjadi 346 kW, atau berkurang sebesar 68,46%. Hasil penelitian memberikan bukti empiris bahwa strategi pemecahan beban antargardu induk dapat meningkatkan kinerja teknis jaringan distribusi, dengan tetap memperhatikan kapasitas sumber pasokan dan batas operasi peralatan.

Hasil penelitian ini memiliki keterkaitan dengan Lawal et al. (2023) yang mengkaji konsekuensi biaya dari rekonfigurasi jaringan dan kompensasi shunt pada sistem distribusi 33 kV, serta Neda (2025) yang menempatkan manfaat tekno-ekonomi sebagai bagian dari evaluasi rekonfigurasi sistem distribusi. Kedua penelitian tersebut memperlihatkan bahwa keberhasilan rekonfigurasi perlu dinilai tidak hanya berdasarkan perbaikan parameter teknis, tetapi juga berdasarkan manfaat ekonomi yang dihasilkan. Dalam penelitian ini, penurunan rugi-rugi daya sebesar 751 kW

digunakan sebagai dasar estimasi energi terselamatkan sebesar 3.483.129,45 kWh, dengan nilai penghematan sebesar Rp2.650.661.514 berdasarkan asumsi harga energi Rp761/kWh. Selanjutnya, dengan kebutuhan investasi sebesar Rp15.883.163.267, hasil analisis menunjukkan NPV sebesar Rp4.571.350.256, IRR sebesar 11,43%, BCR sebesar 1,28, dan Payback Period selama 7 tahun 5 bulan. Secara teoretis, hasil tersebut menggambarkan hubungan antara efisiensi teknis dan kelayakan investasi, yaitu perbaikan kinerja jaringan berpotensi menghasilkan manfaat ekonomi yang dapat digunakan untuk menilai pengembalian investasi selama umur proyek. NPV positif dan BCR lebih besar dari satu menunjukkan bahwa manfaat terdiskonto dalam perhitungan lebih besar daripada biaya investasi, sedangkan IRR menunjukkan tingkat pengembalian internal proyek berdasarkan arus kas yang digunakan. Meskipun demikian, interpretasi kelayakan ekonomi tersebut tetap bergantung pada asumsi tarif energi, tingkat diskonto, umur proyek, biaya operasi dan pemeliharaan, serta estimasi energi yang dapat dihemat. Oleh karena itu, hasil penelitian ini memperluas pembahasan terdahulu melalui penerapan evaluasi teknis dan ekonomi secara terpadu pada jaringan aktual Penyulang Walikukun yang mengintegrasikan dua gardu induk.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa kondisi awal sistem distribusi tenaga listrik 20 kV pada Penyulang Walikukun belum optimal, terutama ditinjau dari kualitas tegangan dan efisiensi penyaluran daya. Hasil analisis aliran daya menggunakan ETAP 21.0.1 dengan metode Newton–Raphson mengindikasikan perlunya perubahan konfigurasi jaringan untuk mengatasi penurunan tegangan dan tingginya rugi-rugi daya. Dengan demikian, evaluasi kondisi eksisting menjadi dasar penting dalam merumuskan strategi penataan jaringan distribusi yang sesuai dengan karakteristik beban dan kondisi operasional sistem. Rekonfigurasi melalui pemecahan beban dan integrasi pasokan dari Gardu Induk Ngawi dan Gardu Induk Sragen terbukti mampu memperbaiki kinerja teknis jaringan berdasarkan hasil simulasi. Perubahan konfigurasi tersebut meningkatkan kualitas profil tegangan pada titik-titik kritis sekaligus mengurangi rugi-rugi daya secara signifikan. Temuan ini menegaskan bahwa pengaturan ulang pola penyaluran daya dan pembagian beban antarsumber pasokan dapat menjadi alternatif untuk meningkatkan efisiensi sistem distribusi, khususnya pada jaringan dengan wilayah pelayanan luas dan permasalahan tegangan yang cukup besar.

Perspektif ekonomi, hasil evaluasi menunjukkan bahwa rekonfigurasi jaringan memenuhi kriteria kelayakan finansial berdasarkan parameter yang digunakan dalam penelitian, yaitu Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), Benefit Cost Ratio (BCR), dan Payback Period. Temuan ini mengindikasikan bahwa perbaikan teknis yang dihasilkan berpotensi memberikan manfaat ekonomi yang mendukung kebutuhan investasi. Secara keseluruhan, penelitian ini menyimpulkan bahwa integrasi jaringan 20 kV antara GI Ngawi dan GI Sragen merupakan alternatif yang layak dipertimbangkan untuk meningkatkan kinerja teknis sekaligus mendukung efisiensi ekonomi sistem distribusi, dengan tetap memperhatikan validitas asumsi teknis dan parameter finansial dalam penerapannya.

REKOMENDASI

Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengembangkan analisis rekonfigurasi jaringan distribusi 20 kV dengan mempertimbangkan variasi beban pada waktu beban puncak dan di luar beban puncak, perubahan permintaan energi, serta kondisi operasional jaringan. Penggunaan data beban yang lebih terperinci dan pemutakhiran parameter teknis penghantar, transformator, serta peralatan switching diharapkan dapat meningkatkan akurasi pemodelan dan memperkuat validitas hasil simulasi. Selain itu, penelitian mendatang dapat membandingkan metode Newton–Raphson dengan metode optimasi rekonfigurasi jaringan untuk mengidentifikasi alternatif konfigurasi yang memberikan perbaikan tegangan dan pengurangan rugi-rugi daya secara lebih optimal.

Dari aspek ekonomi, penelitian berikutnya perlu mengembangkan analisis sensitivitas terhadap perubahan biaya investasi, biaya operasi dan pemeliharaan, harga energi listrik, tingkat diskonto, serta periode evaluasi proyek. Analisis ini diperlukan untuk mengetahui sejauh mana kelayakan finansial rekonfigurasi jaringan tetap bertahan ketika terjadi perubahan asumsi ekonomi. Penelitian lanjutan juga dapat memasukkan ketidakpastian pertumbuhan beban dan kebutuhan pengembangan infrastruktur agar estimasi manfaat ekonomi lebih realistis. Adapun hambatan yang perlu diperhatikan dalam penelitian ini meliputi keterbatasan ketersediaan dan ketepatan data teknis jaringan, ketergantungan hasil simulasi pada asumsi pemodelan, serta ketidakpastian realisasi penghematan energi dan biaya investasi. Oleh karena itu, validasi data bersama pihak penyedia tenaga listrik dan pengujian terhadap berbagai skenario teknis maupun ekonomi perlu dilakukan sebelum hasil penelitian dijadikan dasar keputusan implementasi di lapangan.

REFERENSI

Alkuhayli, A., Alrashidi, M. R., & Alotaibi, M. (2024). Designing a multi-objective energy management system in multiple interconnected microgrids based on MOPSO. Heliyon, 10(4), e26391.

Amiruddin, A., Dargaville, R., & Gawler, R. (2024). Optimal integration of renewable energy, energy storage, and Indonesia's super grid. Energies, 17(20), 5061.

Ayobe, A. S., & Gupta, S. (2022). Comparative investigation on HVDC and HVAC for bulk power delivery. Materials Today: Proceedings, 48, 958–964.

Behbahani, M. R., Jalilian, A., Bahmanyar, A., & Ernst, D. (2024). Comprehensive review on static and dynamic distribution network reconfiguration methodologies. IEEE Access, 12, 9510–9525. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3350207

Bhattar, P. L., Sharma, A., & Gupta, R. (2024). AC–DC multi-phase power flow algorithms for active systems. Electric Power Systems Research, 231, 110812.

Chariri, F., Pawenary, Reza, A., Pariaman, H., & Ramadhon, N. (2024). Techno-economic evaluation of green hydrogen production from off-grid solar PV systems in remote areas of Indonesia. Proceedings of the 10th International Conference on Science and Technology (ICST 2024), Advances in Engineering Research, 268.

Chen, Y., Wang, H., Yan, Z., Xu, X., Zeng, D., & Ma, B. (2022). A two-phase market clearing framework for inter-provincial electricity trading in Chinese power grids. Sustainable Cities and Society, 85, 104057.

Firmansyah, A., & Abidin, Z. (2022). Studi hubung singkat dengan interkoneksi distributed generation pada jaringan tegangan menengah 20 kV PT PLN UP3 Pontianak. Journal of Electrical Engineering, Energy, and Information Technology, 10(2).

Haramain, M. N. (2023). Kajian aspek keberlanjutan program kelistrikan pedesaan berbasis energi terbarukan off-grid oleh Direktorat Jenderal EBTKE di Indonesia. Journal of Economics and Business UBS, 12(6), 3730–3746.

Heydari, R., & Barforoushi, T. (2024). HVDC/HVAC transmission network expansion planning in electricity markets in the presence of wind resources. Electric Power Systems Research, 229, 110182.

Jayabarathi, T., Raghunathan, T., Mithulananthan, N., Cherukuri, S. H. C., & Sai, G. L. (2024). Enhancement of distribution system performance with reconfiguration, distributed generation and capacitor bank deployment. Heliyon, 10(7), e26343. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26343

Langer, J., et al. (2024). The role of inter-island transmission in full decarbonisation scenarios for Indonesia's power sector. Environmental Research: Energy, 1(2), 025006.

Latif, N. Y., Indrawan, A. W., Noor, N. A., & Rahmadani, A. (2025). Analisis dampak integrasi gardu induk Moutong terhadap drop tegangan sistem isolated ULP Kotaraya. Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan, 13(3).

Lawal, M. O., Olawuyi, A. A., Awomolo, K. J., & Jimoh, A. (2023). The economics of network reconfiguration and shunt compensation on a 33 kV distribution network. Journal of Science and Technology, 15(1), 16–28. https://doi.org/10.30880/jst.2023.15.01.003

Li, Y., et al. (2025). Designing a clearing model for the regional electricity spot market based on the construction of the provincial electricity market: A case study of the Yangtze River Delta Regional Electricity Market in China. Processes, 13(2), 492.

Lotfi, H., Hajiabadi, M. E., & Parsadust, H. (2024). Power distribution network reconfiguration techniques: A thorough review. Sustainability, 16(23), 10307. https://doi.org/10.3390/su162310307

Meena, G., Singh, R., & Chatterjee, S. (2024). Optimizing power flow and stability in hybrid AC/DC systems: A comprehensive review. Energies, 17(4), 1522.

Mohammadi, F., Azizi, N., CheshmehBeigi, H. M., & Rouzbehi, K. (2024). Stability and control of VSC-based HVDC systems: A systematic review. e-Prime – Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy, 8, 100503.

Neda, O. M. (2025). Distribution system reconfiguration for enhancing techno-economic advantages using a novel technique: A case study of AL-Fuhood substation, Iraq. Progress in Engineering Science, 2(3), 100124. https://doi.org/10.1016/j.pes.2025.100124

Owusuhi, A., Alsaidan, I., & Alotaibi, M. (2024). A new framework for active loss reduction and voltage management in distribution networks with distributed generation. Applied Sciences, 14(6), 2973.

Pariaman, H., Luciana, G. M., & Hisjam, M. (2023). Economic dispatch optimization using Lagrange multipliers as merit order strategy for thermal power plant in Java and Sumatra. Proceedings of the 7th International Conference on Industrial, Mechanical, Electrical and Chemical Engineering (ICIMECE 2021).

Pavlyuk, O., & El-Khattam, W. (2023). Load flow analysis for smart grids with renewable energy integration. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 152, 109264.

Pinto, Z. N., Nugraha, H., & Brunner, I. M. (2026). Performance optimization analysis of a 20 kilo volt (kV) distribution network in Dili City using ETAP software. ENERGY: Jurnal Ilmiah Ilmu-Ilmu Teknik, 16(1), 24–37.

Refaat, M. M. (2023). A new decision-making strategy for techno-economic planning: Generation and transmission expansion integration. Systems, 11(3), 127.

Salyani, P., Nourollahi, R., Zare, K., & Razzaghi, R. (2022). A new MILP model of switch placement in distribution networks with consideration of substation overloading during load transfer. Sustainable Energy, Grids and Networks, 32, 100944. https://doi.org/10.1016/j.segan.2022.100944

Singh, M., & Kaur, J. (2023). Loss minimization strategies in distribution networks using network reconfiguration and capacitor placement. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 184, 113561.

Siregar, Y., & Pardede, C. (2022). Study of hybrid transmission HVAC/HVDC by particle swarm optimization (PSO). Energies, 15(20), 7638.

Srinivasan, D., & Lee, M. S. (2022). Modern optimization techniques for power flow and loss reduction in electrical networks: An overview. IEEE Transactions on Smart Grid, 13(5), 4123–4138.

Wang, Z., & Zhang, J. (2023). Distributed generation placement for loss reduction in active distribution systems. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 155, 109470.

Yuliastono, O. D., Hardin, Y., & Pramono, W. B. (2024). Studi kelayakan pembangunan sistem interkoneksi jaringan listrik Port, Kamp Tuhup & Kamp Baru Tuhup. Journal of Electrical Engineering and Computer (JEECOM), 6(2), 481–493.

Zhang, Y., Chen, C., & Li, H. (2024). Real-time reactive power management for smart distribution systems using adaptive control. IEEE Access, 12, 22742–22756.